



气象学报

ACTA METEOROLOGICA SINICA

认识大气环流和气候系统动力学100年进步

李建平 陈文 周天军 刘屹岷 黄刚 刘晓东 侯兆禄 丁瑞强 胡鹏 陈尚锋 谭本旭 付遵涛 封国林 罗德海 段晚锁 陈晓龙 姜继兰 唐颖苏 胡开明 屈侠

Progress of atmospheric circulation and climate system dynamics studies in China over the past 100 years

LI Jianping, CHEN Wen, ZHOU Tianjun, LIU Yimin, HUANG Gang, LIU Xiaodong, HOU Zhaolu, DING Ruiqiang, HU Peng, CHEN Shangfeng, TAN Benkui, FU Zuntao, FENG Guolin, LUO Dehai, DUAN Wansuo, CHEN Xiaolong, JIANG Jilan, TANG Haosu, HU Kaiming, QU Xia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240144>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



扫码关注公众号，获取更多信息！

认识大气环流和气候系统动力学 100 年进步*

李建平^{1,2} 陈 文³ 周天军⁴ 刘屹岷^{4,5} 黄 刚^{4,5} 刘晓东^{5,6} 侯兆禄¹

丁瑞强⁷ 胡 鹏³ 陈尚锋⁸ 谭本旭⁹ 付遵涛⁹ 封国林^{10,11} 罗德海¹²

段晚锁^{4,5} 陈晓龙⁴ 姜继兰⁴ 唐颖苏⁴ 胡开明^{4,8} 屈 侠^{4,8}

LI Jianping^{1,2} CHEN Wen³ ZHOU Tianjun⁴ LIU Yimin^{4,5} HUANG Gang^{4,5} LIU Xiaodong^{5,6} HOU Zhaolu¹

DING Ruiqiang⁷ HU Peng³ CHEN Shangfeng⁸ TAN Benkui⁹ FU Zuntao⁹ FENG Guolin^{10,11} LUO Dehai¹²

DUAN Wansuo^{4,5} CHEN Xiaolong⁴ JIANG Jilan⁴ TANG Haosu⁴ HU Kaiming^{4,8} QU Xia^{4,8}

1. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心/物理海洋教育部重点实验室/未来海洋学院/海洋与大气学院/海洋碳中和中心青岛, 266100
2. 崂山实验室, 青岛, 266237
3. 云南大学大气科学系, 昆明, 650500
4. 中国科学院大气物理研究所地球系统数值模拟和应用全国重点实验室, 北京, 100029
5. 中国科学院大学, 北京, 100049
6. 中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室, 西安, 710061
7. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室/环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京, 100875
8. 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京, 100029
9. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京, 100871
10. 国家气候中心, 北京, 100081
11. 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州, 225002
12. 中国科学院东亚区域气候环境重点实验室, 北京, 100029
1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System (DOMES) /Key Laboratory of Physical Oceanography/Academy of Future Ocean/College of Oceanic and Atmospheric Sciences/Center for Ocean Carbon Neutrality, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*
2. *Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China*
3. *Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China*
4. *National Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
5. *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
6. *State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China*
7. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE) /Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters of Chinese, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
8. *Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
9. *Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*
10. *National Climate Centre, Beijing 100081, China*
11. *College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou, 225002, China*
12. *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, and University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(42288101、42141019、42261144687)。

作者简介: 李建平, 主要从事气候动力学与可预报性、季风与海气相互作用等研究。E-mail: ljp@ouc.edu.cn

2024-09-05 收稿, 2025-04-07 改回.

李建平, 陈文, 周天军, 刘屹岷, 黄刚, 刘晓东, 侯兆禄, 丁瑞强, 胡鹏, 陈尚锋, 谭本旭, 付遵涛, 封国林, 罗德海, 段晚锁, 陈晓龙, 姜继兰, 唐颖苏, 胡开明, 屈侠. 2025. 认识大气环流和气候系统动力学 100 年进步. 气象学报, 83(3): 1-56

Li Jianping, Chen Wen, Zhou Tianjun, Liu Yimin, Huang Gang, Liu Xiaodong, Hou Zhaolu, Ding Ruiqiang, Hu Peng, Chen Shangfeng, Tan Benkui, Fu Zuntao, Feng Guolin, Luo Dehai, Duan Wansuo, Chen Xiaolong, Jiang Jilan, Tang Haosu, Hu Kaiming, Qu Xia. 2025. Progress of atmospheric circulation and climate system dynamics studies in China over the past 100 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(3):1-56

Abstract This paper comprehensively reviews profound understanding and significant advancements made by the Chinese meteorological community over the past century in the fields of atmospheric circulation and climate system dynamics. It summarizes research achievements in multiple areas, including atmospheric teleconnection, nonlinear atmospheric dynamics, monsoon circulation, Tibetan Plateau dynamics, climate system dynamics, and paleoclimate. Although we strive to be as comprehensive as possible, limitations in scope, length, and capability may lead to omissions, for which we appreciate your understanding.

In the field of atmospheric teleconnection study, Chinese scholars have conducted in-depth research on fundamental characteristics of atmospheric circulation and its relationship with climate change. They have revealed the formation mechanisms and impacts of various teleconnection patterns, including the East Asia-Pacific (EAP) pattern and the Silk Road pattern (SRP). These findings have formed a core theoretical framework for understanding summer circulation anomalies in the Northern Hemisphere. They have not only deepened our understanding of atmospheric teleconnection phenomena but also provided new perspectives and tools for international climate prediction and research, significantly enhancing our ability to predict atmospheric circulation changes. Regarding monsoon circulation research, Chinese scholars have systematically revealed the formation mechanisms of the East Asian monsoon and its interactions with the three major tropical oceans (Pacific, Indian, and Atlantic). Through in-depth analyses of the air-sea interaction mechanisms governing interannual and interdecadal variability of the monsoon, they have significantly improved our understanding of monsoon system variations. The Global Monsoon Model Intercomparison Project (GMMIP) led by China has been incorporated into the CMIP6 framework, and its findings have provided crucial support for the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Furthermore, Chinese researchers have comprehensively reviewed the definition of the East Asian monsoon index, historical monsoon change detection and attribution, and its future projections. Their work provides a theoretical foundation and technical support for monsoon climate prediction and adaptation, thereby promoting the advancement of global monsoon research. The field of climate system dynamics encompasses various aspects such as global warming dynamics, atmospheric stratification changes, rapid climate adjustments, and climate variability adjustments. Through numerical simulations and theoretical analyses, Chinese scientists have explored key issues such as precipitation change mechanisms, atmospheric circulation adjustments, and climate feedback effects under the background of global warming. Climate system models developed in China have demonstrated outstanding performance in CMIP6 with relevant conclusions directly cited in the IPCC AR6, marking a significant rise in China's influence in international climate assessments. In particular, studies on key climate systems such as the East Asian monsoon and the North Pacific subtropical high have provided robust support for climate prediction and response strategies in China and beyond. As a unique topographic feature on Earth, the Tibetan plateau has a profound impact on atmospheric circulation and the climate system, drawing extensive attention. Through extensive observations and numerical simulations, Chinese meteorologists have revealed the plateau's dynamic and thermal forcing effects on atmospheric circulation. Studies have shown that the Tibetan plateau not only modifies the atmospheric circulation structures of surrounding regions but also exerts a far-reaching influence on the Asian monsoon, regional climate, and even global climate. Relevant theories have been recognized by the international academic community as key mechanisms explaining Asian climate variability. In the field of paleoclimate research, Chinese scholars have utilized extensive historical documents and natural archives to reconstruct climate change sequences over historical and geological periods, revealing periodicity, abrupt changes, and regional characteristics of climate variations. These research findings have not only filled gaps in China's paleoclimate study but also provided valuable materials and data support for international paleoclimate research, advancing global paleoclimate studies. In the field of nonlinear atmospheric dynamics, Chinese scientists have made important contributions to nonlinear wave equations in the

atmosphere, nonlinear dynamics of blocking, and predictability. They proposed the Conditional Nonlinear Optimal Perturbation (CNOP) method and the Nonlinear Local Lyapunov Exponent (NLLE), which have been recommended by the World Meteorological Organization (WMO) as predictability analysis tools. These innovative theories and methods have not only enriched the theoretical framework of nonlinear atmospheric dynamics but also provided new insights and technical support for predictability studies of atmospheric and oceanic systems worldwide, pushing forward the international frontier of research in this field.

In summary, over the past century, the Chinese meteorological community has made remarkable achievements in understanding atmospheric circulation and climate system dynamics, making important contributions to climate change comprehension and improving climate prediction capabilities. Looking ahead, Chinese meteorologists will continue to deepen their research, innovate persistently, and contribute more Chinese wisdom and strength to the advancement of global meteorological science.

Key words Atmospheric teleconnections, Nonlinear atmospheric dynamics, monsoon, Tibetan plateau dynamics, Climate system dynamics, Paleoclimate, Atmospheric dynamics, Global warming dynamics, Historical climate reconstruction

摘 要 文中全面回顾了中国气象学界在过去一百年中,对大气环流和气候系统动力学领域的深刻理解和显著进步,综述了大气环流遥相关、季风环流、气候系统动力学、青藏高原动力学、古气候及非线性大气动力学等领域的研究成果。尽管力求详尽,但受限于主题范围、篇幅和能力,可能仍有遗漏,敬请谅解。

在大气环流遥相关方面,中国学者对大气环流的基本特征及其与气候变化的关系进行了深入研究,揭示了包括东亚-太平洋型、丝绸之路型等多种遥相关型的形成机制和影响。这些研究成果构成了北半球夏季环流异常的核心理论框架,不仅深化了对大气环流遥相关现象的理解,也为国际气候预测和研究提供了新的视角和工具,显著提升了大气环流变化的预测能力。季风环流研究方面,中国学者系统揭示了东亚季风的形成机制及其与热带三大洋(太平洋、印度洋、大西洋)之间的相互作用。通过分析季风年际和年代际变率的海气相互作用机理,显著提升了对季风系统变化规律的理解,中国主导的全球季风模式对比计划被纳入 CMIP6 框架,其成果为 IPCC 第六次评估报告提供了关键支撑。同时,对东亚季风指数的定义、历史变化检测归因以及未来预估进行了全面回顾,为季风气候的预测和应对提供了理论基础和技术支持,促进了全球季风研究的深入发展。气候系统动力学领域的研究涵盖了全球变暖动力学、大气层结变化、快速气候调整以及气候变率调整等多个方面。中国学者通过数值模拟实验和理论分析,深入探讨了全球变暖背景下的降水变化机制、大气环流调整以及气候反馈作用等关键问题。中国研发的气候系统模式在 CMIP6 中表现突出,相关结论被 IPCC AR6 直接引用,标志着中国模式在国际评估中的话语权显著提升。特别是针对东亚季风、北太平洋副热带高压等关键气候系统的研究,为中国乃至全球的气候预测和应对提供了有力支持。青藏高原作为地球上一个独特的地形单元,其对大气环流和气候系统的影响受到了广泛关注。中国学者通过大量观测和数值模拟实验,揭示了青藏高原对大气环流的动力和热力强迫作用。研究表明,青藏高原不仅改变了周边地区的大气环流结构,还对亚洲季风、区域气候乃至全球气候产生了深远影响,相关理论被国际学界认为是解释亚洲气候变率的核心机制之一。在古气候研究方面,中国学者利用丰富的历史文献和自然档案,重建了历史时期和地质时期的气候变化序列,揭示了气候变化的周期性、突变性和区域特征。这些研究成果不仅填补了中国古气候研究的空白,也为国际古气候研究提供了宝贵的资料和数据支持,推动了全球古气候研究的深入发展。在非线性大气动力学方面,中国学者在大气非线性波动方程、阻塞非线性动力学、可预报性等方面做出了重要贡献,提出了条件非线性最优扰动方法和非线性局部 Lyapunov 指数,成为世界气象组织推荐的可预报性分析工具。这些创新性的理论和方法不仅丰富了非线性大气动力学的理论体系,也为国际大气和海洋系统的可预报性研究提供了新的思路和技术支持,推动了该领域的国际前沿研究。

过去一百年,中国气象学界在认识大气环流和气候系统动力学方面取得了丰硕成果,为理解气候变化、提高气候预测能力做出了重要贡献。展望未来,中国气象学者将继续在这一领域深耕细作,不断开拓创新,为全球气象事业的进步贡献更多中国智慧和力量。

关键词 大气环流遥相关, 非线性大气动力学, 季风环流, 青藏高原动力学, 气候系统动力学, 古气候, 大气动力学, 全球变暖动力学, 历史气候重建

中图法分类号 P40

1 引 言

大气环流和气候系统动力学是气象学和气候

科学领域的重要研究方向,对于理解全球天气和气候的变化规律、预测未来气候变化趋势以及制定应对气候变化的策略具有重要意义。自 20 世纪初以

来,随着观测技术的进步和数值模拟能力的发展,大气环流和气候系统动力学的研究取得了显著进展。中国学者在这一领域也做出了重要贡献,取得了丰硕的成果。文中旨在相对全面回顾中国在大气环流和气候系统动力学领域过去 100 年的研究进展,概述这一领域的基本概念、理论基础、研究方法以及取得的主要成就。百年来,为了对天气气候预测、满足国家防灾减灾需求、支撑国家决策,中国学者从大气环流遥相关入手,探讨大气环流中不同地点气候异常之间的联系,为天气气候预测提供了切实可行的方法和手段。针对中国天气气候特征,赵九章等人开启了中国季风环流的研究,后续研究者深入分析季风系统的形成、变化及其对全球气候的影响,进一步丰富大气环流的研究内容和视野。为了更全面理解大气环流和季风系统,叶笃正、符淙斌等人引入和发展了气候系统的概念,用系统的角度来研究天气气候变化,为理解全球气候变化提供宏观视角。在理解大气环流和气候系统整体框架的基础上,叶笃正、陶诗言等人开创并发展了青藏高原天气气候动力学,揭示这一特殊地形对全球气候的独特影响。在全球气候变化的背景下,为揭示中国过去气候变化的特征和规律,也为全球气候变化研究提供重要的区域视角和证据,竺可桢等人 and 后续研究者通过中国多时间尺度的古气候变化研究,回顾历史气候变化规律,为现代气候变化研究提供历史参照。非线性大气动力学作为大气科学的一个重要分支,致力于揭示大气运动过程中复杂的非线性现象和机制,其研究成果对提升天气预报和气候预测的准确性具有重要意义,中国学者在此领域取得了系统创新性成果,引领国际同行。文中从大气环流遥相关、季风环流、气候系统动力学及青藏高原天气气候动力学、古气候以及非线性大气动力学等进行介绍,希望能够为读者提供一个相对全面而深入的了解,阐释中国在大气环流和气候系统动力学领域的独特地位和重要贡献。诚然,主题涉及的领域比较庞大,文献众多,可能存在挂一漏万的情况,还请读者海涵。

2 大气环流遥相关

大气环流作为地球气候系统的重要组成部分,对全球天气和气候的变化起着至关重要的作用。

遥相关现象,作为大气环流中的一个重要特征,描述了相隔较远的不同地点气候异常之间的统计上显著的联系。中国学者在大气环流遥相关研究领域取得了丰硕的成果,从早期的开创性工作到近年来的深入探索,不断揭示了东亚大气环流及其与全球气候变化的紧密联系。文中主要关注大气环流中的遥相关现象,特别是其在东亚和全球天气气候预测中的重要性,系统回顾经典的大气涛动、东亚-太平洋型遥相关、沿夏季急流传播的遥相关等方面的研究成果,以期读者提供相对全面而深入的了解。

中国学者在大气环流研究领域取得了丰硕的成果。从竺可桢先生 20 世纪二三十年代的开创性工作(竺可桢, 1934),到赵九章先生引入动力气象学原理(JawJeou-Jang, et al, 1937),再到叶笃正、顾震潮、陶诗言等前辈科学家对东亚大气环流的全面深入研究(叶笃正等, 1956; 叶笃正等, 1958; Staff Members of the Section of Synoptic and Dynamic Meteorology, 1958a, 1958b, 1958c),一系列具有国际影响的论文与专著相继问世。这些研究不仅揭示了东亚天气和气候的重要特征,还阐述了亚洲大陆和青藏高原对全球大气环流的作用。此后,黄荣辉、李崇银等科学家在大气中准定常行星波、非线性问题等方面也取得了重要进展(李麦村, 1979; 黄荣辉, 1984; 李崇银等, 1995),相关文献对此进行了详尽的回顾与总结(黄荣辉等, 1984; 朱抱真等, 1990; 黄荣辉, 2001; 李建平等, 2003; 陈受钧等, 2007; 丁一汇, 2021)。

相隔较远的不同地点的气候异常之间,有时会表现出统计上显著的联系,这一现象被称为“遥相关”(Teleconnection; Wallace, et al, 1981; Ding Q H, et al, 2007; 谭本旭等, 2014; Wu, et al, 2017; Chen, et al, 2023; 黄刚等, 2024; 王林等, 2024; Alizadeh, 2024)。根据气候异常的空间分布特征,这些遥相关主要分为 3 类:(1)东西偶极子型,例如南方涛动;(2)南北偶极子型,例如北太平洋涛动;(3)具有多个异常中心的波列型,又可分为经向型波列和纬向型波列,例如太平洋-北美型遥相关和丝绸之路型遥相关。遥相关现象除了要有统计上显著的联系之外,往往还要求有明确的物理意义。以往研究揭示出了遥相关型形成和维持的多种动力

学过程,包括准定常罗斯贝波的传播、波动与平均流之间的相互作用、高频天气尺度涡旋的反馈、大气经圈翻转环流、热带海气相互作用正反馈、海洋中的波动和流动等(谭本旭等, 2014; 黄刚等, 2024; 王林等, 2024; Alizadeh, 2024)。

与亚洲夏季风有关的遥相关主要是波列型,且很大一部分都与准定常罗斯贝波列在地球球面上的传播有关(表 1)。例如,亚洲夏季风的年际变率或者季节内变率,可以影响降水异常和大气热源,从而激发出向北太平洋和北美等下游地区传播的准定常罗斯贝波列(Huang, et al, 1992; Ding, et al, 2005; Hu, et al, 2024)。此外,夏季风对流活动还可能通过热力作用引起经圈环流扰动,在中高纬度急流附近引起罗斯贝波源异常,然后再通过急流激发出向下游传播的环流异常(Sardeshmukh, et al, 1988; Ji, et al, 2016; 王林等, 2024)。表 1 总结了与亚洲夏季风密切相关的二十多种遥相关型,包括主要特征及相关的早期研究。可以看到,中国学者在这方面做过大量工作,有着扎实且系统的研究成果。

2.1 经典的大气涛动

遥相关现象最早的发现,可以追溯到一个世纪前 Walker 等的工作(Walker, 1924; Walker, et al, 1932)。他发现月平均的海平面气压图上经常会出现稳定的高低压活动中心,而且这些活动中心的变化不是孤立的,有时两个大气活动中心的气压会呈现跷跷板式的变化。Walker 把这种大气活动中心之间的反位相变化称为涛动(Oscillation),并且依据地理位置将它们命名:北大西洋涛动(冰岛低压与亚速尔高压)、北太平洋涛动(阿留申低压与夏威夷高压)、南方涛动(热带东、西太平洋)。后来 Bjerknes(1969)通过纬向垂直环流,将大气中的南方涛动与海洋中的厄尔尼诺现象联系起来,提出了 ENSO 的概念(El Nio-Southern Oscillation)。此后,关于 ENSO 的形成机制、遥相关、与季风的相互作用等,一直是气候学的核心科学问题(Hu, et al, 2022; 黄刚等, 2024; Alizadeh, 2024)。

继经典的三大涛动之后,中外大气科学领域又相继发现和提出了一些重要的涛动现象。例如,陈烈庭等(1984)发现在北半球与 SO 对称的纬度带上也有类似的涛动现象,即北太平洋东部和西南部的气压呈反位相的变化,并称其为北方涛动。

Thompson 等(1998)和 Gong 等(2003)将北半球中高纬度地区海平面气压的最主导模态定义为北极涛动,刻画中高纬度与极地之间大气质量和气压异常的反位相变化。AO 在对流层表现为相当正压结构,它的形成和维持与波流相互作用有着密切的联系(Limpasuvan, et al, 1999, 2000)。AO 可以显著地影响全球的天气气候异常(陈尚锋等, 2016; He, et al, 2017; 王林等, 2021),例如欧亚大陆中高纬地区的降水和气温(Thompson, et al, 1998, 2000)、东亚冬季风强度(Gong, et al, 2001; Wu, et al, 2002)及寒潮活动(Wei, 2009; Wen, et al, 2009)、东亚夏季风降水及环流(Gong, et al, 2003, 2011)、南海夏季风的爆发(Hu P, et al, 2021; Chen, et al, 2022)、中国北方春季沙尘暴(Gong, et al, 2006; Liu, et al, 2007)、西北太平洋热带气旋活动(Choi, et al, 2012; Cao X, et al, 2015)、ENSO(Chen S F, et al, 2014, 2015)和热带印度洋偶极子(Cheng, et al, 2023, 2024)的发生发展等。地理位置上与 AO 相对应的是南极涛动,它是南半球热带外大气环流异常的主导模态,在垂直方向上表现为相当正压结构,在水平方向上表现为南半球中高纬度与极地之间大气质量的跷跷板式变化(Gong, et al, 1998, 1999)。除了对南半球的直接影响之外,南极涛动还可以通过半球间大气质量的经向交换、大气遥相关、海洋耦合桥等过程调控北半球的天气气候异常(Nan, et al, 2003; Yue, et al, 2008; Wu Z W, et al, 2009)。此外, Guan 等(2001)将南北半球之间大气质量的反位相变化定义为南北涛动,描述的是大气质量在两个半球之间的重新分配。Zhao 等(2007)提出了亚洲-太平洋涛动的概念,刻画了亚洲和北太平洋对流层高层温度的反位相变化。孙建奇等(2008)定义了阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关,反映了对流层低层的南亚夏季风低压与北太平洋高压的反位相变化。除了这些涛动型的遥相关之外,波列型的遥相关也非常重要。

2.2 东亚-太平洋型遥相关(EAP)

EAP 型遥相关又称为太平洋-日本型遥相关(Pacific-Japan pattern),是指东亚和西北太平洋地区热带(15°—25°N)和中纬度(30°—40°N)的夏季降水和低层环流呈反位相变化的南北偶极子型模态(Huang, et al, 1987, 1992; Nitta, 1987)。当南海

表1 与亚洲夏季风密切联系的遥相关型

遥相关型	主要特征	参考文献
北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)	海平面上, 阿留申低压和夏威夷高压之间的反位相变化; 南北偶极子型	Walker, 1924
北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)	海平面上, 冰岛低压和亚速尔高压之间的反位相变化; 南北偶极子型	Walker, 1924
南方涛动(Southern Oscillation, SO)	海平面上, 热带东太平洋与西太平洋-印度洋地区气压的反位相变化; 东西偶极子型; 通过海气相互作用与海洋中的厄尔尼诺现象相耦合	Walker, 1924; Bjerknes, 1969
西太平洋型(West Pacific pattern, WP)	500 hPa上, 北太平洋中高纬度与副热带地区位势高度的反位相变化; 也有研究认为它是北太平洋涛动在对流层中层的体现; 南北偶极子型	Wallace, et al, 1981
北方涛动(Northern Oscillation, NO)	海平面上, 北太平洋东部与西南部地区气压的反位相变化; 东西偶极子型	陈烈庭等, 1984
东亚-太平洋型(East Asia-Pacific patten, EAP) (又名太平洋-日本型Pacific-Japan pattern)	热带地区(西北太平洋)和副热带地区(长江中下游-日本)的夏季降水和低层环流的反位相变化; 南北偶极子型	Huang, et al, 1987; Nitta, 1987
北极涛动(Arctic Oscillation) (又名北半球环状模Northern Hemisphere Annular Mode)	北极地区和中纬度地区气压的反位相变化, 是北半球中高纬地区大气环流年际变率的第一主导模态; 南北偶极子型	Thompson, et al, 1998; Gong, et al, 2003
南极涛动(Antarctic Oscillation, AO) (又名南半球环状模Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)	南极地区和中纬度地区气压的反位相变化, 是南半球中高纬地区大气环流年际变率的第一主导模态; 南北偶极子型	Gong, et al, 1999
西北太平洋-北美型(Western North Pacific-North America pattern)	西北太平洋夏季风活动异常, 激发沿大圆路径传播的罗斯贝波列, 经北太平洋, 到达北美; 它的热带和中纬度部分的异常类似于EAP型遥相关; 波列型	李崇银等, 1999; Wang, et al, 2001
南北涛动(Interhemispheric oscillation)	南北两半球之间质量的重新分布	Guan, et al, 2001
太平洋-东亚型(Pacific-East Asia pattern, PEA)	冬季的厄尔尼诺引起西北太平洋异常反气旋, 引起东亚冬季风偏弱、次年的东亚夏季风偏强; 冬季的拉尼娜事件情况相反	Wang, et al, 2000; Chen, et al, 2013
丝绸之路型(Silk Road pattern, SRP)	沿副热带西风急流传播的罗斯贝波列, 起源于地中海和里海区域, 包括欧洲中部、西亚、中亚等活动中心; 它是夏季欧亚大陆对流层经向风的第一主导模态, 也有研究认为它是绕球遥相关的局地体现; 波列型	Lu, et al, 2002; Wu, 2002
东京-芝加哥快车(Tokyo-Chicago Express, TCE)	日本附近的降水异常激发的罗斯贝波列, 经过北太平洋和加拿大西部等, 到达美国中西部; 波列型	Lau, et al, 2004
上海-堪萨斯快车(Shanghai-Kansas Express, SKE)	印度-太平洋季风区的热源激发的罗斯贝波列, 始自副热带西北太平洋, 经北太平洋, 到达北美; 波列型	Lau, et al, 2004
绕球遥相关型(Circumglobal teleconnection, CGT)	沿副热带西风急流传播的环绕地球一周的遥相关型, 包括大西洋东北部、欧洲西部、亚洲中西部、东亚、阿拉斯加湾、北美北部等活动中心; 它也是北半球对流层高层位势高度异常的主导模态之一; 波列型	Ding, 2005
亚洲-太平洋涛动(Asian-Pacific Oscillation, APO)	亚洲和北太平洋对流层高层温度的反位相变化; 东西偶极子型	Zhao, et al, 2007
阿拉伯半岛-北太平洋涛动(Arabian Peninsula-North Pacific Oscillation, APNPO)	海平面上, 北太平洋高压和南亚夏季风低压之间的反位相变化; 东西偶极子型	(孙建奇等, 2008)
亚印太遥相关型(Indian-Asian-Pacific pattern, IAP)	从热带印度洋(包括孟加拉湾、苏门答腊及南海南端等)、菲律宾海、日本及其以东的西北太平洋、鄂霍次克海-堪察加半岛、到北美的遥相关型; 波列型	李建平等, 2011
欧洲-中国型(Europe-China pattern, ECP)	沿副热带西风急流传播的罗斯贝波列, 起源于北大西洋, 包括欧洲西部、欧洲东部等活动中心; 它是夏季欧亚大陆对流层经向风的第二主导模态; 波列型	(Chen, et al, 2012)
印太对流涛动(Indo-Pacific Convection Oscillation, IPCO)	北印度洋和西北太平洋地区对流反位相变化; 东西偶极子	Li J P, et al, 2013
海洋性大陆-太平洋对流涛动(Maritime Continent-Pacific Convection Oscillation, MPCO)	海洋性大陆-太平洋对流反位相变化; 东西偶极子型	Li J P, et al, 2013
亚洲-北美型(Asian-North America pattern, ANA)	东亚副热带地区的降水异常激发出罗斯贝波列, 沿西风急流传到北美地区; 波列型	Zhu, et al, 2016
大西洋-欧亚遥相关型(North Atlantic-Eurasian teleconnection, AEA)	500 hPa上沿副热带北大西洋、东北大西洋、东欧、喀拉海-北西伯利亚、华北等活动中心; 波列型	李建平等, 2013b; Li, et al, 2018a
南-北太平洋遥相关型(South-North Pacific teleconnection pattern, SNP)	200 hPa上南太平洋、热带中西太平洋到北半球副热带太平洋遥相关型; 波列型	Liu T, et al, 2018
孟加拉湾-东亚-太平洋型(Bay of Bengal-East Asia-Pacific pattern)	由孟加拉湾地区的潜热所激发的罗斯贝波列, 经过华北, 到达西太平洋; 波列型	Yang, et al, 2019
英国-贝加尔湖走廊型(British-Baikals Corridor, BBC)	年际时间尺度上沿夏季欧亚大陆地区极锋急流传播的第一主导模态, 包括英国、波罗的海、西伯利亚西部、贝加尔湖等活动中心; 波列型	Xu, et al, 2019b
英国-鄂霍茨克海型(British-Okhotsk Corridor, BOC)	年际时间尺度上沿夏季欧亚大陆地区极锋急流传播的第二主导模态, 包括北海、乌拉尔山、中西伯利亚高原、鄂霍茨克海地区等活动中心; 波列型	Xu, et al, 2022

和菲律宾海的对流活动旺盛、低层出现气旋式环流异常时,长江中下游到日本一带的梅雨降水常常偏少、出现反气旋式环流异常;反之亦然(Xie, et al, 2016; Hu, et al, 2024)。李建平(2011)提出亚印太遥相关型(IAP), EAP 是 IAP 的一部分。此外,有学者也将高纬度地区(60°N 附近)的环流异常视为是 EAP 型遥相关的一部分,并认为其呈经向三极子型的空间结构(吴捷等, 2013; Huang, 2004; Sun, et al, 2024)。EAP 型遥相关是东亚和西北太平洋地区夏季低层环流的主导模态(Kosaka, et al, 2010; Xie, et al, 2016; Sun, et al, 2024), 对于周边地区的天气气候异常有显著的调制作用, 包括平均降水和极端降水(Ding, et al, 2021; Xie, et al, 2016), 热带气旋的生成和移动路径(Ko, et al, 2016; Li R C Y, et al, 2018), 地表温度和高温热浪(Noh, et al, 2021; Xie, et al, 2016), 水稻等农作物的产量等(Kubota, et al, 2016; Xie, et al, 2016)。此外, 研究(Kosaka, et al, 2013; Srinivas, et al, 2018; Hu, et al, 2024)认为 EAP 遥相关的气候影响不仅局限于东亚和西北太平洋, 还可以向西影响到印度夏季风及周边地区。

自 Huang (2004) 提出 EAP 指数以来, 相继有许多研究从不同的角度提出指数来刻画 EAP 型遥相关。仿照 Wallace 等(1981)的经典工作, 一些学者用某些关键区域的位势高度(或地表气压)差定义 EAP 型遥相关(Huang, 2004; Wakabayashi, et al, 2004; Kubota, et al, 2016; Ling, et al, 2022)。考虑到 EAP 型遥相关主要表现在对流层低层, 也有研究采用了相对涡度或纬向风切变来刻画(吴捷等, 2013; Takemura, et al, 2020, 2023)。因为 EAP 型遥相关是东亚-太平洋地区夏季环流的主导模态, 在经验正交函数分解及对应的主分量上也有很好的反映(Kosaka, et al, 2010; Xie, et al, 2016; Sun, et al, 2024)。最近, Hu 等(2024)总结了目前已知的 9 种不同的 EAP 指数, 并对比了对应的环流和降水异常以及年际变化特征。虽然这些 EAP 指数都能很好地刻画热带和中纬度地区降水异常的南北偶极子结构, 且相关系数都通过了置信度 99% 的检验, 但在某些年份(例如 2005—2010 年期间)存在较大的差异(Hu, et al, 2024)。最近的这些差异, 可能与 EAP 型遥相关在空间结构上的年代际变化有

关(Xu, et al, 2019a; Li X Y, et al, 2020; Sun, et al, 2024)。

自发现 EAP 型遥相关的近 40 年中, 学者们共提出了 5 种可能的观点来解释它的形成和维持机制(Xie, et al, 2016; Xu, et al, 2019a; Hu, et al, 2024)。最早发现 EAP 型遥相关的时候, 认为是热带西北太平洋对流活动激发出来的向极传播的罗斯贝波列; 这一观点也被罗斯贝波射线和数值模拟的结果证实(Huang, et al, 1987, 1992; Nitta, 1987)。随后, 有研究发现 EAP 型遥相关可以有效地从夏季基本气流中获取正压能量和斜压能量, 因此又可以被视为是基本气流上的一种大气内部动力模态(Lau, et al, 1992; Kosaka, et al, 2006, 2010)。例如, 西北太平洋位于西南季风和东北信风的辐合交汇区, 这非常有利于 EAP 型遥相关的热带波动从基本气流中获取动能(Hu, et al, 2019); 因此基本气流在夏季内的演变也会引起 EAP 型遥相关位置的季节变化(Lu, 2004; Tang H S, et al, 2022)。此外, 中纬度地区的梅雨降水异常对于 EAP 型遥相关的维持也有重要的反馈作用(Lu, et al, 2009; Xu, et al, 2019a)。模式的敏感性试验表明, 如果没有梅雨降水的反馈作用, EAP 遥相关在日本附近的环流异常将会明显减弱(Lu, et al, 2009; Hu, et al, 2024)。还有研究(Kawamura, et al, 2006; Ling, et al, 2022)认为, 西北太平洋地区的热带气旋活动也可以激发和增强 EAP 型遥相关。事实上, EAP 型遥相关与热带天气尺度波及热带气旋活动之间存在着密切的联系(Li R C Y, et al, 2018; Ling, et al, 2022)。最新的研究(Takemura, et al, 2020, 2022)指出, 副热带西风急流出口区的罗斯贝波破碎可能会引起高位涡的向南入侵, 从而激发出 EAP 型遥相关。这种观点也进一步验证了 EAP 型遥相关与丝绸之路型遥相关的密切联系(Gong, et al, 2018; Takemura, et al, 2023; Liu, et al, 2024)。

2.3 沿夏季急流传播的遥相关

沿亚洲夏季急流传播的遥相关的早期研究源自亚洲夏季风降水的研究。亚洲夏季风包括印度季风和东亚季风 2 个相互独立的季风子系统, 它们的驱动因子完全不同(陈隆勋等, 1991; Ding Q H, et al, 2007; Chen, et al, 2023)。然而, 这两个季风子系统又表现出密切的联系, 例如当印度降水偏多

时,华北降水常常也偏多,而长江中下游到日本一带的降水则偏少(郭其蕴等, 1988; Wu R G, 2002, 2017)。印度季风和东亚季风之间的这种联系,一方面与低纬的水汽输送有关,另一方面还与沿副热带西风急流传播的波动有关。Lu等(2002)基于点相关等方法,首先识别出了对流层高层的这支波动;随后 Enomoto等(2003)将它命名为丝绸之路型遥相关(Silk Road pattern, SRP)。SRP表现为副热带西风急流区域对流层高层经向风的最主导模态(EOF1),起源于地中海和里海区域,包括欧洲中部、西亚、中亚等活动中心(Kosaka, et al, 2009; Chen, et al, 2012; 王林等, 2024)。有研究认为SRP是绕球遥相关(Circumglobal teleconnection, CGT)在欧亚大陆上的局地体现,后者是 Ding Q H等(2005)提出的沿副热带西风急流传播的环绕地球一周的遥相关型。SRP和CGT与亚洲夏季风变率有密切的联系,例如印度夏季风降水可以激发出SRP或CGT型的波列,引起南亚高压的位置移动,从而通过异常涡度平流和温度平流等影响垂直运动和中国东部的降水异常(Wei, et al, 2014, 2015; Wu, 2017)。而当CGT绕球一周并再次传播到印度附近时,可能会影响风垂直切变和引起不稳定,从而再次增强印度降水的异常(Ding Q H, et al, 2005, 2007)。最近的一些研究(Ding Q H, et al, 2005, 2007; Wei W, et al, 2015, 2019; Zhou F L, et al, 2020)还指出,东亚夏季风降水的异常也可以影响南亚高压的位置移动和CGT遥相关,从而反馈给印度夏季风。需要指出的是,相比于广泛研究过的SRP,副热带西风急流上经向风的第二主导模态(EOF2)的研究还相对较少。它起源于北大西洋,包括欧洲西部、欧洲东部等活动中心,Chen等(2012)将其命名为欧洲-中国型遥相关。

亚洲夏季急流除了副热带急流之外还包括极锋急流,后者同样可以作为波导效应来引导准定常罗斯贝波列的传播(Hoskins, et al, 1993; Xu, et al, 2022; 王林等, 2024)。极锋急流附近对流层高层经向风的EOF分析,揭示出了两个主导的遥相关模态:英国-贝加尔湖走廊型(British-Baikal Corridor, BBC)和英国-鄂霍茨克海走廊型(British-Okhotsk Corridor, BOC)。其中,BBC遥相关呈相当正压结构,包括英国、波罗的海、西伯利亚西部、贝加尔湖

等活动中心。除了欧亚大陆中高纬度地区外,该型遥相关也能显著地影响长江流域-日本-韩国一带的梅雨降水异常,例如2020年的“超级梅雨”事件(Xu, et al, 2019b; Park, et al, 2021; 王林等, 2024)。关于BBC遥相关形成和维持的机制主要有3种观点,包括准定常罗斯贝波的传播、基本气流提供的正压和斜压能量、天气尺度扰动的非线性反馈等(Xu, et al, 2019b; Li X Y, et al, 2020; 王林等, 2024)。另一方面,BOC型遥相关也呈相当正压结构,包括北海、乌拉尔山、中西伯利亚高原、鄂霍茨克海地区等活动中心。研究指出BOC型与SRP型遥相关耦合在一起,从而在欧亚大陆上呈现出双波列的结构特征,此时BOC的影响范围会从高纬度地区扩展到中纬度和副热带地区(Xu, et al, 2022; 王林等, 2024)。最后需要指出的是,虽然本节主要回顾的是夏季时期的遥相关,但其他季节的亚洲西风急流同样可以作为波导,包括冬季(Branstator, 2002; Hu, et al, 2018)、春季(Chen S F, et al, 2020; Hu, et al, 2023)、秋季(Zhou, et al, 2019; Hu, et al, 2020)。由于西风急流的位置有季节变化,沿急流传播的遥相关型的空间位置也会有季节差异(Chowdary, et al, 2019; 王林等, 2024)。

通过对大气环流遥相关现象的深入回顾可以看到,中国学者在这一领域取得了令人瞩目的成就。从经典的大气涛动现象,如北大西洋涛动、北太平洋涛动和南方涛动,到与亚洲夏季风密切相关的东亚-太平洋型遥相关、丝绸之路型遥相关等,再到沿夏季急流传播的多种遥相关型,不仅揭示了这些遥相关现象的基本特征和形成机制,还探讨了它们对全球天气气候变化的重要影响。这些研究成果不仅丰富了大气环流遥相关的理论体系,也为全球天气气候预测提供了重要的科学依据和技术支持。

3 季风环流

季风研究是一个深入且广泛的领域,中国学者在这一主题上取得了众多显著成就。从竺可桢先生率先指出季风系统由海陆热力差异所形成(竺可桢, 1934),到后续科学家们对亚洲大气环流、季风结构、季节突变的深入探索,再到近年来在青藏高原对季风系统影响方面的重要突破,中国科学家在季风研究领域持续发力,贡献了大量具有国际影响

力的学术成果(陈隆勋等, 1999; Wu, et al, 1998, 2007, 2015; An, et al, 2000; 曾庆存等, 2002; 符淙斌等, 2005; 李建平, 2005; 吴国雄等, 2018)。这些成就已经在众多文献中得到了详尽的阐述和回顾, 彰显了中国在季风研究领域的领先地位(曾庆存等, 2003; 陈隆勋等, 2006; 黄建平, 2019)。文中重点从季风环流的定义, 季风年际变率的海气相互作用机理, 季风的年代际变化机理, 季风历史变化的检测归因, 季风的未来预估等方面进行回顾。

3.1 季风指数的定义

现在知道, 东亚夏季风系统具有复杂的环流结构, 包括中低层的副热带高压和中高层的副热带西风急流等。但在 1950 年前, 由于中国探空资料的缺乏, 当时人们往往以干湿、冷暖气团的相互作用来描述东亚季风, 无法说明东亚季风环流的特殊性, 特别是其与印度夏季风的区别(涂长望等, 1944; 高由禧, 1948; 陶诗言, 1948)。陶诗言等(1957)基于中华人民共和国成立后建设的第一批探空站 5 a 的观测数据, 开创性地揭示了东亚季风环流的水平和垂直分布, 揭示了中纬度西风、副热带和热带东风的结构, 春夏环流之间的季节性跃变, 以及雨带位置与西风带位置和强度的关系。随着观测资料的日渐丰富, 对东亚季风环流形成机制的认识也不断深入, 郭其蕴(1983)基于 10° — 50° N 范围内 110° E 与 160° E 海平面气压差, 首次定义了一个东亚夏季风的强度指数。之后随着研究的深入, 中国学者定义了不同环流指数刻画东亚夏季风的不同侧面。这些指数分别描述了东西热力对比、南北热力对比、纬向风的切变涡度、西南季风气流和南海夏季风等(Wang, et al, 2008b)。其中 Li 等(2002)基于低层风场的季节循环定义的环流指数适用于包括东亚季风在内的全球大部分季风区, 该指数与 Wang 等(1999)的纬向风切变指数、戴念军等(2000)的南海季风指数、何金海等(2001)的南北热力对比指数等, 均能很好地表征东亚季风三维环流系统年际变率的主导模态(Wang, et al, 2008b)。近十年, 仍不断有新的东亚夏季风指数被定义以反映季风在对流层高层和边缘区的特征(Zhao, et al, 2015; 晏红明等, 2017; Fang, et al, 2024), 体现了东亚夏季风环流的复杂性。

东亚冬季风环流表现为低层的西伯利亚高压

和阿留申低压系统, 中层的深厚东亚大槽, 以及高层的副热带西风急流, 反映了强烈的南北和东西温度梯度。基于中国不断增多的探空数据, 在 20 世纪 60 年代初人们已经对东亚冬季风环流的基本特征有了较为清晰地认识(徐淑英等, 1962)。郭其蕴(1994)首次基于东西向的海平面气压梯度和西伯利亚高压强度定义了东亚冬季风指数。随着研究工作的深入, 人们定义了更多的东亚冬季风指数, 主要包括以下几类: 海陆差异类、高压特征类、大槽特征类、低层风场类、中高层风场类以及综合类(敖康顺等, 2024)。同一类指数所反映的东亚冬季风变率较为一致性, 但不同类指数在揭示冬季风变率方面存在差异。此外, Wang 等(2010)利用东亚温度的前两个主导模态来间接表征东亚冬季风的强弱; 还有研究利用 300 K 的等熵面位涡来定义东亚冬季风指数(Huang, et al, 2016), 这些指数均能够较好地反映冬季风与西伯利亚高压、北极涛动和厄尔尼诺的密切联系。

3.2 季风年际变率的海气相互作用机理

东亚夏季风的年际变率与海气相互作用密切相关。早在 1980 年代, 符淙斌等(1988)利用有限的观测资料发现, 长江中下游常在厄尔尼诺次年发生洪涝灾害。典型的厄尔尼诺事件在北半球冬季达到盛期, 随后迅速衰减, 至次年夏季, 中东太平洋海温暖异常几乎消失, 甚至转为冷异常。然而, 东亚夏季风对厄尔尼诺存在显著的滞后响应(Shen, et al, 1995), 是理解其年际变率的关键问题。

Zhang 等(1996)指出, 厄尔尼诺通过在热带西北太平洋形成的对流层低层异常反气旋影响东亚气候。该反气旋能够从厄尔尼诺盛期冬季持续到衰减年的夏季, 从而延长了厄尔尼诺对东亚气候的影响(Wang, et al, 2003)。Chang 等(2000)进一步指出, 西北太平洋异常反气旋通过增加水汽输送、增强经向气压梯度和减缓天气尺度扰动东传等机制, 增强梅雨锋降水并延长雨带维持时间。

过去二十余年, 西北太平洋异常反气旋的形成和维持机制一直是热带海气相互作用调制东亚夏季风的核心问题。由于西北太平洋海洋季风气候的特点, 该区域的气候态风场在北半球冬春季和夏季存在显著的反向特征, 因此研究通常分别针对这两个时段讨论反气旋的维持机制(Li, et al, 2017)。

在冬春季, Wang 等(2000)提出, 气候态东北信风背景下, 反气旋东南侧的东北风异常增加风速, 增强海表蒸发, 使海温下降; 冷海温异常通过抑制局地对流维持反气旋, 这一机制被称为“风-蒸发-SST”反馈机制。Wu 等(2017)提出, 厄尔尼诺引发的气旋性环流异常的西侧东北风异常, 将热带外的干空气输送至西北太平洋, 从而抑制当地活跃的对流活动, 维持反气旋, 这一机制为湿遥相关机制, 不依赖局地海气相互作用。Stuecker 等(2015)则从多尺度相互作用的角度提出, 厄尔尼诺的低频周期与气候态年循环的相互作用产生了大约 0.8 和 1.2 a 周期的“混合模态(Combination Mode)”, 该机制有助于西北太平洋异常反气旋的形成和维持。

在北半球夏季, 西北太平洋异常反气旋的维持主要依赖于热带印度洋洋盆一致的暖海温异常(Li S L, et al, 2008; Yang, et al, 2008; Wu B, et al, 2009; Xie, et al, 2009)。该洋盆模态在厄尔尼诺冬季形成, 并持续到次年夏季, 其作用类似“电容器”, 延长了厄尔尼诺对东亚气候的影响(Xie, et al, 2009)。热带印度洋暖海温异常通过增强局地对流, 激发赤道大气开尔文波, 影响西北太平洋。赤道大气开尔文波一方面通过埃克曼抽吸作用导致西北太平洋边界层水汽辐散(Wu B, et al, 2009), 另一方面将西北太平洋季风区东部副热带高压控制区的干空气输送至西北太平洋(Wang, et al, 2022)。这两方面共同作用, 减弱了西北太平洋对流, 维持了反气旋。除了印度洋洋盆模态, 从前春残留下来的 SST 冷异常在完全消失之前, 对夏季西北太平洋反气旋维持有显著贡献, 特别是在初夏时段(Wu B, et al, 2010)。热带三大洋的相互作用也与夏季西北太平洋反气旋的维持有关(Lu, et al, 2024; Wang, 2018)。例如, 同期大西洋海温异常能通过直间和间接作用影响西北太平洋异常反气旋(Rong, et al, 2010; Yu, et al, 2016)。

3.3 季风的年代际变化机理

年代际变化一般是指时间尺度为十年以上、十几至几十年的气候变化。随着观测记录的积累以及资料种类的增加, 自 1990 年代开始, 东亚季风年代际变化开始得到广泛关注。世界气候研究计划“气候变率及其可预测性计划”(Climate and Ocean-Variability, Predictability, and Change, CLIVAR)

也在同时期将年代际气候变化作为其重要研究内容之一。自 1970 年代末至 20 世纪末期, 东亚夏季风环流显著减弱, 具体表现为海平面气压升高、低层西南风减弱、中层副热带高压增强、高层急流轴以南西风减弱等特征(Hu, 1997; Wang, 2001; 郭其蕴等, 2003; Ding, et al, 2004; 黄荣辉等, 2006; Zhou, et al, 2009)。相应的, 中国东部夏季降水呈现“南涝北旱”的空间分布, 即长江流域降水增多、华北地区降水减少(Yatagai, et al, 1994; Nitta, et al, 1996; 黄荣辉等, 1999; 陆日宇, 1999; Yu, et al, 2004)。1990 年代中后期以来, 东亚夏季风开始恢复增强, 雨带开始北移至长江以北地区(Kwon, et al, 2007; Si, et al, 2012, 2013; 丁一汇等, 2013; 黄荣辉等, 2013)。

20 世纪末及 21 世纪初期, 中外研究主要关注海洋与陆面过程对东亚夏季风年代际变化的影响。太平洋年代际振荡(PDO)和北大西洋多年代际振荡(AMO)是影响东亚夏季风年代际变化主要的气候系统年代际内部变率因子。与 PDO 正位相有关的赤道中东太平洋年代际增暖, 会通过影响西太平洋副热带高压(简称西太副高)和沃克环流, 导致东亚夏季风减弱, 使得中国江淮流域夏季降水增多、而华北降水同期减少(Yang, et al, 2004; 杨修群等, 2005; 黄荣辉等, 2006; Zeng, et al, 2007; Zhou, et al, 2008a, 2013)。AMO 能够激发环流遥相关波列, 影响西太平洋海气相互作用及对流层温度变化, 其正位相期间有利于东亚夏季风增强(Lu, et al, 2006; Wang, et al, 2009; Si, et al, 2016)。

除海温变化以外, 青藏高原热力异常(宁亮等, 2006; Wang, et al, 2008a; Zhao, et al, 2008)、青藏高原积雪(Zhang, et al, 2004; 朱玉祥等, 2007; Ding, et al, 2009; Si, et al, 2013)、欧亚大陆高纬度积雪(赵溱, 1984; 陶诗言等, 1988; Zhang, et al, 2008)、地表温差(黄荣辉等, 2006; 周连童等, 2006)等变化也能够的年代际尺度上影响东亚季风环流和降水。

随着气候模式的发展, 越来越多研究开始关注温室气体和人为气溶胶排放等人类活动的气候效应。但早期研究受气候模式分辨率和性能限制, 基于不同模式得到的结果差异较大, 针对同一个因子对东亚夏季风的影响往往得出不同甚至相反的结

论(Li L J, et al, 2007; Li H M, et al, 2010b; Zhu, et al, 2012; Wang B, et al, 2013; Zhou, et al, 2013)。国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)的开展,通过多模式的结果比较,为全球气候变化的模拟和研究提供了重要的数据支撑。其中,第五和第六次国际耦合模式比较计划(CMIP5、CMIP6)均提供了温室气体和气溶胶的分离强迫试验,用于考察不同外强迫单独作用或者组合强迫影响下的气候响应(Taylor, et al, 2012; Gillett, et al, 2016; 钱诚等, 2019)。基于CMIP5多模式分离强迫试验结果, Song等(2014)比较了不同外强迫对东亚夏季风年代际变化的影响,指出人为气溶胶排放影响下海陆温差减弱,会引起东亚季风低层环流减弱,而温室气体排放则有利于低层环流的增强。

3.4 季风历史变化的检测归因

观测到的气候变化,包含自然的内部变率信号以及人类活动的影响。气候变化研究中的检测归因,特指从中寻找人类活动的影响。无论是全球季风还是区域季风,其历史变化都呈现出显著的年代际变化特征。例如全球季风在1901—1955年整体呈增强趋势,而随后到2001年整体呈减弱趋势;从短一些的时段来看,自1950年代以来减弱,随后自1980年代以来开始恢复增强(Lin, et al, 2014; Wang, et al, 2006; Zhang, et al, 2011; Zhou, et al, 2008a)。全球季风的历史变化同时受到气候系统内部年代际变率和外强迫的影响。一方面,由观测海温驱动的大气环流模式模拟试验能够再现20世纪后半叶全球季风的减弱趋势,表明海温年代际变化(主要是太平洋年代际振荡IPO和大西洋年代际振荡AMO)的重要作用(Zhou, et al, 2008b, 2016; Li, et al, 2010a; Wang, et al, 2020)。另一方面,利用多模式分离强迫历史气候模拟试验,基于最优指纹检测归因法的研究证实了人为外强迫、特别是人为气溶胶排放对于20世纪后半叶北半球季风(Polson, et al, 2014)和全球季风(周天军等, 2020)的减弱作用。人为气溶胶导致全球季风降水减弱的物理机制包括热力和动力两方面。在热力作用方面,人为气溶胶引起大气冷却和大气湿度降低,从而减少季风降水;在动力作用方面,人为气溶胶通过削弱海陆热力梯度,从而使得季风环流减弱

(周天军等, 2020)。由此可见,围绕全球季风的历史变化,气候学界的认知经历了从海气相互作用的角度强调海温年代际变率的作用,到关注人为外强迫的作用,再到从物理机制上理解二者不同作用的过程。

在区域尺度上,东亚季风的时空变化尤为复杂,雨带具有突出的年代际变化特征。自1950年以来,东亚夏季风的年代际变化包括3个阶段:自1970年代中期开始减弱,中国夏季降水在江淮流域增多而华北减少;1992年之后逐渐恢复,中国华南夏季降水增多;1999年之后中国长江中下游夏季降水减少而淮河流域夏季降水增多(陈隆勋等, 1991; 王绍武等, 2002; 郭其蕴等, 2004; Yu, et al, 2004, 2007; 宇如聪等, 2008; Wu R G, et al, 2010; 王会军等, 2013; Zhang, et al, 2015)。

最受关注的是1970年代中期以来东亚夏季风的减弱趋势,季风的年代际减弱造成了中国东部“南涝北旱”型降水异常,严重地影响到水资源的分布,是我国启动“南水北调”工程的重要原因。围绕东亚夏季风变化的检测归因和机理,由观测海温驱动的大气模式数值试验和工业革命前气候控制试验均能再现年代际尺度的“南涝北旱”型降水异常,表明气候系统内部变率、尤其是热带海温的年代际变化具有重要作用(马柱国等, 2006; Zhou, et al, 2008a; Li, et al, 2010b; Lei, et al, 2014)。

与此同时,由不同外强迫因子驱动的历史气候模拟试验表明人为温室气体和气溶胶对东亚季风变化的不同贡献(Zhu, et al, 2012; Jiang, et al, 2013; Song, et al, 2014; Zhang, et al, 2017; Tian, et al, 2018)。其中温室气体强迫通过引起大气湿度增加而有利于东亚季风区南部降水增加,而人为气溶胶强迫通过削弱东亚夏季风环流主导北部的变干趋势(Song, et al, 2014; Tian, et al, 2018)。因此,过去几十年来东亚夏季风的减弱趋势是由内部变率和人为强迫共同导致,然而要从几十年的观测变化中定量区分其相对贡献仍具有很大挑战。

为了更深入地理解不同内部变率及自然和人为外强迫对季风变化的相对贡献,在CMIP6架构下,中国学者联合英国、美国学者,发起了全球季风模式比较计划(GMMIP)(Zhou, et al, 2016; 周天军等, 2019)。结合CMIP6多模式分离强迫试验和

GMMIP 海温起搏器试验, Zhang 等(2023)进一步考察了不同内部变率 and 外强迫对与东亚季风环流相关的表面温度梯度的影响, 并强调了太平洋年代际振荡(IPO)、大西洋年代际振荡(AMO)及人为气溶胶、温室气体强迫的综合影响。这些研究不仅加深了对东亚季风年代际变化机理的理解, 也为未来季风变化的预测和应对提供了科学依据。

3.5 季风的未来预估

气候模式是开展气候预估不可或缺的工具。尽管在 1975 年第一个能够模拟 CO_2 加倍影响的三维气候模式就已经出现(Manabe, et al, 1975; 见周天军等(2022)的综述), 但由于海洋的巨大热惯性和海气相互作用对区域气候的重要作用, 需要海洋-大气完全耦合的气候系统模式才能做出可信的气候预估。在 1990 年代初, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第一次评估报告及其补充报告发布时(Gates, et al, 1990, 1992), 全球仅有 4 个海气耦合模式, 分别来自美国国家大气研究中心、美国地球流体动力学实验室、德国马普气象研究所和英国气象局, 且分辨率仅有 $3-5^\circ$ 并在海气耦合中采用“通量调整”方案以保证长期积分的稳定性(见周天军等(2014)的综述)。这一时期由于气候模式数量少、性能有待提高, 尚难以对区域气候如东亚季风区做出可靠的预估。到了 IPCC 第三次评估报告时, 基于构建的排放情景, 多模式预估结果显示东亚大部分地区在未来进一步增暖下降水增多, 但气溶胶起相反作用, 同时模式间的不确定性很大(Cubasch, et al, 2001)。IPCC 第四次评估报告设置了专门的区域气候预估章节, 其中东亚季风区是关注点之一(Christensen, et al, 2007), 所用的绝大多数气候模式已不再使用通量订正技术, 模式分辨率和参数化都有了很大改进(见周天军等(2014)的综述)。预估结果显示东亚夏季风平均和极端降水将随全球变暖而增加(Gao, et al, 2002; Hu, et al, 2003; Min, et al, 2004), 而东亚冬季风则将随全球变暖而减弱(Hu, et al, 2000; Kimoto, 2005; Hori, et al, 2006)。

随着耦合模式比较计划的发展, 参与的模式数量越来越多, 物理过程也越来越完善, 到了 IPCC 第五次和第六次评估报告, 有愈来愈多的证据显示, 随着全球变暖东亚夏季风环流和降水都将增强

(Christensen, et al, 2013; He, et al, 2019a), 而东亚冬季风则将减弱(Jiang, et al, 2013)。东亚夏季风环流的增强主要是快响应过程下海陆热力对比增强和青藏高原上空潜热加热增强的结果(Li, et al, 2022)。

需要注意的是多模式预估的东亚季风, 特别是包括副热带高压在内的季风环流的变化, 目前依然存在不确定性(He, et al, 2015a, 2015b; Fu, et al, 2020; Zhou S J, et al, 2020)。为了减小预估不确定性, 可通过评估模式性能给予不同模式不同权重进行加权预估(Zhu, et al, 2023)。除普通模式加权外, 近年来称为“涌现约束”(Emergent Constraint)的方法, 被越来越广泛地用于减小未来预估的不确定性。该方法通过建立模式模拟的历史气候和未来预估变化之间的关系, 借助较为准确的历史气候的观测数据来给出更加可信的预估结果(Hall, et al, 2019; Brient, 2020)。例如, 针对西北太平洋副热带高压预估的不确定性, Chen X L 等(2020)确定了赤道太平洋冷舌偏差和大洋东岸层云偏差两大不确定性来源, 通过“涌现约束”显著减小了预估不确定性, 预估的西太副高在未来将显著增强。借助观测的南北半球升温速率的差异, “涌现约束”显著减小了亚非夏季风降水的不确定性, 在东亚区域降水增加比原始预估减少了约 30%(Chen, et al, 2022)。

此外, 对于东亚冬季风, 研究发现与西边界流强度有关的北太平洋海温能够影响全球每增暖 1 K 下东亚冬季温度增加速率, 通过涌现约束东亚冬季升温速率显著减缓(Liu, et al, 2024); 基于青藏高原南侧的南支西风急流和冬季东亚南部降水之间的关系, 经“涌现约束”后该区域降水预估的不确定性显著减小, 变干趋势更加显著(He, 2023)。

提升东亚季风预估可信度、减少不确定性的根本途径是提高气候模式的性能。包括涌现约束在内的各种统计方法, 只是基于当前模式性能来提供可靠气候预估的阶段性和方法。

4 气候系统动力学研究进展

20 世纪以来, 气候学的概念经历了深刻的变革。在 20 世纪 50 年代前, 气候通常被认为是一种统计意义上的平衡状态。然而, 随着研究的深入, 科学家们逐渐认识到, 气候并非静止不变, 而是充

满了变动和波动。这种变动所引发的异常现象往往会造成严重的社会和经济损失。例如,世界各地每年都有区域性旱灾或洪涝发生,而在中国,气候变动导致的灾害尤为显著。自 20 世纪 80 年代以来,随着人类活动引发的大气中温室气体浓度增加,全球气候变暖问题日益引起人们的关注。人们逐渐意识到,气候的变动和波动不仅源于大气内部的各种过程,还受到大气与其上边界和下边界之间各种物理和化学过程的制约。具体而言,气候是地球大气、海洋、冰雪、陆地等圈层之间相互作用的结果。为更好地描述和理解这些复杂的相互作用,科学界逐步发展了气候系统动力学学科领域。

中国学者在气候系统动力学的发展中做出了重要贡献。叶笃正提出的波动频散理论为气候系统中的遥相关过程奠定了基础,并被广泛应用于气候灾害的预测与解释。郭晓岚提出的中纬度正压波动耗散导致的动量辐合理论,成为大气三圈环流的基础理论之一。此外,竺可桢 (1934) 和 Tao 等 (1987) 等人提出了东亚季风系统的概念,进一步加深了对气候系统的理解。叶笃正等 (1979)、陶诗言 (1990)、黄荣辉 (1996) 和曾庆存等 (2003) 对中国学者在气候系统动力学领域的研究进展进行了回顾。过去二十年,中国学者在气候系统动力学领域取得了丰硕的成果,然而目前尚缺乏系统的总结。文中主要从大气动力学、海陆气相互作用和全球变暖动力学 3 方面进行简要回顾。

4.1 大气动力学

大气是气候系统的重要组成部分,大气动力学通过揭示大气中的能量输送和运动过程,解释了气候系统中不同尺度的现象。大气动力学的研究始于罗斯贝 (2020) 的长波理论,他提出大气的流场主要由 β 效应导致的罗斯贝波动叠加形成。这一理论奠定了大气动力学发展的基础。基于长波理论,叶笃正提出了大气波动频散理论 (Yeh, 1949),指出在西风带中,罗斯贝波的群速度可能大于其相速度。这意味着在中高纬度的西风带中,大气长波的能量可以在扰动本身抵达之前向下游传播,从而导致在上游扰动尚未到达时,下游地区已经出现新的扰动现象,这便是天气学中的“上游效应”。这一理论不仅在解释天气学中的扰动传播现象中占据重要地位,还在气候系统动力学中具有深远影响。在叶笃

正的罗斯贝波能量频散理论基础上, Hoskins 等 (1981) 研究了准静止罗斯贝波在球面上的二维频散特征,提出了波动群速度沿大圆传播的理论。这些理论成功解释了大气中的遥相关现象,即某地区大气环流的异常可能会引发其他地区大气环流的异常 (Wallace, et al, 1981)。随后,黄荣辉等人进一步发展了波动频散理论,研究了北半球夏季准定常行星波在球面上的三维传播特征 (Huang, et al, 1983),发现北半球夏季菲律宾附近的热源强迫形成的准定常行星波可以向东亚传播,进而形成东亚-太平洋型遥相关 (Huang, et al, 1987, 1992; 黄荣辉等, 1988)。目前,大气遥相关理论不仅被广泛用于解释短期气候变异的激发机制,还常用于短期气候异常的预测。充分体现了叶笃正的大气波动频散理论在天气和气候动力学中的重要地位。

大气三圈环流是气候系统能量和动量分布的关键机制。在气候系统动力学中,三圈环流通过热力和动力过程调控地球的气候系统。大气三圈环流是气候系统的重要组成部分。Jeffrey (1926) 发现,在中纬度对流层上层,大气扰动会形成扰动动量辐合,这种辐合作用维持了中纬度地表西风,并强迫出大气中的费雷尔环流圈 (Eady, 1950)。郭晓岚进一步发现,在正的涡度梯度背景下,正压扰动的耗散过程会在正压扰动区域形成扰动纬向动量辐合 (Kuo, 1951)。基于这一理论,学者们揭示了大气费雷尔环流圈形成的机制 (Held, 1975; Simmons, et al, 1978): 在中纬度地区,斜压不稳定会导致斜压扰动发展,扰动向上传播至对流层高层,形成大气扰动,并将纬向动量向下传递;在高层,大气扰动的耗散会导致纬向动量辐合,从而驱动费雷尔环流圈。Held (2019) 在对大气环流百年发展的回顾中,详细阐述了郭晓岚理论的重要贡献。大气环流中的能量传输和动量交换不仅影响日常天气形势,还对全球气候系统的长期变化产生重要作用。例如,随着气候变暖,极地放大效应可能会改变极地环流和费雷尔环流之间的相互作用,导致急流路径的改变,从而对中纬度气候模态和极端天气的频率与强度产生深远影响。

4.2 海陆气相互作用

在气候系统动力学中,海洋、陆地与大气之间的相互作用是理解气候系统整体运行的重要组成

部分。这些相互作用通过能量、动量和物质的交换,调节全球和区域气候模态,并在不同的时间和空间尺度上产生显著影响。海陆气相互作用不仅影响天气和季节性气候变化,还在长期气候变化和极端气候事件的形成中起到关键作用。

海洋与大气的相互作用通过耦合现象在不同时间尺度上影响气候系统的动态行为,最典型的海气耦合现象为热带中东太平洋的厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)。作为全球气候系统的关键区域之一,东亚季风区的气候对 ENSO 模态高度敏感(Wang, et al, 2001; Huang, et al, 2007; Chen J P, et al, 2014)。中国学者对于东亚季风系统的可预报性研究可以追溯到 20 世纪七八十年代。早期的研究者提出东亚季风对中国气候异常的重要作用(陈烈庭, 1977; 符淙斌等, 1988)。Fu 等(1988)进一步指出,中东太平洋海温异常(即 ENSO 现象)与西太副高的强度和西伸幅度之间存在显著的时间滞后关系。这一发现揭示了海气耦合过程如何通过影响季风系统的动力结构,调节中国中东部的气候变异。这一理论为东亚季风系统的预测提供了重要的科学基础,并显著提升了季风相关的气候预测能力(黄荣辉等, 2003; Wang T, et al, 2013)。

陆地的气候系统中扮演着重要的角色,其表面特性如植被覆盖、地形和土壤湿度等对大气的热力和动力过程产生直接影响。与海洋相比,陆地表面对于太阳辐射的吸收和反射更为敏感,因此其温度变化较快,导致大气温度和湿度的变化。土壤湿度是地表水循环过程中的一个关键变量,对陆-气的热量通量交换具有重要影响(Seneviratne, et al, 2010; Miralles, et al, 2019)。当土壤湿度降低时,局地蒸散减少,导致向上潜热通量减小,而感热通量增加,进而对大气起到加热作用。陈海山等(2013)研究了中国区域内极端高温事件对土壤湿度年际变化的响应,指出在土壤偏干状态下,极端高温指标均呈现显著增加趋势。大气被加热后,饱和水汽压升高,不利于水汽凝结成降水,有利于干旱的维持。此外,近地表气温的升高会进一步加剧蒸散,降低土壤湿度,从而形成高温与土壤干旱之间的正反馈过程(管晓丹等, 2018)。

海洋、陆地与大气之间复杂的相互作用通过正反馈和负反馈机制调节全球气候系统。例如,海洋

的热量吸收和释放、陆地植被变化对大气的水汽输送影响、以及大气环流对海表温度的调节等过程,共同塑造了全球气候模态。在气候系统动力学中,正反馈和负反馈机制对理解气候变化的放大或减弱效应至关重要。例如,在全球变暖的背景下,海洋温度的升高会导致冰川和极地冰盖的融化,冰盖的减少会降低地球的反射率,从而导致更多的太阳辐射被吸收,进一步加剧全球变暖,形成正反馈。而负反馈机制则可能表现为温度升高导致的云量增加,进而增强反射,降低地表温度升高的速率。

4.3 全球变暖动力学

在全球变暖动力学研究领域,复杂气候模型是重要的研究工具。早在 1975 年,美国地球物理流体动力实验室的真锅淑郎利用三维大气环流模式开展了二氧化碳浓度加倍情况下气候变化的研究(Manabe, et al, 1975),开创了利用数值实验方式研究全球变暖动力的先河。之后,随着计算机性能的提升,气候模型物理过程的表达越来越精确,分辨率也越来越精细。最明显的体现在参加历次政府间气候变化工作组报告的数值模式。在第一次评估报告中,气候模式的分辨率最高为 2.5° ,包含了简单的大气海洋耦合过程(IPCC, 1990);到了最近的第六次评估报告,气候模式的水平分辨高达约 14 km,包含了海气耦合、生物化学循环、海冰等过程(IPCC, 2021)。在这其中,中国科学家也做出了很大贡献,第一次评估报告中,中国参与的气候模式仅有 1 家,为中国科学院大气物理研究所发展的 2 层大气耦合混合层海洋模式(Wang, et al, 1993);到了 2021 年的第六评估报告,中国参加的模式研发单位有 6 个,共有 10 个模式版本,其中 FGOALS-f3-H 大气分量水平分辨率高达约 25 km,垂直方向 32 层,海洋分量水平分辨率高达 0.1° ,垂直方向 55 层(He, et al, 2019b)。

因全球变暖动力学的研究依赖于数值模拟实验和一定集合的数值模式结果,中国学者在这方面的科学发现主要开始于 21 世纪初。

(1)降水变化机制。台湾学者周佳(C. Chou)从湿静力能角度解释了全球增暖作用下对流区降水将增加,对流区边缘降水将减少,深入揭示评估了“湿更湿,干更干”机制在全球降水变化中的适用性(Chou, et al, 2004, 2009);谢尚平等提出了海洋

上空降水“暖更湿”的机制,即海温增幅大的区域降水将偏多,增幅小的区域降水将减少(Xie, et al, 2010);随后,黄平等发现在降水的变化中,以上的“湿更湿,干更干”机制和“暖更湿”机制是共同存在的。

(2)大气层结变化的作用。在全球增温背景下,因水汽和能量各自的约束关系,大气环流将减弱(Held, et al, 2006)。马建等指出,上述环流的减弱主要源于对流层上层增温导致的大气层结减弱(Ma, et al, 2012);同时,该层结减弱对青藏高原和印度洋上空环流型的产生起到重要作用(He C, et al, 2019; Qu, et al, 2020, 2022)。

(3)大气快速调整和气候反馈的作用。气候强迫的影响可分解为与辐射强迫相关的快速调整过程(也称“温室气体强迫”)和与全球平均温度相关的慢调整过程(也称“气候反馈”)(Andrews, et al, 2010)。曹龙指出,CO₂强迫增强的可在短时间内迅速减弱全球水循环,发现基于温室气体强迫和气候反馈可很好地重构全球气候分布型(Cao L, et al, 2012, 2015)。同时,中国学者指出,上述2个过程贡献在理解南亚夏季风、青藏高原气候变化中起到主要贡献(Li, et al, 2017; Qu, et al, 2020a, 2020b)。此外,基于该分类的思想,有学者(Ma, et al, 2014; Li, et al, 2017)指出,模式中全球平均增温预估是很多区域气候响应不确定性的主要来源。

(4)气候变率的调整。中东太平洋海温是影响气候系统年际变率的主要因子,在全球增温背景下,该区域内极端增温和变冷事件将增多(Cai, et al, 2015a, 2015b);同时,因大气中水汽含量增加,中东太平洋海温变化导致的气候效应也将增强(Hu K M, et al, 2021),如北太平洋副热带高压的变率因此得到了增强(Yang, et al, 2022)。

(5)观测约束方法的应用。气候预估和气候动力学研究依赖于集合数值模拟,同时也给全球变暖下的响应带来不确定性。基于模式当今气候态与未来气候变化之间联系的思想,中国学者开展了大量研究,在东太平洋海温、东亚夏季风、北太平洋副热带高压等方面揭示了一些新的现象(Huang, et al, 2015; Zhou S J, et al, 2020)。

随着科学界对全球变暖危害认识的加深,科学界逐渐关注温室气体减排情景下气候的恢复能

力。中国学者开展了CO₂浓度下降过程中全球温度、水循环、季风、ENSO等的变化研究(Wu B, et al, 2010; Cao, et al, 2011; Wu, et al, 2015; Chen S F, et al, 2020; Liu C, et al, 2023; Qu, et al, 2023; Zhang J P, et al, 2023; Huan, 2024; Zhang Q Y, et al, 2024),为气候的可恢复能力提供科学证据。(注:IPCC AR6三个工作组主要作者的分布情况如下:第一工作组232人入选,其中中国作者14人、占总数6.0%;第二工作组249人入选,其中中国作者10人、占总数4.0%;第三工作组226人入选,其中中国作者13人、占总数5.75%。)

气候系统由大气、水、冰雪、岩石、生物等5个圈层组成,不同圈层存在着复杂的相互作用(吴国雄等, 2006; Zhou, et al, 2008b; 李建平, 2013; Yan, et al, 2016; Li, et al, 2019; 秦大河等, 2020),并且人类活动已成为推动气候系统变化的强迫力(叶笃正等, 2003; 丁一汇等, 2007; 秦大河等, 2007)。回顾近代以来气候系统动力学的发展历程可以发现,中国科学家在理论创新和实际应用方面取得了显著成果。在大气动力学领域,中国学者深入研究了大气环流的基本规律,推动了对大气波动、能量传播机制的理解,并在气候系统多圈层耦合方向做出了开创性贡献。在海陆气相互作用方面,中国科学家系统地研究了海洋-大气耦合现象,如ENSO和PDO等,揭示了气候系统中多尺度的变化机制。同时,他们还深入探讨了陆地表面特性和地形对大气环流的调节,进一步丰富了气候系统的复杂性。通过揭示大气和海洋环流系统之间的复杂联动机制,中国学者为理解气候系统中各圈层之间的相互作用提供了重要理论支持,并为气候预测和灾害防御奠定了坚实基础。此外,在全球变暖动力学研究中,中国科学家通过对动力学理论与耦合气候模式的深入分析,为理解全球变暖的动态过程和区域气候响应提供了科学依据,并在气候预测与应对策略方面发挥了重要作用。

近年来,人工智能技术逐渐被引入气象预报和短期气候预测领域,为这一方向带来了进一步的精细化和准确度。例如,Bi等(2023)提出了基于人工智能技术的盘古气象大模型,该模型在预报精细程度和准确度上引起了业内关注。然而,值得注意的是,目前的人工智能技术主要应用于气象和气候预

测,鲜有将其应用于气候系统动力学研究的案例。此外,谷歌发布的NeuralGCM模型具有大气动力学核,具备理解地球系统变化的潜力(Kochkov, et al, 2024)。这一趋势表明,未来将有越来越多的研究工作利用人工智能模型,推动科学界对气候系统动力学的深入理解。这种技术的引入不仅将加速研究进程,也可能在未来引发该领域的新变革。

5 青藏高原天气气候动力学

驱动大气运动的直接能源约三分之二来自地球表面。起伏不平的地形除了机械作用,更重要的是通过加剧地区的加热差异从而改变大气运动的状况。高耸的山脉白天接受更强烈的太阳辐射,向大气释放更多的感热加热,增强了的上升运动形成更强烈的降水和潜热加热,更显著地改变了大气的运动。大地形上空的大气夏季受热上升、冬季冷却下沉,调控了大气环流的季节转化。

青藏高原(简称高原)是世界上海拔最高面积最大的高原,与阿尔卑斯山和伊朗高原连接,横跨欧亚大陆,对大气环流和天气气候具有独特和重要的影响。自从20世纪50年代叶笃正先生开拓青藏高原气象学以来,气象学者对青藏高原的特征及其天气气候影响开展了大量研究,取得了重要进展。文中回顾中国学者在青藏高原天气气候动力学方面的贡献。主要包括大尺度地形的动力强迫和热力强迫的相关理论研究,高原对灾害天气、区域气候和全球气候的影响。

5.1 大尺度地形的动力强迫和热力强迫的相关理论研究

青藏高原宏观特征可以概括成五个“度”——独特的尺度、经度、纬度、高度、坡度(吴国雄等, 2023)。横跨欧亚大陆的巨大的高原使西风环流发生扰动;高原位于亚洲大陆东部,与北美和欧亚大陆相同,夏季是大气的热源、在低空激发出气旋式环流,欧亚大陆和青藏高原的气旋式环流在大陆东部叠加,造成全球最强烈的副热带东亚夏季风(Liang, et al, 2005; Wu G X, et al, 2012a; Wu, et al, 2023)。

对大地形影响是从其机械作用即动力强迫的认识开始(Queney, 1948; Charney, et al, 1949; 顾震潮, 1951; 杨鉴初等, 1960)。一系列理论研究则揭

示了山脉对大气环流产生作用的条件和机制(Queney, 1948; Wu, 1984)。Bolin (1950)和Yeh (1950)证明大气波动对地形水平尺度非常敏感;周晓平等(1958)首先研究了地形坡度效应对罗斯贝波波速的影响。叶笃正在《西藏高原气象学》(杨鉴初等, 1960)的第三编中对青藏高原机械作用和热力作用对大气环流影响的早期研究作了全面回顾。

大尺度地形动力强迫和热力强迫的相对重要性存在季节差异。理论研究(Held, 1983)指出,在基本气流很强时的冬季地形的机械作用比热力作用重要。冬季西风急流中心位于高原上空,高原阻挡及地形侧边界的摩擦力和山脉力矩相结合,形成高原北面反气旋、南面气旋的TP-dipole环流(Wu, et al, 2007),高纬度高空盛行的“两槽一脊”高度场的形成与高原的影响密切相关。在基本气流很弱时则地形的热力作用更为重要。这是因为加热强迫的定常波强度与加热区域顶部的平均西风强度成反比。该结果被大量数值模拟证明。如仅存在青藏高原的动力作用时,200 hPa上环流场几乎没有信号,而加入高原上的非绝热加热时南亚高压的形态被激发出来。但在对流层低层,因为气流被高原阻挡发生沿等熵面运动,高原的动力强迫对东亚的西南季风的形成起一定的作用,不过相对于热力强迫的影响要弱(Liu, et al, 2007)。

叶笃正等(1957)利用稀少的测站资料,计算了大气热量平衡方程中的各项。指出青藏高原在夏季是大气的热源,从此青藏高原气象学发展为一门新学科,青藏高原热源对大气环流和天气气候的影响也从此成为气象界研究的热门课题。早期的研究成果在《青藏高原气象学》(叶笃正等, 1979)书中全面概述。青藏高原的抬升加热对大气环流存在抽吸作用(Wu, et al, 2007)。青藏高原地表加热和平原地区地表加热对大气环流作用的最重要区别在于青藏高原的表面加热是抬升加热。这种抬升加热有2个重大作用。其一是对水汽抬升的影响。地表加热所致的大气上升运动是借助于动力过流作用(吴国雄等, 2000; Liu Y M, et al, 2001),其强度在离地面4—5 km高度处趋于0,在其下方则为等熵混合层。在抬升的高原地表加热中,这个混合层顶可到达300 hPa(Yanai, et al, 2006);而在平原地区,这个混合层顶在500 hPa以下。其二是对局

部加热抬升的作用不同。这是由于大气中的等熵面基本上为准水平分布,因此绝热加热气块在大气中的运动是沿着等熵面的准水平运动。由于大地形高耸在大气中,与大气低层的等熵面相切,这时高原侧边界的表面感热加热就像气泵一样能够产生显著的局部加热抬升,即“高原感热气泵”效应,比平台加热的效应更强(图 1,数值试验结果)。

5.2 对灾害天气的影响

在东亚独特的天气气候形成过程中,青藏高原起到了非常关键的作用(叶笃正, 1979; 章基嘉等, 1988; 陶诗言等, 1999; 吴国雄等, 2003; 徐祥德,

2009)。青藏高原影响灾害天气的观测试验、基本特征、物理过程和异常成因等研究也取得了一些很有意义的成果(李跃清等, 2023)。主要有:①青藏高原大地形及其东侧陡峭地形的热力、动力影响,使高原地区成为全球同纬度低值天气系统活动的高频中心;②青藏高原天气系统是影响中国冬夏灾害天气的主要系统,其发生发展,尤其是东移往往引发中国夏季暴雨洪涝等天气灾害;③青藏高原地-气过程影响中国灾害天气的区域格局,是天气灾害预测的上游区和强信号区。

高原低涡(简称高原涡)、西南低涡(简称西南

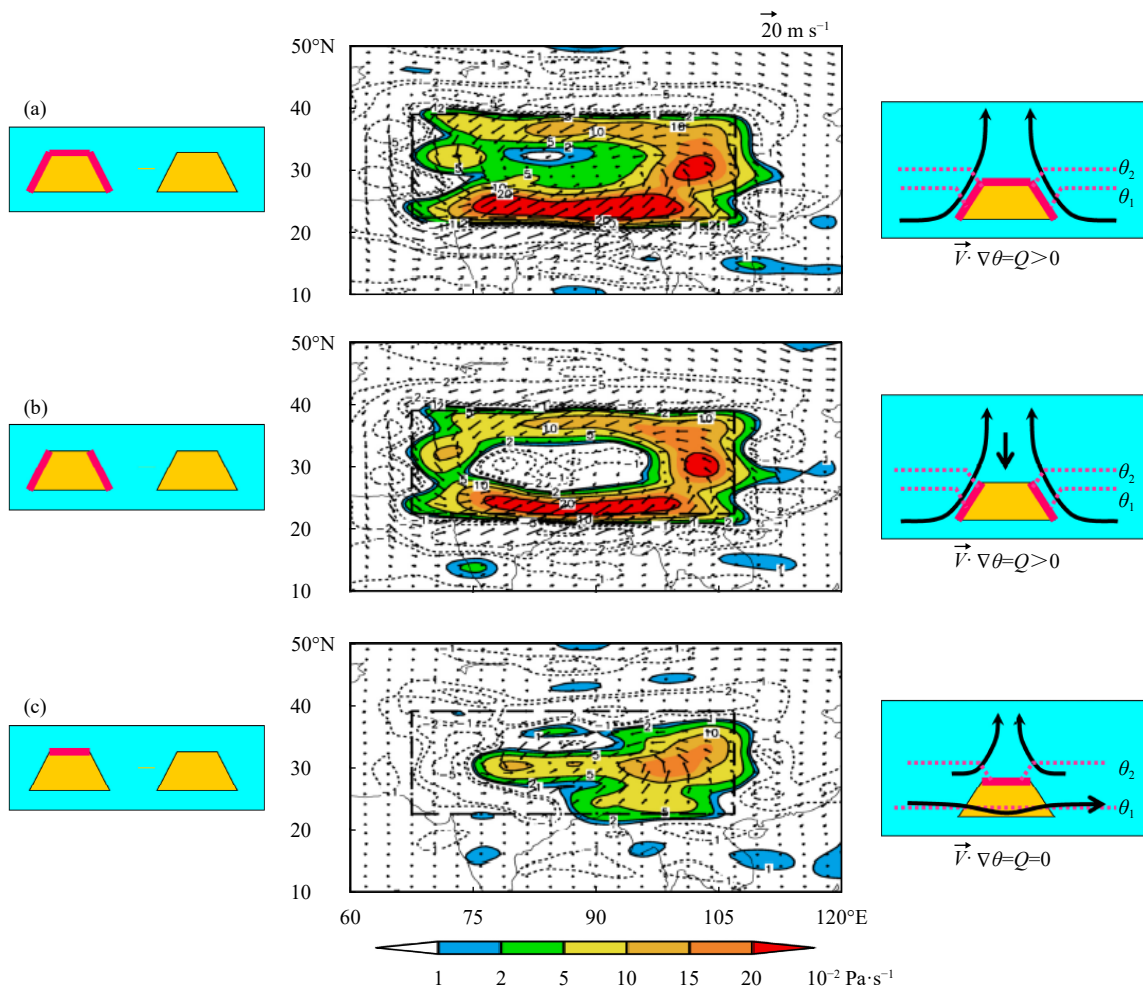


图 1 $\sigma=0.991$ 坐标面上风速(矢量, m/s)和垂直速度($-\omega$)(色阶, Pa/s)的差异分布 (a. 全地形感热影响, b. 地形斜坡感热影响, c. 地形平台感热影响; 虚矩形表示给定梯形山脉的底部, a1—c1. 实验设计; a3—c3. 相关机制示意; 橘黄填色代表地形, 加粗红短线表示给定了地表感热加热; 引自 Wu, et al, 2007)

Fig. 1 Distributions of differences in wind (vector, m/s) and vertical velocity ($-\omega$, shading, Pa/s) at the $\sigma=0.991$ surface from the perpetual experiments (a) ALLSH-NOSH, (b) SLPSH-NOSH, and (c) TOPSH-NOSH (the rectangle indicates the mountain domain, a1—c1. experiment designs, a2—c2. ? ? ?, a3—c3. mechanism interpretations; the orange represents the terrain, and the bold red line indicates the prescribed surface sensible heating; Wu, et al, 2007)

涡)、高原切变线等青藏高原天气系统是影响中国冬、夏灾害天气的主要系统,其发生发展、东移往往引发中国暴雨洪涝等严重天气灾害。陶诗言(1980)、卢敬华(1986)指出发展东移的西南涡能引发中国长江流域、淮河流域、华北、东北和华南等下游广大地区暴雨等灾害性天气。Li Y D等(2008)发现青藏高原夏季对流系统主要中心在横断山脉,次中心在雅鲁藏布江,其中约50%的系统向东和向南移出高原,移出系统一般具有更长生命史,产生更多降水。20世纪90年代中国江淮流域3次致洪暴雨过程,也是青藏高原 α 中尺度对流系统东传到江淮流域,促进梅雨锋上 α 中尺度对流系统形成发展,为大暴雨创造了有利条件(张顺利等, 2002)。宋敏红等(2002)指出高原涡东移出青藏高原会激发西南涡东移,并使西太副高南落,长江中下游流域发生暴雨天气。陶诗言等(2004)进一步指出高原东移天气系统对中国青藏高原下游流域降水有重要作用,并提出了包括高原低值系统影响的中国南方暴雨天气学模型。Xiang等(2013)分析了一次东移—折回—西移奇异路径高原涡持续性暴雨天气,得到青藏高原东侧地形与低涡的相互作用对降水有显著影响,高原涡东移过程与潜热释放中心的引导密切相关。而高原涡与西南涡耦合引发的降水等天气,具有范围广、强度大、时间长、剧烈性、异常性等基本特征(Cheng X D, et al, 2016; Chen, et al, 2019)。高原切变线对于青藏高原及其下游中国广大地区的降水都有显著影响(郁淑华等, 2013),其生命史越长影响越大,且夏半年降水范围和强度大于冬半年,可造成暴雨及以上强降水天气。Zhang X等(2016)发现青藏高原横切变线及其暴雨事件的发生频数都是平稳的,但高原横切变线引发暴雨事件的发生频数处于减少状态;50%以上的高原横切变线能引发暴雨,而40%的青藏高原暴雨事件由高原横切变线引起;高原横切变线与青藏高原6—8月汛期的暴雨具有密切的关系。

基于位涡框架的研究提供了高原影响灾害性天气的新的机理和过程。Wu等(1997)提出了倾斜涡度发展(SVD)理论,用于解释拉格朗日质点沿着倾斜等熵面下滑时垂直涡度的发展,并得到广泛应用。数值模拟表明:西南涡的初生和成熟阶段,对流层低层都维持与正涡度和高位涡中心相耦

合的动力结构,并伴有上升运动;成熟阶段,上升运动、正涡度柱和高位涡柱明显加强、发展至对流层高层(300 hPa);潜热释放造成的非绝热作用利于低层位涡增长、抑制高层位涡增长,对西南涡的生成、发展有重要作用(刘晓冉等, 2014)。严重的高原涡暴雨洪涝灾害往往与其移出青藏高原后的长久持续有密切关系,冷空气影响可形成涡区内位涡增大与斜压性增强,利于高原涡发展;高空锋区通过高空高位涡下传,可使高原涡加强,揭示了长、短持续高原涡的位涡显著差异特征(郁淑华等, 2018)。夏季青藏高原地表加热具有强烈的日变化,使高原近地层白天有位涡耗散,夜间有位涡制造,呈现明显的昼夜循环;当位涡制造的昼夜循环被破坏时,高原涡形成,随之出现降水,显著的凝结潜热加热使位涡中心增强,高原涡进一步发展;随着低涡继续向东移出高原,长江中下游地区中高层出现位涡平流随高度增加的大尺度动力背景,上升运动发展,最终导致强降水发生(马婷等, 2020; Wu, et al, 2022)。近期Wu等(2020)还提出位涡重构的概念,阐明了冬季青藏高原对其地表附近的位涡具有重构作用,能够增强高原东侧地表附近位涡增强,这种增强的位涡在西风带中向下游输送,造成对流层中下层气旋式环流和等熵面位移引起的垂直速度发展,由此影响青藏高原下游广大地区的极端冰雪天气事件。高原的影响还揭示了热带海洋异常不能直接解释的2020年夏季长江流域上游超强梅雨降水梅雨全流域从日变化、天气尺度到低频变化的原因(Ma, et al, 2022)。2020年印度洋增暖及其对流异常引发孟加拉湾上空的异常反气旋向青藏高原输送过多的水汽,导致夏季高原地表和400 hPa之间非绝热加热的垂直梯度偏强,是造成梅雨期高原高位涡系统异常活跃的主要原因。高位涡系统移出高原往往对应着高原东侧地表感热偏强,与之相对应的辐合上升运动有利于高位涡系统移出高原并激发下游地区天气过程(图2)。

5.3 对亚洲季风和区域气候的影响

青藏高原的存在决定了亚洲气候型态。如4.1所述,高原地形的动力强迫和加热强迫对大气定常波的形成非常重要。冬季,因高原对西风流的阻挡、分流、绕流,偏差风场主要表现为以青藏高原为准对称的,南侧气旋/北侧反气旋的“偏极性偶

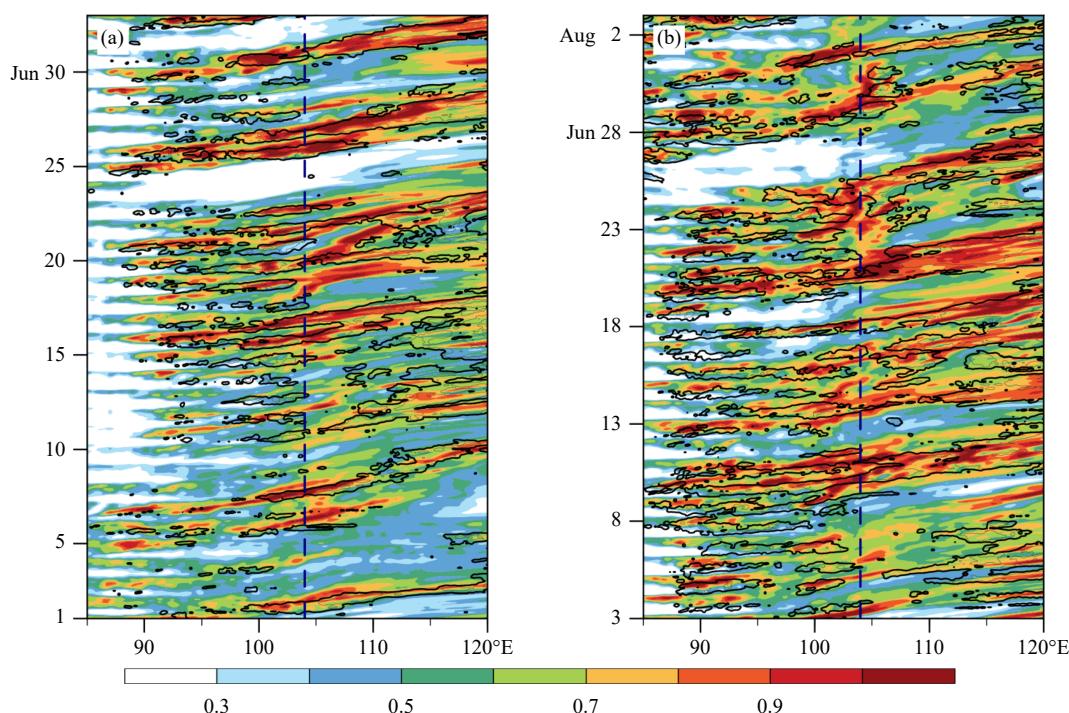


图 2 2020 年梅雨期 (6 月 1 日—8 月 2 日) 30—37°N 平均位涡 (色阶, 单位: PVU) 和 30—35°N 平均降水 (等值线, 单位: mm/h) 随时间演变 (蓝色虚线表示青藏高原东边界, 104°E; Ma, et al, 2022)

Fig. 2 Evolution of potential vorticity (shading, unit: PVU) at 500 hPa averaged over 30°–37°N, and precipitation (contour, unit: mm/h) along 30°–35°N during the 2020 Meiyu period (the blue dashed line indicates 104°E, which is the easternmost longitude of the Tibetan plateau; Ma, et al, 2022)

极子”环流型, 位于高纬度的反气旋偏差环流致使高原西侧有暖平流向北输送, 而东侧为冷平流向南输送, 以至于 50°N 的位温差达 14 K (Wu, et al, 2007)。同时, 位于低纬度的气旋性偏差环流在西侧将北方干冷空气向南亚输送, 而东侧则将暖湿空气向北输送到中印半岛和华西南地区。这种环流分布在季风暴发前对印度半岛干季和江南春雨的维持有非常重要的作用。因为高原的锚定作用及南亚地区的海陆气相互作用, 在孟加拉湾东部形成季风爆发涡旋、使亚洲夏季风在该地区最早爆发 (图 3, Wu, et al, 2012a; Liu, et al, 2013)。夏季由于强大的高原加热, 偏差流场在副热带地区形成环绕整个高原的气旋性环流, 气流向高原辐合、高原强迫出东部上升/西部下沉运动, 与大陆尺度的上升/下沉运动同相叠加, 因此在北非和中亚形成高温干旱气候, 而在东亚形成潮湿多雨的季风气候 (Wu, et al, 2007, 2009)。高原感热气泵所产生的位涡强迫在对流层低层激发出绕高原的强度大、范围广的气旋式环流, 把海洋上的丰沛水汽输向大陆从而支持

着陆地上的季风对流降水。高原的抬升加热还改变了其上方的温度和环流结构, 产生绝对涡度最小值, 形成同纬度最高的对流层顶, 在亚洲季风区激发出大范围的季风型经圈环流, 为亚洲夏季风降水制造了大范围大尺度上升运动的环流背景 (Wu, et al, 2005, 2015, 2016; Liu Y M, et al, 2017)。正是由于位于副热带地区的青藏高原与伊朗高原感热气泵的强迫作用, 才形成了南亚夏季风的北支和东亚夏季风 (Wu, et al, 2012b; He B, et al, 2015)。

高原强迫还对亚洲季风的长时间尺度变率起重要作用。低频尺度上, 高原热源的低频变化影响了中国东部夏季持续性强降水异常。北半球盛夏 (7—8 月) 的青藏高原大气热源由高空大气热源 (TPUHS) 所主导, 且日平均 TPUHS 的主导变化周期接近准双周尺度 (Zhu, et al, 2018)。在 TPUHS 的加强和衰减阶段, 还可以通过激发不同的罗斯贝波列, 影响中高纬度以及北半球其他地区的天气异常 (Zhu, et al, 2018, 2019)。年际尺度上偏强的青藏高原热源对应着异常偏强的南亚高压中心。但

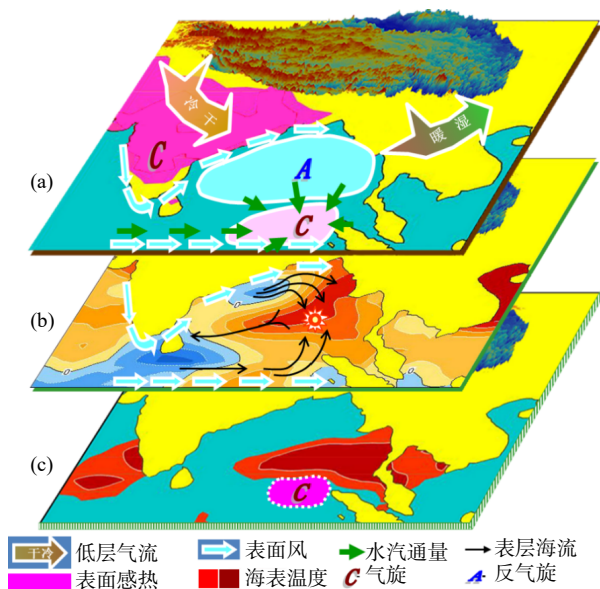


图3 春季在青藏高原强迫和南亚海陆热力对比共同作用下(a), 孟加拉湾暖池形成(b)和季风风暴涡旋激发(c)的示意(引自 Wu, et al, 2012a)

Fig. 3 Warm pool formation in the Bay of Bengal (a), the outbreak of monsoon vortex (b), and the activation of the winter vortex under the joint effects of the Qinghai-Tibetan plateau forcing and land-sea thermal contrast in south Asia in spring (Wu, et al, 2012a)

Ren 等(2019)的研究结果指出, 对于月以下的短时间尺度, TPUHS 异常与南亚高压之间有不同的对应关系: 在高原热源异常偏强位相, 南亚高压中心多离开青藏高原而在伊朗高原上空; 反之位于青藏高原上空。而南亚高压这两类流型转变期间, 西太平洋副热带高压脊在中国大陆上出现一次进退过程, 长江流域梅雨期的结束也与上述第一类流型的建立有联系(陶诗言等, 1964)。春季高原感热加热的准双周变化也能够控制江南春雨的低频变化(Pan, et al, 2013)。青藏高原附近 25—60 d 环流季节内振荡(ISO)也影响中国东部夏季持续性强降水异常。如 1998 年夏季, 青藏高原附近环流存在显著的 25—60 d 环流季节内振荡(Li J Y, et al, 2018), 并与热带 ISO 共同调制长江中下游的降水。青藏高原热力异常的年际变化可以调制赤道 MJO (Madden Julian Oscillation) 对流强度, 进而影响中国“冷涌”(Lyu, et al, 2018)。

东亚季风是一个海-陆-气相互作用的耦合系统, 其年际和年代际变率在很大程度上受到来自青藏高原热力动力作用和全球海洋异常信号的共同

调控(如 Hu, et al, 2015; Duan, et al, 2017, 2020; Zhao P, et al, 2018; Sun, et al, 2019; Liu, et al, 2020; Hu P, et al, 2021; Zhao Y, et al, 2021; Jiang, et al, 2022, 2023), 变化显著且复杂。陈烈庭等(1981)以及 Wu 等(2003)通过资料分析研究了青藏高原冬春季积雪与亚洲夏季季风和降雨的关系。发展期的 ENSO 信号与黄河流域夏季降水异常紧密联系, 高原雪盖异常是其中的重要“桥梁”(Jin, et al, 2018)。Wang 等(2017)发现青藏高原冬春积雪时空异常引起的非绝热加热效应可持续到夏季, 与中国东部夏季降水之间存在三对时空异常“型”。其中物理过程是高原冬春积雪异常改变了高原南北两侧的温度梯度, 导致西风带上定常波的异常, 影响急流出口区西风的位置和强度, 同时低层风场的异常使华北地区的水汽输送减少, 长江流域的水汽输送增多。高原春、夏季土壤湿度异常也对中国夏季降水产生影响(李登宣等, 2016; 王静等, 2016)。春、夏季青藏高原和伊朗高原的地表热通量存在相互联系并影响春、夏季南亚高压和亚洲季风(Zhang, et al, 2019)。南亚高压强度异常表现为其西、东部的位势高度(温度)异常在欧亚大陆上空呈现符号基本一致的变化模态, 与高原东部到长江中下游一带的季风潜热释放的异常关系密切(Zhang P F, et al, 2016)。高原还在北大西洋环流异常对南亚季风季节推进、丝绸之路型环流和海洋大陆地区对流影响东亚季风过程中起桥梁作用(Wang, et al, 2018; Yu, et al, 2021; Jiang, et al, 2022; Liu Y M, et al, 2023)。但需要注意的是, 高原感热在季风形成中的根本作用并不能保证其在季风时间变化中起决定作用。Ma 等(2014)的数值试验表明, 南亚局地近地层热通量的增加对当地季风对流的影响要比 TP 斜坡上热通量增加的“遥”影响明显得多。夏季青藏高原加热作用形成的亚洲-太平洋涛动现象对季风具有重要影响, 当夏季 APO 指数偏高时, 指示着亚洲夏季风总体上偏强, 长江流域降水偏少, 华北降水偏多, 印度季风区降水偏多, 同时西太平洋和中国沿海地区热带气旋活动增加(Zhao, et al, 2018)。

年代际时间尺度上, 研究指出青藏高原感热强迫在 20 世纪后期减弱导致高原近地面气旋环流和西太副高减弱, 是形成独特的“南湿北干”东亚季风

降水异常及中国西南地区降水异常的一个重要原因。高原感热在该时期减弱是气候变化背景下温室气体增加相关的不同纬度的非均匀性增暖有关 (Liu, et al, 2012; 刘屹岷等, 2020)。Lu 等 (2020) 阐述了蒙古南部和中国北部附近冬季积雪在东亚冬-夏季风联系 (通常较强的冬季风对应着随后较少的副热带东亚夏季风降水) 中扮演着重要的桥梁作用, 为提高东亚季风季节和年际预测水平提供新的理论支撑。此外, 高原上空的气溶胶-云相互作用不仅对青藏高原局地降水产生影响, 还能进一步影响下游地区的降水过程 (黄建平等, 2023)。

5.4 对海洋和全球气候的影响

青藏高原的隆升对气候包括海洋环流至关重要 (Wu, et al, 2015; An, et al, 2001; 赵佳港等, 2022; Huang J P, et al, 2023)。Yang 等 (2020b), Yang 等 (2020a) 和 Wen 等 (2020) 系统地研究了青藏高原大地形对全球大气温度和水汽分布的影响, 以及对全球海洋热盐环流的影响。高原通过激发静止罗斯贝波列对遥远地区气候产生重要的影响。例如, Sun 等 (2012) 利用海气耦合模式模拟了青藏高原抬升的高度对瞬变涡旋增长速率和正压能量转换的影响。大西洋经向翻转流是全球海洋大输送带最重要的组成, 它的强度决定了全球大输送带的强度。对比采用真实地形 Real 和去掉青藏高原的 NoTibet, 杨海军等 (2023) 发现, 去掉青藏高原会使北半球大气变冷、变干, 对南半球的影响不明显。北半球变冷主要是海洋向北经向热量输送减少的结果, 一方面增强了北半球的经向温度梯度, 导致哈得来环流增强, 加强了中低纬度地区向北的大气热量输送, 部分补偿了海洋向北减少的热量输送, 维持了北半球中低纬度的能量平衡; 另一方面, 使得北半球中高纬度蒸发作用减弱, 大气中水汽含量减少, 北半球变得寒冷干燥。研究表明青藏高原的存在促进了跨赤道的向北的海洋热量输送和大气水汽输送, 决定了北大西洋翻转流的存在, 同时抑制了太平洋经圈环流的建立, 从而对北半球宜居的现代气候做出了巨大贡献。高原的存在, 特别是夏季其上热力强迫影响了印度洋海温的分布 (He, et al, 2019a), 减弱了南极深水形成有利于南极洲降温, 并且可以使海水的通风性减弱, 有利于更多的碳存储在海洋深处, 也可以部分解释这

个时期大气降温和 CO_2 浓度降低的现象。

高原强迫的变化影响了不同区域的海洋状况。Sun 等 (2019) 的研究结果表明, 春季高原热源对东亚夏季风的间接影响——北太平洋的信号存储器作用: 基于再分析资料和耦合模式结果, 发现当春季高原感热偏强时, 北太平洋上空整层的反气旋式环流异常使该地出现“U”型海温异常响应, 且该异常能从春季持续至夏季。青藏高原-南印度洋经向环流可能是南北半球相互作用的一个重要“通道” (周秀骥等, 2009; Zhao, et al, 2019)。夏季青藏高原加热可以造成高原附近对流层温度升高、上升运动加强, 太平洋下沉运动加强、温度下降, 从而形成亚洲-太平洋涛动 (APO) 现象 (Liu G, et al, 2017); 当 APO 为正位相异常时, 对流层上层的南亚高压偏强, 低层亚洲大陆低压和中、太平洋副热带高压偏强, 说明南亚高压与太平洋副热带高压之间可以通过 APO 相互联系。Lu 等 (2018) 基于敏感性数值试验, 研究了青藏高原加热对夏季“上游”气候的影响, 即高原以西的地区, 特别是西亚、南欧、北非和北大西洋。Yu 等 (2023) 发现早春北大西洋三极子 SSTA 通过激发罗斯贝波列调节西风急流进而影响春季高原地表感热; 而春季高原热力强迫的不同模态不仅可能激发定长罗斯贝波列影响北太平洋表层及次表层海温异常, 其“负感热-斜压模”还能通过印度洋纬向季风环流和太平洋沃克环流的齿轮耦合及风-蒸发-海温反馈机制和季节足迹机制激发 ENSO 事件。

青藏高原对全球气候的影响也受到海气相互作用的调剂。Xie 等 (2023) 的研究指出, 西北太平洋的海气相互作用就像中继器一样, 把青藏高原对大气环流的影响从亚洲扩展到全球。

6 中国多时间尺度的古气候变化研究

古气候变化研究是理解地球气候系统长期演变规律、探索气候变化机制的重要途径。中国, 作为世界上历史最悠久的文明古国之一, 拥有丰富的历史文献和自然档案, 为古气候研究提供了宝贵的资料。从历史时期到全新世, 再到更久远的地质时期, 中国学者在不同时间尺度上开展了广泛而深入的古气候变化研究。这些研究不仅揭示了中国过去气候变化的特征和规律, 也为全球气候变化研究

提供了重要的区域视角和证据。文中全面回顾中国多时间尺度的古气候变化研究,重点介绍历史时期及全新世的气候变化、第四纪的气候变化以及新生代的气候变化,以期为读者提供一个全面而深入的了解。

6.1 历史时期及全新世的气候变化

中国具有丰富的反映过去天气气候的历史文献和记录气候变化的自然档案,所以长期以来诸多研究从不同角度探讨了中国历史时期的气候变化。中国近代气候学的开创者竺可桢(1972)先生在半個世纪之前,根据大量的历史文献记载,并结合考古及现代观测,系统地概括了5000年来中国气温变化的轮廓:距今5000—3000年前大部分时间的年平均气温高于现在 2°C 左右,1月气温比现在高 $3\text{—}5^{\circ}\text{C}$,其间有次级波动;距今3000年至公元1850年中国气温整体呈下降趋势并伴有400—800 a的准周期波动,冷暖波动的范围约为 12°C ,几个低温期分别出现在公元前1000年,公元400、1200和1700年前后;工业革命以来气温开始上升。中国大范围的冷暖变化与北半球或全球平均温度变化大体上是同步的。在这一开创性研究论文发表后的半个世纪中,中国的历史气候研究已从历史文献、物候记录扩大到树轮、石笋、湖泊、冰川、海洋等各种自然档案。同时,同位素测年、孢粉和微古生物、地球化学分析等古气候信息提取的技术和实验手段不断改进,古气候信息也日益丰富,从而使中国历史气候重建的精度和时空分辨率不断提高。

20世纪70年代以来中国的历史气候研究在多方面取得了卓有成效的进展。在气温重建方面,利用史料建立了过去500—2000年区域性温度变化序列(张德二, 1980; Ge, et al, 2003)。最近20余年,历史气温序列的重建越来越倾向于利用冰芯、树轮、湖泊沉积与历史文献等多源资料的集成。例如, Yang等(2002)根据已发表的各种资料建立了中国过去2000年10 a分辨率的温度变化序列。王绍武等(2007)综合重建了近千年来中国10个区和全国10 a分辨率的温度序列。葛全胜等(2012)集成已有的过去2000年高分辨率气候重建序列,归纳出秦汉以来中国温度变化经历了两汉(公元前200年—公元180年)、隋唐(公元541—

810年)、宋元(公元931—1320年)及20世纪4个暖期和魏晋南北朝(公元181—540年)、晚唐(公元811—930年)及明清(公元1321—1920年)3个冷期。虽然重建结果在公元1500年前尚存在较大的不确定性,如对中世纪暖期的认定仍有不同看法,但自15世纪初开始的小冰期以来重建气温的一致性和可靠性更高,与全球(或北半球)气温变化基本同步。根据多种代用指标重建的近百年气温序列表明,1880—1996年我国年均温增加速率为 $0.44^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$ (王绍武等, 1998);而1909—2010年中国中东部地区器测年平均地表气温的变化趋势可达 $1.52^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$ (Cao, et al, 2013)。虽然由于资料来源、可靠性及处理方法的差异,不同的研究结果尚不完全一致,但已有研究均显示近百年来气候变暖速率是历史上罕见的。此外,尽管在过去几千年或近百年中国不同区域气温变化总体趋势相似,但也存在一定差异,如历史时期(吴祥定等, 1981)或近百年Liu等(2002)青藏高原地区的气候增暖可能显著高于周边及东部同纬度地区。

与此同时,中国基于历史文献和各种自然档案开展了大量历史时期降水重建和变化特征的研究。例如,中央气象局气象科学研究所(1981)整编了《中国近五百年旱涝分布图集》。由于降水量的空间差异大但降水异常的空间范围相对较小,因而目前还难以像气温一样获得一条代表中国历史时期降水量变化曲线。因此,过去建立的反映干湿变化的曲线往往是针对特定区域的。例如,基于史料重建了中国东部过去千年干湿变化序列刘传志(张德二等, 1997)以及华北、江淮和江南3个地区501—2000年的降水指数序列(Zheng, et al, 2006),发现东部季风区的干湿变化存在显著的年代一百年—一千年尺度的变化,但显示出明显的区域差异,如过去2000年华北与江南的干湿振荡往往存在反相变化。根据近500年的史料分析发现,中国东部地区干湿变化存在2—5、20—40、200及400 a等多种周期振动(张家诚等, 1979),且历史时期中国东部夏季旱涝型也有明显的时空变化(王绍武等, 1979)。Yang等(2014)利用半化石、朽木和活树样本,建立了青藏高原东北部过去3500年的年降水序列,表明最近50年是该记录中最湿润的50 a,但近几千年来高原降水似与亚洲季风强度变化无

关。基于旱涝史料和气象台站资料,王绍武等(2000)重建了 1880 年以来中国东部四季降水量序列,指出近百年来中国年降水量仅有微弱增加趋势($0.1\%/(100\text{ a})$),但存在显著的年际及年代际振荡。20 世纪 80 年代以来中国西北地区呈现出“暖湿化”趋势(施雅风等, 2002)。此外,历史时期的极端气候事件,特别是极端干旱或洪涝也越来越受到关注(郑景云等, 2014)。

历史时期气候变化的原因通常被归结于自然因子和人类活动的双重影响。十年—百年尺度气候变化的自然强迫因子主要有太阳活动和火山活动等。而人类活动主要通过人为排放 CO_2 等温室气体和气溶胶,或通过森林砍伐或农业发展等方式改变土地利用进而影响气候。一些研究通过数值模拟方法探讨了中国历史气候变化的成因。例如, Liu 等(2005)利用全球海-气耦合模式对过去千年的瞬变模拟结果与重建的中国中东部冬半年温度进行了对比,认为太阳活动和火山喷发是影响 20 世纪之前中国温度变化的主要因素,而大气温室气体浓度的增加在 20 世纪变暖中起主导作用。Liu 等(2009)还分析了过去千年全球季风降水对外部和人为强迫的响应,发现历史暖期(如中世纪暖期)和冷期(如小冰期)模拟的全球季风降水分别增多和减少。基于地球系统模式对过去千年的气候模拟, Man 等(2014)分析了北半球夏季温度和降水对大型火山爆发的响应,发现火山爆发可致东亚大陆变冷、东亚夏季风环流减弱。此外,石正国等(2007)利用一个中等复杂程度的地球系统模式的模拟研究表明,近 300 年来的土地利用变化通过生物地球物理反馈过程对气候的影响不容忽视。

历史时期是最年轻的地质年代——全新世的一部分,所以作为历史时期的延深,全新世气候变化也备受关注。从大约一万年前的开始的全新世作为一个间冰期,其全球气候以温暖、湿润为主要特征。中国的大暖期或气候适宜期主要出现在中全新世(距今约 8000—4000 年),平均气温比现代高约 $2\text{—}3^\circ\text{C}$,其中华南高 1°C 、长江流域高 2°C 、黄河流域高 3°C ,青藏高原高 $4\text{—}5^\circ\text{C}$ 左右(施雅风等, 1992)。全新世大暖期期间我国大部分地区特别是东部地区和青藏高原不仅偏暖而且偏湿,当时夏季风影响区域可能比现今更向北向西扩张(安芷生

等, 1990)。石笋(Cheng X D, et al, 2016)及树轮(Yang, et al, 2021)等记录的亚洲季风及其降水自全新世中期以来总体呈减弱趋势,但湖泊记录(Chen, et al, 2008)显示中亚和东亚干旱区全新世干湿变化趋势与季风区不同,即早全新世干旱而中晚全新世相对湿润。此外,中国中东部全新世适宜期具有穿时性,即以东亚夏季风降水或有效湿度为标志的全新世气候适宜期盛期在各地出现的时间并不完全相同(An, et al, 2000)。另一方面,全新世暖期并不是一个持续的温暖时段,这期间也存在多次剧烈的冷暖波动或气候不稳定性,如方修琦等(2004)通过分析近 1 万年来史料和自然代用指标记录的中国寒冷事件频率,揭示全新世气候存在周期为约 1300 a 的千年尺度波动,且与全球气候变化具有一定的同步性。石笋也记录了全新世多次持续数百年的亚洲季风减弱事件(Wang, et al, 2005)。全新世大暖期气候的出现通常被认为与岁差引起的北半球夏季太阳辐射增强有关。例如,参与古气候模拟比对计划(Paleoclimate Modeling Intercomparison Project, PMIP)的多数模式模拟结果表明,6000 年前的全新世中期的东亚夏季风随夏季太阳辐射增加而增强(Jiang D B, et al, 2013)。同时,植被和土壤的反馈过程可能进一步促进了中国全新世气候适宜期的发展(Wang, 1999),而全新世冷事件的出现可能与北大西洋海洋环流的变动有关(Wang, et al, 2005)。

6.2 地质时期的气候变化 I: 第四纪

第四纪是从约 260 万年前开始至今的地质年代中最新的一个纪,这一时期北半球高纬度冰盖形成,气候变化以冰期—间冰期循环为主旋律。中国自然环境演变过程中保存的黄土、冰心、石笋、湖泊和海洋沉积以及地层中的生物遗存等地质记录,能够提供过去气候和环境变化的有用信息。以刘东生(1985)为代表的中国学者率先提出黄土高原黄土的风成学说并建立了黄土-古土壤序列,揭示了中国第四纪气候变迁历史,特别是干冷与暖湿气候交替出现的东亚古季风演化(安芷生等, 1991; Liu, et al, 1998; An, 2000)。以黄土粒度所表征的过去 260 万年的东亚冬季风与全球冰量存在周期性的同步变化,并显示出 2 次重要的气候转型事件,即在 160 万年前后气候从多种周期迭加转变成 4.1 万年

为主导周期,而在100—80万年前后从 4.1×10^4 a主导周期向 10×10^4 a主导周期转变(Ding, et al, 1994; Ding, et al, 2002)。以黄土-古土壤磁化率序列所指示的东亚夏季风同样显示了周期性变动及其周期和振幅随时间的变化(Sun, et al, 2006)。除了黄土之外,中国石笋(Wang Y J, et al, 2008; Cheng H, et al, 2016)也良好地记录了过去几十万亚洲季风的演化历史,相关研究成果在国际上备受瞩目。例如,来自湖北神农架三宝洞的石笋氧同位素记录了过去 22.4×10^4 a东亚季风强度变化(Wang Y J, et al, 2008),东亚石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录甚至可以被拓展至过去 64×10^4 a(Cheng X D, et al, 2016),石笋记录的亚洲季风变化具有 2.3×10^4 a的主导周期。过去13万年属于末次冰期一间冰期气候旋回,包括距今12.8—7.3万年前温暖湿润的末次间冰期、距今7.3—1.1万年前的末次冰期以及最近1.1万年以来回暖的全新世,东亚古季风气候变迁对古环境演化产生了重要的控制作用(安芷生等, 1991)。

在全新世之前中国或亚洲第四纪的周期性气候变化基本上反映了未受人为干扰的自然状况,是全球冰期一间冰期循环在特定地区的表现。究其成因,既与地球轨道变动引起的日射变化有关,也与全球冰量,特别是北半球冰盖演化有关。亚洲季风气候的2.3万年周期,通常被认为是岁差强迫的直接响应(Wang Y J, et al, 2008)。去过28万年的瞬变模拟也表明,全球主要季风区的季风降水均具有2.3万年的岁差周期且与其夏季日射存在同相位变化(Kutzbach, et al, 2008)。去过15万年的瞬变模拟还表明,东亚季风区和中亚干旱区万年尺度的年降水变化均受岁差控制,但前者(后者)是岁差通过调制夏季(冬季)日射并影响夏季风环流(冬季西风环流)而实现的(Li X Z, et al, 2013)。Liu等(2022)利用包含水同位素分馏过程的全球气候模式完成的过去30万年瞬变模拟研究发现,岁差引起的不同月份日射变化是造成中亚、南亚和东亚年降水 $\delta^{18}\text{O}$ 周期性非同步变化的根本原因,但所涉及的物理过程不同。因此,以降水 $\delta^{18}\text{O}$ 作为气候代用指标分析气候变化机制时需分区域仔细鉴别。

由于地球轨道参数变动引起的太阳辐射变化的主导周期通常是准 2×10^4 a或准 4×10^4 a,而黄土

粒度或磁化率等指示的东亚古季风变化在过去80万年以来均以10万年周期为主导,即同全球冰量变化一致,因而东亚古季风,特别冬季风的变迁受到全球冰量的控制(Ding, et al, 1995)。在2万年前的末次盛冰期边界条件下,PMIP多模式模拟结果显示当时东亚夏季风较现代显著减弱(Jiang, et al, 2010)。Sun等(2015)综合各种气候代用指标和气候模拟结果指出,东亚夏季风的轨道尺度变化是夏季日射和冰盖及大气 CO_2 浓度等边界条件综合影响的结果。Sun Y B等(2022)的综合分析还表明,不同载体的气候代用指标对温度和降水等气候要素的敏感性不同可能导致不同记录显示的周期差异。在中晚更新世中国湖泊孢粉和黄土碳酸盐碳同位素主要响应于年均温和年降水变化,因而具有显著的10万年周期旋回,而石笋氧同位素可能主要反映夏季降水变化,因而为2万年周期主导。

第四纪气候除了周期性变化之外,也存在着气候不稳定性及各种气候极端事件。例如,黄土粒度所反映的东亚冬季风(Porter, et al, 1995)、黄土古风化强度所反映的东亚夏季风(Guo, et al, 1996)以及石笋氧同位素所反映的印度季风(Cai Y J, et al, 2015)在末次冰期均发现类似北大西洋地区出现的千年尺度大幅度快速冷暖变化,特别是被称为“哈因里奇”的多次气候变冷事件。又如,在末次冰消期持续升温过程中的距今1.2万年前后出现过一次全球性突然降温事件,即“新仙女木”事件。多种气候记录显示“新仙女木”事件在中国不同地区均有表现(汪品先等, 1996; Zhou, et al, 1996),如当时南海冬季温度较现代偏低 $1.5\text{—}3.3^\circ\text{C}$ (汪品先等, 1996)。此外,青藏高原冰芯及湖泊记录显示,距今3—4万年前高原温度高于现代 $2\text{—}4^\circ\text{C}$,降水有4成至成倍以上的增长,代表着一次特强的夏季风事件(施雅风等, 1999b)。“哈因里奇”事件、“新仙女木”事件等快速变冷事件通常被认为是北大西洋盐环流减弱通过调制大气西风环流进而传递到亚洲的。例如, Zhang等(2021)利用海-气耦合模式完成的过去4—3.2万年前气候瞬变模拟试验发现,地球轨道强迫能够触发大西洋千年尺度气候突变并传递到亚洲。青藏高原40—30 kaBP特强夏季风形成可能与岁差引起的夏季太阳辐射增强在高原地区得以放大有关(施雅风等, 1999b)。

6.3 地质时期的气候变化 II：新生代

在地球诞生以来的 46 亿年中, 地球气候经历了一系列巨大的变化。随着恐龙的灭绝, 从 6500 万年前开始地球进入以哺乳动物和被子植物的高度繁盛为主要特征的最新地质年代——新生代, 新生代气候变化的总趋势是气候变冷, 但也见证了古新世—始新世极热事件、中中新世和中上新世等几个暖期。新生代海陆分布与地形发生过重大变动(汪品先, 2005), 在两极冰盖发展(刘东生等, 1998)和青藏高原隆升(施雅风等, 1999a)的背景下, 新生代亚洲气候与环境, 特别是亚洲季风-干旱环境发生过巨大变化。大量的地质证据表明, 在新时代早中期中国气候主要受行星风系控制, 从而在大约 18° — 35° N 形成一条东西走向的干旱带, 其标志是大量盐类和石膏沉积的发育(刘东生等, 1998; Guo, et al, 2008)。基于中国古植物和沉积资料综合绘制的特征地质时期古环境图显示, 在古近纪(距今 6500—2300 万年前)宽阔的干旱带由西向东横跨中国大陆(Guo, et al, 2008), 而新近纪(自 2300 万年前以来)的干旱带仅局限于中国西北部, 据此认为渐新世-中新世过渡时期东亚大气环流经历了从行星风系主控型向季风主控型环境转变。新生代东亚气候演化的核心问题是东亚季风的起源与发展, 为此中国学者做了大量的探索。例如, 张林源等(1991)根据高原隆升和季风演化特征将东亚季风演化划分为早第三纪无季风(行星风系)、晚第三纪古季风和第四纪现代季风 3 个阶段。基于中国黄土-古土壤序列曾经推断东亚季风始于 250 万年前的第四纪初(Liu, et al, 1998; An, 2000), 之后又基于黄土之下的风成红粘土把东亚季风的历史追溯到 800 万年前的晚中新世(Ding, et al, 1999; An, 2000)。An 等(2001)通过黄土高原、印度洋、北太平洋沉积序列对比将亚洲季风气候的演化划分为三个阶段: 距今约 900—800 万年前亚洲季风开始出现, 距今约 360—260 万年前东亚冬、夏季风同时加强, 以及距今 260 万年以来亚洲季风气候变率增大。之后, 随着早中新世中国北方最老的风尘黄土的发现(Guo, et al, 2002)以及中国新生代植被带变迁的综合对比(Sun, et al, 2005), 东亚季风形成的年代被提前到约 2200 万年前的渐新世末—中新世初前后。除陆地记录外, 海洋记录也能反

映亚洲季风的演化。例如, 汪品先等(2003)利用南海钻探记录获得了东亚季风演变历史, 指出东亚和南亚季风的演变具有相似的阶段性。Wan 等(2007)利用南海北部海洋钻探记录分析发现, 亚洲冬季风在距今约 1500、800 和 300 万年前出现过 3 次增强, 且最近 300 万年来冬、夏季风同时增强。

关于新生代亚洲干旱-季风气候形成演化的原因从地质记录角度过去已提出一些概念性的解释, 强调了两极冰盖的发展和青藏高原隆升的重要贡献(刘东生等, 1998; 施雅风等, 1999a; Guo, et al, 2008)。在过去 20 多年中国学者也通过大量的数值模拟研究, 探讨了新生代亚洲干旱-季风气候形成演化的机制, 虽然中国的古气候模拟研究比国外起步晚。例如, Liu 等(2002)利用全球大气环流模式通过青藏高原阶段性隆升的系列模拟试验表明, 东亚季风比南亚季风对高原隆升带来的地形动力和热力作用的响应更为敏感。Zhang 等(2007)通过一系列改变古特提斯海和青藏高原地形的敏感性试验证实, 古特提斯海退和青藏高原隆升在新生代亚洲气候格局从行星风主导型到季风主导型的转变过程中都起了重要作用。

尽管目前对青藏高原隆升的地质历史尚不完全清楚, 但越来越多的证据表明青藏高原经历了多阶段、分区域和非同步的复杂隆升过程。过去 10 余年大量的数值模拟试验表明, 不同区域的构造隆升对亚洲季风子系统和周边各干旱区气候形成的作用不同(刘晓东等, 2013)。例如, Zhang R 等(2012)模拟研究了高原南部和北部单独隆升的气候效应, 发现高原北部隆升对东亚夏季风增强和北部降水增加有重要影响, 而高原南部隆升主要增强印度季风降水。Shi 等(2011)利用包含沙尘循环过程的全球气候模式通过削减青藏高原北部地形的试验发现, 高原北部隆升能够造成亚洲内陆干旱区面积扩大及大气粉尘含量显著增加。Liu 等(2015)利用高分辨率区域气候模式的系列试验表明, 晚中新世以来青藏高原北部地形由低到高、高原北侧及西北侧内陆沙漠从无到有的发展导致亚洲内陆干旱化和沙尘循环加剧。帕米尔高原的隆升通过封闭西风环流带来的水汽通道加剧了塔里木盆地的干旱化(Sun, et al, 2018), 而天山的隆升对中—东亚冬雨区的分布有着至关重要的作用(Sha, et al,

2018)。

新生代以来在青藏高原隆升过程中也发生了明显的海陆变迁,其中印度板块和澳大利亚板块的向北移动最为显著。因此,在研究青藏高原隆升气候效应时,应同时考虑大陆漂移背景下海陆分布和古地理格局的变化。例如,Zhang Z S等(2012)基于重建的早始新世古地理边界条件,利用海-气耦合模式的模拟表明,早始新世亚洲主要为草原/沙漠气候,但在轨道强迫影响下东亚季风可能会间歇性出现。刘晓东等(2019)利用一个全球海-气耦合模式针对新生代以来5个特征地质时期系统地探讨了大陆漂移和高原隆升对亚洲和澳大利亚季风起源和演化的影响,结果表明南亚与东亚季风的形成时间和原因明显不同。南亚季风在始新世印度大陆移入北半球热带后即开始出现,而东亚季风到中新世才建立。南亚和澳大利亚热带季风的建立是由大陆漂移的位置和热带辐合带季节性迁移共同决定的,而东亚季风的建立则主要受控于青藏高原的高度和纬度。亚洲副热带干旱区的存在取决于大陆的位置和行星尺度副热带高压的控制,而亚洲内陆中纬度干旱区的形成则是青藏高原隆升的结果。

从对中国多时间尺度古气候变化研究的回顾可以清晰地看到,中国学者在古气候领域取得了丰硕的成果。从历史时期到全新世,再到第四纪和新生代,中国学者利用丰富的历史文献和自然档案,结合现代科学技术手段,系统地揭示了过去气候变化的特征和规律。这些研究不仅深化了对中国区域气候历史演变的认识,也为全球气候变化研究提供了重要的参考和借鉴。

7 非线性大气动力学

非线性大气动力学作为大气科学的一个重要分支,致力于揭示大气运动过程中复杂的非线性现象和机制。大气运动本质上是非线性的,其过程和现象往往不能用简单的线性模型来准确描述。随着非线性科学的发展,越来越多的研究表明,大气中的许多重要现象,如飚线、阻塞高压、切断低压等,都与非线性动力学密切相关。因此,深入研究非线性大气动力学,不仅有助于更准确地理解大气运动的本质,还能为天气预报和气候预测提供新的理论和方法。文中全面回顾中国学者在非线性大

气动力学领域的研究成果,重点介绍大气非线性动力特征、条件非线性最优扰动、非线性技术在气候变化中的检测应用、阻塞非线性动力学以及非线性局部Lyapunov指数等方面的研究进展。

7.1 大气非线性动力特征与方法

大气运动本质上是非线性的,大气运动的过程和现象与非线性密切相关,可以用非线性方程刻画(刘式达等,1989;丑纪范等,1994;李建平等,2003)。例如,飚线的形成是由于重力波的非线性集中导致的(李麦村,1976),飚线的形成与演化可以归结为一类由科特韦赫-德弗里斯方程(Korteweg-De Vries, KdV)所描述的大气孤立波(李麦村,1981;李麦村等,1984)。大气中的阻塞高压和切断低压可以用罗斯贝孤立波解释(巢纪平等,1980;刘式适等,1982;罗德海,1999)。大气运动的控制方程可以约化得到非线性波动方程(巢纪平等,1980;李麦村,1981;刘式适等,1982;李麦村等,1984;伍荣生,1985),由此可以系统研究地球流体中的非线性波问题(刘式适等,1982,1988;Liu, et al, 1985),确定大气非线性波动的共同特征,系统归纳重要非线性方程的显式行波解(刘式适等,1982,1998)。同时,刘式适等人提出了非线性演化方程求解的Jacobi椭圆函数展开法(Fu, et al, 2001;Liu S K, et al, 2001),应用此方法求得了很多非线性演化方程的准确周期解和包络周期解,并获得了由Lame函数表征的多级准确解(Liu, et al, 2004),提高了对大气运动基本结构的求解方法与结构多样性的认识。

大气运动既具有确定性的部分也具有随机性的扰动(周秀骥,2005),即 $x(t)=x_{lr}(t)+x'(t)$,其中 $x_{lr}(t)$ 代表确定性部分, $x'(t)$ 代表随机扰动。 $x'(t)$ 既有短程相关(Hasselmann, 1976; von Storch, et al, 1999),也具有长程相关(Hurst, 1951; Mandelbrot, et al, 1968; Bunde, 2023)。由于实际大气运动同时具有确定性与随机性,区分与量化短程或长程记忆性依赖于所选择的方法与基于的假设前提。对于有限数据长度的观测,多重分形去趋势波动分析(Multifractal Detrended Fluctuation Analysis, m-DFA)是相对比较有效的方法,可以区分长、短程记忆过程,也可以量化记忆强度(Gong, et al, 2023)。在准确量化长程记忆性强度的基础上,才能准确量

化确定性趋势的不确定度与信度区间(Wang, et al, 2021; Yuan, et al, 2022)、厘清趋势的自然与人为源(Yuan, et al, 2023)。在长程记忆的假设下,借助于分数阶微分与积分技术,刘式达等建立了长程记忆性的理论基础与提取方法(刘式达等, 2013; Yuan, et al, 2013, 2014, 2023),该方法可以有效分离自然与人为强迫对于趋势变化的贡献(Yuan, et al, 2023)。

大气观测资料记录了大气运动的演化信息,从观测数据序列可以提取大气运动的时间序列可预报性或潜在可预报性(李建平, 2008; Ding, et al, 2011; Huang, et al, 2019; Duan, et al, 2023)。借助于分数阶微分与积分技术,分离出大气运动内部随机变率的由长程记忆性导致的可预报分量(Yuan, et al, 2014, 2023),从而进一步确定可预报性的来源(Nian, et al, 2020)。机器学习结合非线性动力系统的状态空间延迟嵌入可以极大提高系统不完全观测的预报期限,与优化的相似态预测方法相比,提高了近一倍(Huang Y, et al, 2023),为天气气候可预测性研究提供了新视角。

7.2 条件非线性最优扰动及其在气候可预报性研究中的应用

自 20 世纪 90 年代起,国际上众多研究采用奇异向量(SV; Lorenz, 1965)线性方法研究初始误差增长动力学,揭示对预报结果有最大影响的初始误差(Farrell, 1990; Palmer, et al, 1998)。但是,线性理论的先天不足使其不能阐明天气气候产生显著预报误差的非线性机制(Mu, 2000)。

为克服 SV 的线性局限性, Mu 等(2003)提出了条件非线性最优扰动(CNOP)方法。CNOP 描述满足一定物理约束条件,且在预报时刻具有最大非线性发展的初始扰动。CNOP 已被用于寻找 ENSO 和 MJO 事件的最优前期征兆(Duan, et al, 2004; Wei Y T, et al, 2019)、揭示用于识别热带气旋、ENSO 和 IOD 等高影响海气事件目标观测敏感区的最快增长初始扰动(Mu, et al, 2009, 2017; Qin, et al, 2013, 2014; Duan, et al, 2018)、探讨导致 ENSO 和 IOD 事件季节预报障碍的最快增长初始误差(Mu, et al, 2007; Duan, et al, 2018; Liu D, et al, 2018),以及研究热盐环流和陆地生态系统的稳定性和敏感性(Mu, et al, 2004; Sun, et al, 2014;

Zu, et al, 2016)。这些工作阐明了特定空间结构初始误差、环境场和非线性共同导致高影响海气事件显著预报误差的新机制,揭示了大气海洋可预报性研究中考虑非线性影响的重要性。

Mu 等(2010)将最初代表最快增长初始误差的 CNOP(以下称 CNOP-I),拓展为探讨最快增长模式参数误差的 CNOP-P。CNOP-P 随后被应用于揭示对陆面过程模拟具有最大影响的参数组合,表明通过目标观测优先减小该参数组合的误差,能够更大程度提高陆面过程的模拟能力和预测技巧(Sun, et al, 2020, 2022, 2023; Ren, et al, 2023)。考虑到区域模式边界条件的不确定性, Wang 等(2015)发展了能够揭示对预报不确定性具有最大影响的边界条件误差的 CNOP-B 方法,而 Duan 等(2013)提出非线性强迫奇异向量(NFSV)方法,用于研究不同来源模式误差对预报不确定性的最大综合影响,亦即 CNOP-F,从而形成了包括 CNOP-I、-P、-B 和 -F 的 CNOP 完整家族(Wang, et al, 2020)。

CNOP-F 已被用于揭示对 ENSO 预报不确定性具有最大影响的模式倾向误差,并据此识别了若干 ENSO 模式的模式误差敏感区(Duan, et al, 2015; Tao, et al, 2020);根据该敏感性, Tao 等(2019)发展了用于抵消初始误差和模式误差综合影响的 NFSV-同化方法, Tao 等(2022)将其应用于 ENSO 预测试验,有效减弱了春季预报障碍的影响,显著提高了在 ENSO 预测中识别厄尔尼诺类型的能力(Duan, et al, 2022)。目前, NFSV-同化已被应用于 ENSO 实时预测,且取得了令人满意的效果(Duan, et al, 2022; Liu T, et al, 2023)。

近年来,伴随着极端天气气候事件增多, CNOP 被逐步应用于探讨极端冷事件和高温热浪事件的可预报性。利用 CNOP-I 方法, Li C X 等(2023)识别了格陵兰海、巴伦支海和鄂霍茨克海海冰是极端乌拉尔阻塞事件次季节预测的目标观测敏感区,通过影响中纬度大气环流影响东亚极端冷事件的预报(Gao, et al, 2023), Han 等(2023)发现北极对流层大气不确定性通过正压不稳定性机制影响中纬度大气的次季节预报, Li 等(2024)表明北极平流层大气通过能量下传到对流层而影响中纬度大气环流;利用 CNOP-P, Zhang Q Y 等(2024)发现地表感热和潜热通量误差,特别是植被冠层与冠层空气之

间的通量交换,是产生热浪次季节预报不确定性的主要原因。这些研究进一步证实了特定空间结构初始误差、环境场和非线性共同导致显著预报误差新机制的科学性,为发展提高极端事件次季节预报水平的新技术提供了理论依据。

7.3 非线性技术在气候变化中的检测应用

大气科学包含了多个圈层、系统且以非常复杂的方式进行相互作用,存在初值不稳定、多尺度、互馈作用显著等非线性特征(丑纪范, 2002)。近年来,非线性学科的发展与应用成为推动大气科学发展的关键力量,帮助科学家们揭示了大气系统的复杂性和多样性,在天气、气候、环境监测预测研究领域发挥了重要作用。

观测数据是研究气候变化、监测、预测的重要依靠,其具有非线性、多层次结构和非平稳性特征(封国林等, 2006a),分维数(Hou, et al, 2018a)、复杂度(侯威等, 2005b)、Lyapunov指数(陈宝花等, 2006)、复杂网络(周磊等, 2008; 何苏红等, 2017; Qiao, et al, 2022)、熵(封国林等, 2006b; 侯威等, 2006; 冯爱霞等, 2011; 张志森等, 2013)等常被用于检测和描述观测数据的非线性特征。在此基础上,进一步刻画并研究气候系统的可预报性(何文平等, 2006; He, et al, 2021; Yang, et al, 2023; Zhao, et al, 2023),通过主成分分析(王阔等, 2012; 王启光等, 2012)、相似演化(王启光等, 2014)等技术确定可预报分量并形成延伸期尺度和次季节尺度的预报策略(郑志海等, 2012, 2013; Yu, et al, 2014; Gong, et al, 2016; Tang S K, et al, 2022)。其中动力-统计集成的季节气候预测系统(FODAS)正是在此基础上建成的,显著提升了中国汛期降水预测的准确性和可靠性(封国林等, 2013; Wang, et al, 2019)。

全球气候变化背景下,气候突变事件和极端事件变得愈加频繁,成为气象高致灾驱动因素之一。对于前者,传统的突变检测方法根据序列在不同时段统计量存在的差异来确定突变点位置,包括低通滤波法、滑动 T 检验(MTT)、Mann-Kendall(MK)、Spearman法等(魏凤英, 1999)。而序列不同时段的非线性特征的改变也能够用于突变检测,如启发式分割(BG)算法(封国林等, 2005)、近似熵和滑动移除近似熵(MC-ApEn)(何文平等, 2011; 金红梅

等, 2012; 刘群群等, 2015; Jin, et al, 2016),重标极差和滑动移除重标极差(MC-R/S)(何文平等, 2010)、复杂度(侯威等, 2005a),去趋势波动分析(He, et al, 2008)、以及基于偏度和峰度(成海英等, 2012; Qian, et al, 2015; Xie, et al, 2019)的突变检测方法等。近年来,还将突变点拓展为突变过程(颜鹏程等, 2014),即开展了渐变过程的检测技术研究(Yan, et al, 2015; Yan, et al, 2016)。另一方面,根据“涨落理论”和“临界慢化理论”,突变的一些早期预警信号也被发掘并应用于气候突变及灾害性预警研究(颜鹏程等, 2012; Wu, et al, 2021; 吴浩等, 2022)。

极端事件包含天气事件和气候事件,是天气气候状态严重偏离平均态的现象,属于统计上的小概率事件。给定阈值或百分位是常用的确定极端事件阈值的方法,但是难以区分是系统自然波动还是外强迫造成的。随机重排去趋势波动分析法能够有效甄别出因强迫造成的极端事件(侯威等, 2011, 2012)。针对极端事件的长期变化研究发现其存在长程相关性(Dong, et al, 2021),特别是极端高温、极端低温中的长程相关比较明显(封国林等, 2009a)。从区域性来看,极端事件往往还存在群发性(杨萍等, 2010; 赵俊虎等, 2012; 钱忠华等, 2020)、早发性的特点(Zang, et al, 2021, 2023)。近年来,也有研究开展了破纪录事件的模拟(熊开国等, 2009)和预测(封国林等, 2009b; 杨杰等, 2010)方面的探索性工作,为极端事件(特别是气温和干旱)的预测提供了有益思路。

7.4 阻塞非线性动力学和非线性多尺度相互作用(NMI)模式

大气阻塞是产生在中高纬度地区的准定常和持续较长(10—20 d)的大尺度环流结构,它的出现和维持对极端天气(如冬季极寒和夏季热浪等)产生的区域、强度和范围有重要影响,因此研究大气阻塞形成和变化的机理对于理解和预测极端天气的发生具有重要的科学意义。自从1949年大气阻塞被发现以来,阻塞的动力学研究已取得了很多重要进展。

Yeh (1949)提出了罗斯贝波频散理论,发现罗斯贝波的能量频散正比于 β (科式参数的经向梯度)($C_{gp}\beta$),因此可以推测纬度越高,罗斯贝波的能量

频散越弱,这可以解释为什么阻塞容易产生在高纬度地区且持续时间越长。然而该理论无法解释为什么阻塞不容易在极地区($\beta=0$)产生。另外由于该理论是线性的,无法给出阻塞的生命过程和空间结构。随后很多学者对大气阻塞的动力学机制开展了大量研究,提出了许多理论,如 Charney 等 (1979) 提出的多平衡态理论, Tung 等 (1979) 提出的地形波共振理论, McWilliams (1980) 提出的 Modons 理论以及 Shutts (1983) 提出的天气尺度涡变形理论。最近, Nakamura 等 (2018) 提出了有限振幅波活动 (Finite Amplitude Local Wave Activity, LWA) 通量来诊断局地大气阻塞是如何产生的。尽管这些动力和诊断取得了许多结果,但仍无法解释大气阻塞的演变过程以及空间分布。事实上,极端天气的产生和强度与大气阻塞的维持和变化密切相关,然而以前的这些理论无法建立起气候变化如何通过影响大气阻塞而影响极端天气。

基于尺度分离假设 (Luo, 2000, 2005), 通过引入背景经向位涡梯度 (PVy), Luo 等提出了描述大气阻塞生命过程的非线性多尺度相互作用 (NMI) 模式 (Luo, et al, 2019, 2020; Zhang, et al, 2020)。NMI 模式最大的优点是能给出阻塞的周期、强度和移动等 10—20 a 的变化。在 NMI 模式中, 阻塞系统的频散性 (C_{gp}) 正比于 PVy, 即 $C_{gp} \sim PVy$, 而阻塞系统的非线性 (δ) 反比于 PVy, 即 $\delta \sim 1/PVy$ 。当 PVy 较小时, 大气阻塞可以维持长寿命, 大的纬向尺度, 慢的东移和衰减, 但 PVy 不能太小即 $PVy \neq 0$ 。也就是说影响大气阻塞变化的 PVy 存在一个阈值, 这可解释北极与中纬度天气之间的联系存在一个很大的不确定性。与 Yeh (1949) 能量频散理论很大不同的是 NMI 理论还能解释大部分阻塞不能在极地产生的原因 (即 $PVy \sim 0$ 不允许阻塞形成)。然而若气候变化能改变 PVy 并在极地较小 ($PVy \neq 0$) 时, 那大气阻塞也有可能在极地地区产生。若气候变化使得较低纬度地区 PVy 变小, 那么低纬度地区也可能产生大气阻塞, 这是传统的能量频散理论无法解释的。因此 NMI 模式 PVy 理论可以用来研究气候变化如何通过影响大气阻塞的变化而影响极端事件, 如图 4 所示。

虽然 PVy 的大小主要控制大气阻塞的生命时间和强度, 然而阻塞的移动主要与基本西风,

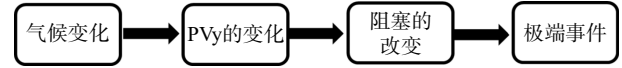


图 4 在 NMI 模式中, 气候变化 (如北极放大, PDO 和 AMO 等) 通过影响背景经向位涡梯度 (PVy) 的大小而影响大气阻塞和极端事件变化的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of climate change influencing atmospheric blocking and weather extremes via altering the background dispersion medium and blocking parameters (i.e., lifetime, zonal scale, movement, and intensity) in the NMI model

PVy 的大小和阻塞振幅有关, 其非线性移动速度公式可以表示为

$$C_{NP} = U - \frac{PV_y}{k^2 + m^2 + F} - \frac{\delta_N M_0^2}{2kPV_y} \quad (1)$$

式中, U 是基本西风, k 是纬向波数, F 是层结参数, M_0 是阻塞的振幅, δ_N 为非线性项 (Luo, et al, 2019)。

当阻塞振幅较小 ($M_0 \sim 0$) 时, 则有

$$C_{NP} \approx C_P = U - \frac{PV_y}{k^2 + m^2 + F} \quad (2)$$

因此公式 C_{NP} 是线性罗斯贝公式的推广。当阻塞振幅越大, 阻塞越容易西退。在正压大气中, 无量纲的 PVy 可以表示为

$$PVy = \beta - U_{yy} + FU \quad (3)$$

对于斜压层结大气, 无量纲的 PVy 可以表示为

$$PVy = \beta - U_{yy} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_0 F_r \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中, $\rho_0 = \rho_s e^{-z}$, ρ_s 是地面的大气密度, $F_r = \frac{\tilde{L}^2 f_0^2}{N^2 \tilde{H}^2}$, $\tilde{L} = 1000 \text{ km}$, $\tilde{U} = 10 \text{ m/s}$ 和 $\tilde{H} = 10 \text{ km}$ 是大气的特征值, 其他符号则是气象上常用的符号。

7.5 非线性局部 Lyapunov 指数及其在可预报性与集合预报研究中的应用

自从 Thompson (1957) 和 Lorenz (1963) 关于大气可预报性的开创性工作以来, 大气系统中存在可预报性的问题已经成为一个不能回避的事实 (李建平, 2003)。如何定量地估计大气可预报性期限成为十分重要的研究课题。在传统的可预报性研究中, Lyapunov 指数是度量混沌系统可预报期限的一个基本物理量 (Wolf, et al, 1985)。然而, 由于非线性处理的困难, Lyapunov 指数的定义是基于线性误差增长理论, 在研究大气等复杂非线性系

统的可预报性时存在很大的局限性(Ding R Q, et al, 2007)。

为了克服传统 Lyapunov 指数的局限性,在大气吸引子理论和全局分析理论(Li, et al, 1997a, 1997b, 1997c, 2003; 李建平等, 1998a, 1998b)的基础上,李建平等(2006)提出了非线性局部 Lyapunov 指数(NLLE)方法,并证明了对于混沌系统而言相对误差增长随时间发展的“饱和定理”(Chen, et al, 2006; Ding R Q, et al, 2007)。Li J Y等(2018)提出了吸引子半径的概念来衡量系统误差增长饱和值特征。NLLE 表征非线性系统有限时间内的误差平均增长率,其优势在于能够定量地描述可预报性的非线性、局地性、随时间演化特征。对高度非线性的大气、海洋系统, NLLE 方法不仅仅在理论上克服了 Lyapunov 指数的线性局限性,而且可以直接利用观测资料定量估计实际大气、海洋可预报性,弥补了可预报性估计依赖于数值模式的不足,为定量估计天气、气候的可预报期限提供了新方法(丁瑞强等, 2009; Li, et al, 2011)。Li J P等(2007)提出了 NLLE 谱的概念和计算方法。NLLE 方法已被用于定量估计台风、热带大气季节内振荡、季风、ENSO、平流层准两年振荡、北太平洋年代际振荡、大西洋多年代际振荡等不同时间尺度的天气、气候现象的可预报期限(Ding, et al, 2010, 2011, 2016; Li, et al, 2011; Ai, et al, 2017; Hou, et al, 2018a, 2022a, 2024; Zhong, et al, 2018a, 2018b; 胡榕等, 2024)。NLLE 方法还被应用于业务天气和气候模式预报误差的订正,显著提高了产品的确定性和概率性预报技巧(Hou, et al, 2020, 2021, 2022b; Lu, et al, 2023)。

为了研究极端天气、气候事件发生之前(过去)的误差增长和可预报期限, Li等(2019)进一步提出了向后可预报性的新概念,发展了向后非线性局部 Lyapunov 指数(BNLLE)方法,为定量估计极端天气、气候事件被提前预报出来的时间提供了有效的方法。Li X等(2020)首先将 BNLLE 方法应用于理论模型中,研究了 Lorenz-63 模型中极端冷状态和暖状态的可预报性。随后, BNLLE 方法被应用于 2019 年夏季欧洲地区的两次极端高温事件可预报性研究,发现 2 次极端高温分别可以提前 11 天和 9 天被预报出来(Li X, et al, 2023)。此外, Li C

X等(2023)利用 BNLLE 方法还研究了 2009—2018 年华南地区热浪事件可预报性,定量估计了华南热浪事件的可预报期限最低 4 d,最高的可预报期限可达 12 d,并从热浪事件预报误差增长动力特征的角度揭示了导致华南热浪事件可预报性差异的原因。Li等(2025)也分析了海气系统年代际可预测性的特征。

外强迫条件的不确定性所引起预报结果的不确定性是实际天气预报和气候预测关心的可预报性问题。Li等(2015)将 NLLE 方法进一步拓展为考虑外强迫因子影响的条件非线性局部 Lyapunov 指数(CNLLE)方法(Li, et al, 2015)。CNLLE 能够定量度量外强迫对可预报性的影响,从而为定量度量外强迫因子对大气可预报期限的贡献提供了一个新工具。Zhang M等(2024)利用一个耦合 Lorenz 模型,发现相比于传统信噪比方法只能定性给出外强迫对可预报性影响的大小, CNLLE 方法可以获得外强迫条件下缓慢误差增长过程,从而实现定量估计外强迫的可预报性贡献。进一步, Zhang M等(2024)基于实际观测资料,利用 CNLLE 方法估计了 ENSO 对海温场和大气中的海平面气压场与位势高度场的可预报时效的贡献,结果表明 ENSO 对海洋和大气的可预报性贡献主要集中在热带海气相互作用强烈的区域,并可以通过遥相关影响到热带外部分区域。

近年来,作为减少预报结果不确定性、提高预报技巧的重要手段,集合预报的研究和应用越来越受到重视。Feng J等(2014)将 NLLE 方法进行多维拓展,提出了非线性局部 Lyapunov 向量(NLLV)的集合预报初始扰动方法,其具有如下优点:(1)不做线性近似,充分考虑了非线性过程的影响;(2)计算不需要切线性和伴随模式,简单、省时;(3)扰动成员间严格正交、独立性好。NLLV 方法的优点弥补了传统奇异向量法(SV)和繁殖向量法(BV)的不足,是一个具有较高预报技巧且计算成本较小的集合预报初始扰动方法(Feng, et al, 2016, 2018; Ding, et al, 2017)。目前, NLLV 方法已被应用于台风和 ENSO 的集合预报试验(Hou W, et al, 2018)。结果显示, NLLV 能有效为集合预报提供独立样本,能够有效提高集合预报的预报技巧,明显优于传统的 SV 和 BV 方法。与近年来国际上最

新发展起来的集合变换卡尔曼滤波(ETKF)方法相比,NLLV方法也有较高的预报技巧和较小的计算代价。作为非线性动力学的拓展,Wang等(2024)将非线性动力学理论与深度学习方法进行有机结合,提出了由动力-数据-物理驱动的深度学习方法,不仅显著提高了对混沌动力系统的预测能力,而且对理解和预测自然界和人类世界中复杂的混沌动力系统具有十分重要的应用意义。

对中国学者在非线性大气动力学领域研究成果大回顾可以清晰地看到,他们在该领域取得了显著进展。不仅深入研究了大气运动的非线性动力特征,提出了多种非线性方程和求解方法,还创新性地发展了条件非线性最优扰动理论,为气候可预报性研究提供了新的视角。同时,非线性技术在气候变化检测、阻塞非线性动力学以及大气可预报性估计等方面的应用,也取得了令人瞩目的成果。这些研究成果不仅丰富了非线性大气动力学的理论体系,还为天气预报和气候预测提供了重要的科学依据和技术支持,对国际相关领域做出了突出贡献。

8 大气环流和气候系统动力学研究展望

大气环流是地球气候系统的重要组成部分,对全球天气和气候变化具有至关重要的作用。近年来,中外在大气环流及气候系统动力学研究方面取得了重要进展,新技术和新方法的不断涌现,为揭示大气和气候系统内部复杂相互作用提供了更广阔的可能性。展望未来,中国学者可在多个方向展开深入研究,以推动理论和应用创新,并加强国际合作交流。

高分辨率观测与多源数据融合将在未来研究中发挥关键作用。随着卫星遥感、地面自动观测站及再分析数据的不断完善,未来利用高分辨率数据可捕捉遥相关现象、季风环流及气候系统的时空演变特征。通过多源数据融合,构建可靠的大气和气候系统观测体系,为理解大气环流及气候动力学提供坚实的数据支持。同时,大气环流及其遥相关现象涉及从天气、季节到年代际及更长期的多尺度相互作用,因此跨尺度动力学耦合机制的研究将进一步深入。未来的研究将重点关注基本气流、热力反馈、海气相互作用等因素在大气环流及气候系统演变中的作用。尤其是通过高分辨率数值模拟,探讨

青藏高原动力和热力作用、极端天气事件形成机制,以及海-陆-气交互作用对季风系统和全球环流的影响。天气、气候事件往往受到多个气候因子的影响,而协同理论方法可用于定量解释复杂气候系统中多因子与极端天气气候的非线性关系,为此,发展并使用协同理论进行极端天气气候分析是当前及未来重要的研究方向。数值模式改进与数据同化技术的应用将提升预测能力。为更准确模拟和预报大气环流和气候系统演变,未来需进一步优化高分辨率气候模式和数值天气预报模式,改进参数化方案。结合先进的数据同化技术,融合实时观测数据,利用先进的非线性动力学方法,提高模式初始场的准确性,并构建集合预报系统,进而提高对天气和气候异常事件的预报能力。

在全球变暖背景下,遥相关、季风系统及整体气候系统动力学的变化趋势成为关注重点。结合历史重建和模式模拟,定量分析温室气体浓度增加、冰盖变化、海洋状态异常等因素对大气环流及季风系统的影响,进一步评估气候变化的调控机制及其对全球气候系统的长期影响是未来重要的研究方向。青藏高原作为全球气候系统的重要组成部分,对亚洲季风、极端天气事件及全球环流均具有深远影响。未来的研究将着重加强该区域的高分辨率观测网络建设,改进模式模拟能力,并探讨在全球变暖背景下高原强迫对大气环流及全球气候变化的影响。

未来,中国学者在非线性动力学领域的研究可聚焦于大气环流和气候系统内部的非线性相互作用及天气、气候可预测性。基于非线性动力学,探究和揭示动力系统的非线性误差增长结构和天气、气候可预测性,特别是 ENSO 及相关遥相关型、急流变化和极端事件可预测性及触发机制等方面,是未来重要的研究方向。通过非线性动力学理论,揭示外强迫对次季节-季节-年际-年代际等多种尺度气候因子可预测性的影响也将不断深入。同时,数据同化与机器学习技术的融合将推动复杂气候系统的非线性定量刻画,为改进数值模式提供新思路。未来,发展适用于非线性系统的理论框架,结合观测、理论和数值模拟,将是提升中国在该领域国际影响力的关键。

人工智能和机器学习技术在大气环流和气候

系统动力学研究中的应用前景广阔。深度学习与大数据分析有助于自动识别和提取复杂气候系统中的遥相关信号,提高气候预测的时效性和准确性。如何将传统动力学理论与现代机器学习技术结合,利用数据驱动直接从观测中提取有效信息,同时弥补现代机器学习在挖掘系统的物理性方面的不足,从而发展和构建动力可解释性的预测模型,深度挖掘数据背后的动力系统内在属性,以提升模拟的精度,这是当前及未来重要的研究方向。此外,在古气候研究领域,加强多代理高分辨率重建、古气候模拟与模式验证,并结合人类活动影响的研究,发展更加稳定和适用的气候指标体系,也将为理解气候系统的长期变化规律提供重要参考,提高对天气气候异常事件的预测能力。同时,跨学科交叉与国际合作将成为推动研究深入的重要方式,通过大气科学、海洋科学、生态学等学科的融合,构建先进理论和方法,主持国际科学研究计划,中国学者将在全球气候研究领域发挥更大的作用。

总体而言,未来中国学者可在高分辨率观测、多尺度耦合、数值模式改进、气候变化机制研究与影响评估、非线性动力学和人工智能应用及跨学科交叉与国际合作等多个方面持续推进。通过多角度的深入研究,不仅能深化对大气环流及气候系统动力学的理解,还将提升中国在天气气候预测、防灾减灾和全球气候治理等方面的科学支撑能力,为国际大气科学和气候变化研究贡献更具中国特色的成果。

参考文献

安芷生, 吴锡浩, 卢演涛等. 1990. 最近 2 万年中国古环境变迁的初步研究 // 刘东生, 黄土、第四纪地质、全球变化(第二集). 北京: 科学出版社, 1-26. An Z S, Wu X H, Lu Y C, et al. 1990. Preliminary study on the paleo environmental changes in China during the last 20,000 years // Liu D S. Loess, Quaternary Geology, and Global Change (Volume Two). Beijing: Science Press, 1-26 (in Chinese)

安芷生, 吴锡浩, 汪品先等. 1991. 最近 130ka 中国的古季风——II. 古季风变迁. *中国科学(B辑)*, 21(11): 1209-1215. An Z S, Wu X H, Wang P X, et al. 1991. The paleo monsoon in China during the last 130ka. II. Paleo monsoon variations. *Sci China Ser B*, 21(11): 1209-1215 (in Chinese)

敖康顺, 耿新, 张文君等. 2024. 东亚冬季风指数对中国冬季气候变化表征能力的对比分析. *气象学报*, 82(2): 168-189. Ao K S, Geng X, Zhang W J, et al. 2024. Comparative analysis of the performance of East Asian

winter monsoon indices in capturing winter climate change over China. *Acta Meteor Sinica*, 82(2): 168-189 (in Chinese)

巢纪平, 黄瑞新. 1980. 旋转正压大气中的椭圆余弦(Cnoidal)波. *中国科学*, 10(7): 696-705. Chao J P, Huang R X. 1980. Elliptic cnoidal waves in rotating barotropic atmosphere. *Sci China*, 10(7): 696-705 (in Chinese)

陈宝花, 李建平, 丁瑞强. 2006. 非线性局部 Lyapunov 指数与大气可预报性研究. *中国科学 D 辑 地球科学*, 36(11): 1068-1076. Chen B H, Li J P, Ding R Q. 2006. Nonlinear local Lyapunov exponent and atmospheric predictability research. *Sci China Ser D Earth Sci*, 49(10): 1111-1120

陈海山, 周晶. 2013. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 II. 敏感性试验分析. *大气科学*, 37(1): 1-13. Chen H S, Zhou J. 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part II: Sensitivity experiment analysis. *Chinese J Atmos Sci*, 37(1): 1-13 (in Chinese)

陈烈庭. 1977. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响. *大气科学*, 1(1): 1-12. Chen L T. 1977. The effects of the anomalous sea-surface temperature of the equatorial Eastern Pacific Ocean on the tropical circulation and rainfall during the rainy period in China. *Chinese J Atmos Sci*, 1(1): 1-12 (in Chinese)

陈烈庭, 阎志新. 1981. 青藏高原冬春季异常雪盖影响初夏季风的统计分析 // 长江流域规划办公室. 中长期水文气象预报文集第二集. 北京: 长江流域规划办公室, 133-141. Chen L T, Yan Z X. 1981. Statistical analysis of the impact of abnormal winter and spring snow cover on the early summer monsoon over the Tibetan Plateau // Yangtze River Basin Planning Office. Medium and Long-Term Hydrometeorological Forecasting (2). Beijing: Yangtze River Basin Planning Office, 133-141 (in Chinese)([查阅网上资料, 未找到出版地信息, 请确认](#))

陈烈庭, 詹志强. 1984. 北太平洋东西部气压距平的遥相关. *科学通报*, 29(8): 481-483. Chen L T, Zhan Z Q. 1984. Teleconnection of sea level pressure anomalies between the eastern and western North Pacific. *Chinese Sci Bull*, 29(8): 481-483 (in Chinese)

陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦等. 1991. 东亚季风. 北京: 气象出版社. Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al. 1991. East Asian Monsoon. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)

陈隆勋, 丁一汇, 村上胜人等. 1999. 亚洲季风机制研究新进展. 北京: 气象出版社, 1-334. Chen L X, Ding Y H, Murakami M, et al. 1999. New Advances in the Study of Asian Monsoon Mechanisms. Beijing: China Meteorological Press, 1-334 (in Chinese)

陈隆勋, 张博, 张瑛. 2006. 东亚季风研究的进展. *应用气象学报*, 17(6): 711-724. Chen L X, Zhang B, Zhang Y. 2006. Progress in Research on the East Asian Monsoon. *J Appl Meteor Sci*, 17(6): 711-724 (in Chinese)

陈尚锋, 陈文. 2016. 北极涛动对 ENSO 影响的研究进展. *气象科技进展*, 6(5): 6-13. Chen S F, Chen W. 2016. Progress in the study of the influence of arctic oscillation on ENSO. *Adv Meteor Sci Technol*, 6(5): 6-13 (in Chinese)

陈受钧, 陶祖钰. 2007. 谢义炳对大气环流系统研究的贡献. *气象学报*,

- 65(5): 665-672. Chen S J, Tao Z Y. 2007. Academician xie Yibing's contribution of the atmospheric circulation systems—a review. *Acta Meteor Sinica*, 65(5): 665-672 (in Chinese)
- 成海英, 何文平, 何涛等. 2012. 基于概率密度分布型变化的突变检测新途径. *物理学报*, 61(3): 039201. Cheng H Y, He W P, He T, et al. 2012. A new approach to abrupt change detection based on change of probability density distribution. *Acta Phys Sinica*, 61(3): 039201 (in Chinese)
- 丑纪范, 刘式达, 刘式适. 1994. 非线性动力学. 北京: 气象出版社. Chou J F, Liu S D, Liu S S. 1994. *Nonlinear Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 丑纪范. 2002. 大气科学中的非线性与复杂性. 北京: 气象出版社. Chou J F. 2002. *Nonlinearity and Complexity in Atmospheric Science*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 戴念军, 谢安, 张勇. 2000. 南海夏季风活动的年际和年代际特征. *气候与环境研究*, 5(4): 363-374. Dai N J, Xie A, Zhang Y. 2000. Interannual and interdecadal variations of summer monsoon activities over South China Sea. *Climatic Environ Res*, 5(4): 363-374 (in Chinese)
- 丁瑞强, 李建平. 2009. 天气可预报性的时空分布. *气象学报*, 67(3): 343-354. Ding R Q, Li J P. 2009. The temporal spatial distributions of weather predictability of different variables. *Acta Meteor Sinica*, 67(3): 343-354 (in Chinese)
- 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈等. 2007. 中国气候变化的检测及预估. *沙漠与绿洲气象*, 1(1): 1-10. Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. 2007. Detection, attribution and projection of climate change over China. *Desert Oasis Meteor*, 1(1): 1-10 (in Chinese)
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测. *大气科学*, 37(2): 253-280. Ding Y H, Sun Y, Liu Y Y, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change. *Chinese J Atmos Sci*, 37(2): 253-280 (in Chinese)
- 丁一汇. 2021. 顾震潮先生在中国天气学研究中的创新思想与对建立中国现代天气预报业务的贡献. *气象*, 47(7): 773-780. Ding Y H. 2021. Mr. Gu Zhenchao's innovative thoughts in Chinese synoptic meteorology research and his contributions to the establishment of modern weather forecasting services in China. *Meteor Mon*, 47(7): 773-780 (in Chinese)
- 方修琦, 葛全胜, 郑景云. 2004. 全新世寒冷事件与气候变化的千年周期. *自然科学进展*, 14(4): 456-461. Fang X Q, Ge Q S, Zheng J Y. 2004. Cold events during Holocene and millennial climate rhythm. *Prog Nat Sci*, 14(4): 456-461 (in Chinese)
- 冯爱霞, 龚志强, 黄琰等. 2011. 全球温度场信息熵的时空特征分析. *物理学报*, 60(9): 099204. Feng A X, Gong Z Q, Huang Y, et al. 2011. Spatiotemporal analysis of information entropy of the global temperature. *Acta Phys Sinica*, 60(9): 099204 (in Chinese)
- 封国林, 龚志强, 董文杰等. 2005. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究. *物理学报*, 54(11): 5494-5499. Feng G L, Gong Z Q, Dong W J, et al. 2005. Abrupt climate change detection based on heuristic segmentation algorithm. *Acta Phys Sinica*, 54(11): 5494-5499 (in Chinese)
- 封国林, 董文杰, 龚志强等. 2006a. 观测数据非线性时空分布理论和方法. 北京: 气象出版社. Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, et al. 2006a. *Theory and Method of Nonlinear Spatiotemporal Distribution of Observational Data*. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 封国林, 侯威, 董文杰. 2006b. 基于条件熵长江三角洲温度的非线性动力学特征分析. *物理学报*, 55(2): 962-968. Feng G L, Hou W, Dong W J. 2006b. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of Yangtze River delta. *Acta Phys Sinica*, 55(2): 962-968 (in Chinese)
- 封国林, 王启光, 侯威等. 2009a. 气象领域极端事件的长程相关性. *物理学报*, 58(4): 2853-2861. Feng G L, Wang Q G, Hou W, et al. 2009a. Long-range correlation of extreme events in meteorological field. *Acta Phys Sinica*, 58(4): 2853-2861 (in Chinese)
- 封国林, 杨杰, 万仕全等. 2009b. 温度破纪录事件预测理论研究. *气象学报*, 67(1): 61-74. Feng G L, Yang J, Wan S Q, et al. 2009b. On the prediction of record breaking daily temperature events. *Acta Meteor Sinica*, 67(1): 61-74 (in Chinese)
- 封国林, 赵俊虎, 支蓉等. 2013. 动力-统计客观量化汛期降水预测研究新进展. *应用气象学报*, 24(6): 656-665. Feng G L, Zhao J H, Zhi R, et al. 2013. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical-statistical method. *J Appl Meteor Sci*, 24(6): 656-665 (in Chinese)
- 符淙斌, 滕星林. 1988. 我国夏季的气候异常与厄尔尼诺/南方涛动现象的关系. *大气科学*, 12(S1): 133-141. Fu C B, Teng X L. 1988. Climate anomalies in China associated with El Niño/Southern Oscillation. *Chinese J Atmos Sci*, 12(S1): 133-141 (in Chinese)
- 符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 2005. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(I): 主要研究成果. *地球科学进展*, 20(11): 1157-1167. Fu C B, An Z S, Guo W D. 2005. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in northern China (I): main scientific issues and achievements. *Adv Earth Sci*, 20(11): 1157-1167 (in Chinese)
- 高由禧. 1948. 中国自由大气之运行. 气象研究所集刊, 15(4). Gao Y X. 1948. The operation of free atmosphere in China. *Memoir of the National Research Institute of Meteorology. Acad Sinica*, 15(4) (in Chinese)
- 葛全胜, 郑景云, 郝志新等. 2012. 过去 2000 年中国气候变化的若干重要特征. 中国科学: 地球科学, 42(6): 934-942. Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. 2012. General characteristics of climate changes during the past 2000 years in China. *Sci China Earth Sci*, 56(2): 321-329
- 顾震潮. 1951. 西藏高原对东亚环流的动力影响和它的重要性. *中国科学*, 2(3): 283-303. Gu Z C. 1951. Influence of Tibetan Plateau on the East Asian circulation and its importance. *Sci China*, 2(3): 283-303 (in Chinese)
- 顾震潮. 1959. 我国对东亚大气环流及天气系统的研究. 天气月刊, (9): 4-8. Gu Z C. 1959. China's research on East Asian atmospheric circulation and weather system. *Wea Mon*, (9): 4-8 (in Chinese)

- 管晓丹, 石瑞, 孔祥宁等. 2018. 全球变化背景下半干旱区陆气机制研究综述. *地球科学进展*, 33(10): 995-1004. Guan X D, Shi R, Kong X N, et al. 2018. An overview of researches on land-atmosphere interaction over semi-arid region under global changes. *Adv Earth Sci*, 33(10): 995-1004 (in Chinese)
- 郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析. *地理学报*, 38(3): 207-217. Guo Q Y. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation. *Acta Geogr Sinica*, 38(3): 207-217 (in Chinese)
- 郭其蕴, 王继琴. 1988. 中国与印度夏季风降水的比较研究. *热带气象*, 4(1): 53-60. Guo Q Y, Wang J Q. 1988. A comparative study on summer monsoon in China and India. *J Trop Meteor*, 4(1): 53-60 (in Chinese)
- 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. *应用气象学报*, 5(2): 218-225. Guo Q Y. 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies China. *J Appl Meteor Sci*, 5(2): 218-225 (in Chinese)
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅等. 2003. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响. *地理学报*, 58(4): 569-576. Guo Q Y, Cai J N, Shao X M, et al. 2003. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China. *Acta Geogr Sinica*, 58(4): 569-576 (in Chinese)
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅等. 2004. 1873~2000 年东亚夏季风变化的研究. *大气科学*, 28(2): 206-215. Guo Q Y, Cai J N, Shao X M, et al. 2004. Studies on the variations of east-asian summer monsoon during A D 1873~2000. *Chinese J Atmos Sci*, 28(2): 206-215 (in Chinese)
- 何金海, 丁一汇, 高辉等. 2001. 南海夏季风建立日期的确定与季风指数. 北京: 气象出版社. He J H, Ding Y H, Gao H, et al. 2001. Determination of the Date of South China Sea Summer Monsoon Onset and the Monsoon Index. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 何苏红, 龚志强, 叶芳等. 2017. 复杂网络方法在东亚地区夏季极端降水研究中的应用. *气象学报*, 75(6): 894-902. He S H, Gong Z Q, Ye F, et al. 2017. Application of complex network method to summer extreme rainfall in East Asia. *Acta Meteor Sinica*, 75(6): 894-902 (in Chinese)
- 何文平, 封国林, 董文杰等. 2006. Lorenz 系统的可预报性. *物理学报*, 55(2): 969-977. He W P, Feng G L, Dong W J, et al. 2006. On the predictability of the Lorenz system. *Acta Phys Sinica*, 55(2): 969-977 (in Chinese)
- 何文平, 邓北胜, 吴琼等. 2010. 一种基于重标极差方法的动力学结构突变检测新方法. *物理学报*, 59(11): 8264-8271. He W P, Deng B S, Wu Q, et al. 2010. A new method of detecting abrupt dynamic change based on rescaled range analysis. *Acta Phys Sinica*, 59(11): 8264-8271 (in Chinese)
- 何文平, 何涛, 成海英等. 2011. 基于近似熵的突变检测新方法. *物理学报*, 60(4): 049202. He W P, He T, Cheng H Y, et al. 2011. A new method to detect abrupt change based on approximate entropy. *Acta Phys Sinica*, 60(4): 049202 (in Chinese)
- 侯威, 封国林, 高新全等. 2005a. 基于复杂度分析冰芯和石笋代用资料时间序列的研究. *物理学报*, 54(5): 2441-2447. Hou W, Feng G L, Gao X Q, et al. 2005a. Investigation on the time series of ice core and stalagmite based on the analysis of complexity. *Acta Phys Sinica*, 54(5): 2441-2447 (in Chinese)
- 侯威, 封国林, 董文杰. 2005b. 基于复杂度分析 logistic 映射和 Lorenz 模型的研究. *物理学报*, 54(8): 3940-3946. Hou W, Feng G L, Dong W J. 2005b. Investigation about the Lorenz model and logistic equation based on the complexity. *Acta Phys Sinica*, 54(8): 3940-3946 (in Chinese)
- 侯威, 封国林, 董文杰等. 2006. 利用排列熵检测近 40 年华北地区气温突变的研究. *物理学报*, 55(5): 2663-2668. Hou W, Feng G L, Dong W J, et al. 2006. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of North China. *Acta Phys Sinica*, 55(5): 2663-2668 (in Chinese)
- 侯威, 章大全, 周云等. 2011. 一种确定极端事件阈值的新方法: 随机重排去趋势波动分析方法. *物理学报*, 60(10): 109202. Hou W, Zhang D Q, Zhou Y, et al. 2011. Stochastically re-sorting detrended fluctuation analysis: a new method to define the threshold of extreme event. *Acta Phys Sinica*, 60(10): 109202 (in Chinese)
- 侯威, 章大全, 钱忠华等. 2012. 基于随机重排去趋势波动分析的极端高温事件研究及其综合指标的建立. *高原气象*, 31(2): 329-341. Hou W, Zhang D Q, Qian Z H, et al. 2012. Research about the extreme high temperature event and its composite index based on stochastic re-sort detrended fluctuation analysis. *Plateau Meteor*, 31(2): 329-341 (in Chinese)
- 胡裕, 李建平, 侯兆禄. 2024. 季节内印度洋-西太平洋对涛涛动对次季节-季节尺度大气可预报性的影响. *热带气象学报*, 40(1): 85-100. Hu R, Li J P, Hou Z L. 2024. Impact of the intraseasonal indo-west pacific convective oscillation on subseasonal-seasonal atmospheric predictability. *J Trop Meteor*, 40(1): 85-100 (in Chinese)
- 黄刚, 胡开明, 唐颖苏等. 2024. 从能量学角度理解气候背景场对 ENSO 热带和热带外遥相关的影响. *大气科学*, 48(1): 218-227. Huang G, Hu K M, Tang H S, et al. 2024. Understanding the influence of background mean-state field on ENSO tropical and extratropical teleconnection from an energetic perspective. *Chinese J Atmos Sci*, 48(1): 218-227 (in Chinese)
- 黄建平, 陈文, 温之平等. 2019. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇. 中国科学: 地球科学, 49(10): 1607-1640. Huang J P, Chen W, Wen Z P, et al. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Climate and climate change. *Sci China Earth Sci*, 62(10): 1514-1550
- 黄建平, 赵庆云. 2023. 青藏高原气溶胶对天气气候的影响// 吴国雄, 刘屹岷, 黄建平等. 青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应——专辑 II: 青藏高原对季风和全球气候的影响. 北京: 气象出版社, 124-162. Huang J P, Zhao Q Y. 2023. The impact of the Tibetan Plateau aerosols on weather and climate// Wu G X, Liu Y M, Huang J P, et al. Tibetan Plateau Land-Air Coupled System and Its Impacts on the Global Climate(II): The Impact of the Tibetan Plateau on Monsoon and Global

- Climate, Beijing: China Meteorological Press, 124-162 (in Chinese)
- 黄荣辉. 1984. 球面大气中行星波的波作用守恒方程及用波作用通量所表征的定常行星波传播波导. 中国科学 B 辑, 14(8): 766-775. Huang R H. 1984. Wave action conservation equation for planetary wave in a spherical atmosphere and wave guides of stationary planetary wave propagations shown by propagations shown by wave action flux. Sci China Ser B Chem Biol Agric Med Earth Sci, 27(12): 1282-1295
- 黄荣辉, 曾庆存, 杨大升. 1984. 几十年来大气环流与大尺度动力学的研究进展及 2000 年研究展望. 气象科技, (5): 1-7. Huang R H, Zeng Q C, Yang D S. 1984. Research progress on atmospheric circulation and large-scale dynamics over the past few decades and prospects for the year 2000. Meteor Sci Technol, (5): 1-7 (in Chinese)
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制. 大气科学, 12(S1): 107-116. Huang R H, Li W J. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism. Chinese J Atmos Sci, 12(S1): 107-116 (in Chinese)
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. 高原气象, 18(4): 465-476. Huang R H, Xu Y H, Zhou L T. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. Plateau Meteor, 18(4): 465-476 (in Chinese)
- 黄荣辉. 2001. 大气科学发展的回顾与展望. 地球科学进展, 16(5): 643-657. Huang R H. 2001. Review and prospects of the developments of atmospheric sciences. Adv Earth Sci, 16(5): 643-657 (in Chinese)
- 黄荣辉, 陈文, 丁一汇等. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互相互作用的研究. 大气科学, 27(4): 484-502. Huang R H, Chen W, Ding Y H, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle. Chinese J Atmos Sci, 27(4): 484-502 (in Chinese)
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系. 大气科学, 30(5): 730-743. Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system. Chinese J Atmos Sci, 30(5): 730-743 (in Chinese)
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因. 科学通报, 58(8): 617-628. Huang R H, Liu Y, Feng T. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over Eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes. Chinese Sci Bull, 58(12): 1339-1349
- 金红梅, 何文平, 张文等. 2012. 噪声对滑动移除近似熵的影响. 物理学报, 61(12): 129202. Jin H M, He W P, Zhang W, et al. 2012. Effect of noises on moving cut data-approximate entropy. Acta Phys Sinica, 61(12): 129202 (in Chinese)
- 李崇银, 黄荣辉, 杨大升等. 1995. 近几年中国大气动力学的主要进展. 气象学报, 53(3): 260-270. Li C Y, Huang R H, Yang D S, et al. 1995. New advances of atmospheric dynamics in China. Acta Meteor Sinica, 53(3): 260-270 (in Chinese)
- 李崇银, 张利平. 1999. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 23(3): 257-266. Li C Y, Zhang L P. 1999. Summer monsoon activities in the South China Sea and its impacts. Chinese J Atmos Sci, 23(3): 257-266 (in Chinese)
- 李登宣, 王澄海. 2016. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系. 冰川冻土, 38(1): 89-99. Li D X, Wang C H. 2016. The relation between soil moisture over the Tibetan Plateau in spring and summer precipitation in the eastern China. J Glaciol Geocryol, 38(1): 89-99 (in Chinese)
- 李建平, 丑纪范. 1998a. 大气动力学方程组的定性理论及其应用. 大气科学, 22(4): 443-453. Li J P, Chou J F. 1998a. The qualitative theory of the dynamical equations of atmospheric motion and its applications. Sci Atmos Sinica, 22(4): 443-453 (in Chinese)
- 李建平, 丑纪范. 1998b. 湿大气方程组解的渐近性质. 气象学报, 56(2): 187-198. Li J P, Chou J F. 1998b. Asymptotic behavior of solutions of the moist atmospheric equations. Acta Meteor Sinica, 56(2): 187-198 (in Chinese)
- 李建平, 丑纪范. 2003. 非线性大气动力学的进展. 大气科学, 27(4): 653-673. Li J P, Chou J F. 2003. Advances in nonlinear atmospheric dynamics. Chinese J Atmos Sci, 27(4): 653-673 (in Chinese)
- 李建平, 曾庆存. 2005. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系. 气候与环境研究, 10(3): 351-365. Li J P, Zeng Q C. 2005. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation. Climatic Environ Res, 10(3): 351-365 (in Chinese)
- 李建平, 丁瑞强, 陈宝花. 2006. 大气可预报性研究的回顾与展望//国家自然科学基金委员会地球科学部, 中国科学院资源环境科学与技术局, 中国气象局科技发展司等. 21 世纪初大气科学前沿与展望: 第四次全国大气科学前沿学科研讨会论文集. 北京: 气象出版社. Li J P, Ding R Q, Chen B H. 2006. Review and prospect of atmospheric predictability research//Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Bureau of Resources and Environmental Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Science and Technology Development Department of China Meteorological Administration, et al. Proceedings of the Fourth National Symposium on Frontier Disciplines of Atmospheric Science. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 李建平, 丁瑞强. 2008. 短期气候可预报期限的时空分布. 大气科学, 32(4): 975-986. Li J P, Ding R Q. 2008. Temporal-spatial distributions of predictability limit of short-term climate. Chinese J Atmos Sci, 32(4): 975-986 (in Chinese)
- 李建平, 吴国雄, 胡敦欣. 2011. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响(上卷). 北京: 气象出版社. Li J P, Wu G X, Hu D X. 2011. Ocean-Atmosphere Interaction in the Asia-Indian-Pacific Convergence Zone and Its Impact on Short-Term Climate in China (Volume One). Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 李建平, 任荣彩, 齐义泉等. 2013. 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和

- 亚洲气候变化的作用研究进展. *大气科学*, 37(2): 518-538. Li J P, Ren R C, Qi Y Q, et al. 2013. Progress in air-land-sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change. *Chinese J Atmos Sci*, 37(2): 518-538 (in Chinese)
- 李麦村. 1976. 飑线形成的非线性过程. *中国科学*, 6(6): 592-601. Li M C. 1978. The nonlinear process of the formation of the squall line in the atmosphere. *Scientia Sinica*, 21(1): 99-111
- 李麦村. 1979. 大尺度大气运动的阶段性. *中国科学*, 9(6): 599-607. doi:10.1360/za1979-9-6-59910.1360/za1979-9-6-599. Li M C. 1979. On the stages of large-scale motion of the atmosphere. *Scientia Sinica*, 23(2): 213-222. doi:10.1360/za1979-9-6-59910.1360/za1979-9-6-599
- 李麦村. 1981. 大气中飑线形成的非线性过程与 KDV 方程. *中国科学*, 11(3): 341-350. Li M C. 1981. Nonlinear processes in the formation of squall lines in the atmosphere and the KDV equation. *Scientia Sinica*, 11(3): 341-350 (in Chinese)
- 李麦村, 薛纪善. 1984. 斜压大气中飑线的非线性过程与 K-dV 方程. *大气科学*, 8(2): 143-152. Li M C, Xue J S. 1984. Non-linear evolution process of squall lines in baroclinic atmosphere and K-dV equation. *Sci Atmos Sinica*, 8(2): 143-152 (in Chinese)
- 李跃清, 齐冬梅, 程晓龙等. 2023. 青藏高原对灾害天气的影响//吴国雄, 刘屹岷, 黄建平等. 青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应——专辑 II: 青藏高原对季风和全球气候的影响. 北京: 气象出版社, 163-220. Li Y Q, Qi D M, Cheng X L, et al. 2023. Impact of the Tibetan Plateau on severe weather events//Wu G X, Liu Y M, Huang J P, et al. Land-Atmosphere Coupling System Changes over the Tibetan Plateau and Their Global Climate Effects – Special Volume II: Influence of the Tibetan Plateau on Monsoons and Global Climate. Beijing: China Meteorological Press, 163-220 (in Chinese)
- 刘东生. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社. Liu T S. 1985. Loess and Environment. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 1998. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. *第四纪研究*, 18(3): 194-204. Liu T S, Zheng M P, Guo Z T. 1998. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the Ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia. *Quat Sci*, 18(3): 194-204 (in Chinese)
- 刘群群, 何文平, 顾斌. 2015. 非线性动力学方法在气候突变检测中的应用. *物理学报*, 64(17): 179201. Liu Q Q, He W P, Gu B. 2015. Application of nonlinear dynamical methods in abrupt climate change detection. *Acta Phys Sinica*, 64(17): 179201 (in Chinese)
- 刘式达, 刘式适. 1982. 大气中的非线性椭圆余弦波和孤立波. *中国科学 B 辑*, 12(4): 372-384. Liu S D, Liu S S. 1982. Nonlinear elliptic cosine waves and solitary waves in the atmosphere. *Sci Sin: Chim*, 12(4): 372-384 (in Chinese)
- 刘式达, 刘式适. 1989. 非线性动力学和复杂现象. 北京: 气象出版社. Liu S D, Liu S S. 1989. Nonlinear Dynamics and Complex Phenomena. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 刘式达, 刘式适, 叶其孝. 1998. 非线性演化方程的显式行波解. 数学的实践与认识, 28(4): 289-301. Liu S D, Liu S K, Ye Q X. 1998. Exact traveling wave solutions of nonlinear evolution equations. *Math Pract Theory*, 28(4): 289-301 (in Chinese)
- 刘式达, 袁乃明, 付遵涛等. 2013. 气候变化的长期记忆性: 理论基础与观测证实. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 43(10): 1327-1331. Liu S D, Yuan N M, Fu Z T, et al. 2013. The long-term memory of climatic changes: theoretical foundation and observational confirmation. *Scientia Sinica Phys Mach Astron*, 43(10): 1327-1331 (in Chinese)
- 刘式适, 谭本旭. 1988. 地形作用下的非线性 Rossby 波. *应用数学和力学*, 9(3): 229-240. Liu S K, Tan B K. 1988. Nonlinear Rossby waves forced by topography. *Appl Math Mech*, 9(3): 229-240 (in Chinese)
- 刘晓东, Dong B W. 2013. 青藏高原隆升对亚洲季风-干旱环境演化的影响. *科学通报*, 58(28-29): 2906-2919. Liu X D, Dong B W. 2013. Influence of the Tibetan Plateau uplift on the Asian monsoon-arid environment evolution. *Chinese Sci Bull*, 58(34): 4277-4291
- 刘晓东, Dong B W, Yin Z Y 等. 2019. 大陆漂移、高原隆升与新生代亚-非-澳洲季风区和干旱区演化. *中国科学: 地球科学*, 49(7): 1059-1081. Liu X D, Dong B W, Yin Z Y, et al. 2019. Continental drift, plateau uplift, and the evolutions of monsoon and arid regions in Asia, Africa, and Australia during the Cenozoic. *Sci China Earth Sci*, 62(7): 1053-1075
- 刘晓冉, 李国平. 2014. 一次东移型西南低涡的数值模拟及位涡诊断. *高原气象*, 33(5): 1204-1216. Liu X R, Li G P. 2014. Numerical simulation and potential vorticity diagnosis of an eastward moving southwest vortex. *Plateau Meteor*, 33(5): 1204-1216 (in Chinese)
- 刘屹岷, 姜继兰, 何编. 2020. 副热带高压气候动力学研究回顾. *气象科学*, 40(5): 585-595. Liu Y M, Jiang J L, He B. 2020. Reviews on climate dynamics of the subtropical anticyclone. *J Meteor Sci*, 40(5): 585-595 (in Chinese)
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社. Lu J H. 1986. An Overview of the Southwest Vortex. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 陆日宇. 1999. 华北夏季不同月份降水的年代际变化. *高原气象*, 18(4): 509-519. Lu R Y. 1999. Interdecadal variations of precipitations in various months of summer in North China. *Plateau Meteor*, 18(4): 509-519 (in Chinese)
- 罗德海. 1999. 大气中大尺度包络孤立子理论与阻塞环流. 北京: 气象出版社. Luo D H. 1999. Envelope Rossby Solitons in the Large-Scale Atmosphere and Blocking Circulations. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 马婷, 刘屹岷, 吴国雄等. 2020. 青藏高原低涡形成、发展和东移影响下游暴雨天气个例的位涡分析. *大气科学*, 44(3): 472-486. Ma T, Liu Y M, Wu G X, et al. 2020. Effect of potential vorticity on the formation, development, and eastward movement of a Tibetan Plateau vortex and its influence on downstream precipitation. *Chinese J Atmos Sci*, 44(3): 472-486 (in Chinese)
- 马柱国, 邵丽娟. 2006. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关

- 系. *大气科学*, 30(3): 464-474. Ma Z G, Shao L J. 2006. Relationship between dry/wet variation and the pacific decade oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years. *Chinese J Atmos Sci*, 30(3): 464-474 (in Chinese)
- 宁亮, 钱永甫. 2006. 北非和青藏高原感热振荡特征及与我国东部夏季降水的关系. *高原气象*, 25(3): 357-365. Ning L, Qian Y F. 2006. Oscillation characteristics of sensible heat in North Africa and Qinghai-Xizang Plateau and their impacts on the rainfall in East China. *Plateau Meteor*, 25(3): 357-365 (in Chinese)
- 钱诚, 张文霞. 2019. CMIP6 检测归因模式比较计划(DAMIP)概况与评述. *气候变化研究进展*, 15(5): 469-475. Qian C, Zhang W X. 2019. Short commentary on CMIP6 Detection and Attribution Model Intercomparison Project (DAMIP). *Climate Change Res*, 15(5): 469-475 (in Chinese)
- 钱忠华, 周前进, 刘莉等. 2020. 中国东部雨季降水事件的静默时间特征及内在动力学机制初探. *气象学报*, 78(6): 914-927. Qian Z H, Zhou Q J, Liu L, et al. 2020. A preliminary study on the characteristics of quiet time and intrinsic dynamic mechanism of precipitation events in the rainy season in eastern China. *Acta Meteor Sinica*, 78(6): 914-927 (in Chinese)
- 秦大河, 陈振林, 罗勇等. 2007. 气候变化科学的最新认知. *气候变化研究进展*, 3(2): 63-73. Qin D H, Chen Z L, Luo Y, et al. 2007. Updated understanding of climate change sciences. *Adv Climate Change Res*, 3(2): 63-73 (in Chinese)
- 秦大河, 姚檀栋, 丁永建等. 2020. 冰冻圈科学体系的建立及其意义. *中国科学院院刊*, 35(4): 394-406. Qin D H, Yao T D, Ding Y J, et al. 2020. Establishment and significance of the scientific system of cryospheric science. *Bull Chinese Acad Sci*, 35(4): 394-406 (in Chinese)
- 施雅风, 孔昭宸. 1992. 中国全新世大暖期气候与环境. 海洋出版社. Shi Y F, Kong Z C. 1992. The Climate and Environment During the Holocene Climatic Optimum in China. China Ocean Press
- 施雅风, 李吉均, 李炳元等. 1999a. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. *地理学报*, 54(1): 10-20. Shi Y F, Li J J, Li B Y, et al. 1999a. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia environmental change during late Cenozoic. *Acta Geogr Sinica*, 54(1): 10-20 (in Chinese)
- 施雅风, 刘晓东, 李炳元等. 1999b. 距今 40~30ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系. *科学通报*, 44(14): 1475-1480. Shi Y F, Liu X D, Li B Y, et al. 1999b. A very strong summer monsoon event during 30-40 ka BP in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its relation to precessional cycle. *Chinese Sci Bull*, 44(14): 1475-1480 (in Chinese)
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 24(3): 219-226. Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China. *J Glaciol Geocryol*, 24(3): 219-226 (in Chinese)
- 石正国, 延晓冬, 尹崇华等. 2007. 人类土地利用的历史变化对气候的影响. *科学通报*, 52(12): 1436-1444. Shi Z G, Yan X D, Yin C H, et al. 2007. Effects of historical land cover changes on climate. *Chinese Sci Bull*, 52(18): 2575-2583
- 宋敏红, 钱正安. 2002. 高原及冷空气对 1998 和 1991 年夏季西太副高及雨带的影响. *高原气象*, 21(6): 556-564. Song M H, Qian Z A. 2002. Impact of Plateau and cold air on SHWP and rain belt summer in 1998 and 1991. *Plateau Meteor*, 21(6): 556-564 (in Chinese)
- 孙建奇, 袁薇, 高玉中. 2008. 阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季风的关系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(6): 750-762. Sun J Q, Yuan W, Gao Y Z. 2008. Arabian Peninsula-North Pacific Oscillation and its association with the Asian summer monsoon. *Sci China Ser D Earth Sci*, 51(7): 1001-1002
- 谭本旭, 陈文. 2014. 中高纬度大气遥相关动力学及其对东亚冬季气候影响的研究进展. *气象学报*, 72(5): 908-925. Tan B K, Chen W. 2014. Progress in the study of the dynamics of extratropical atmospheric teleconnection patterns and their impacts on East Asian climate. *Acta Meteor Sinica*, 72(5): 908-925 (in Chinese)
- 陶诗言. 1948. 中国近地面大气之运行. *气象研究所集刊*, 15(4): 1-20. Tao S Y. 1948. The running of atmosphere near ground in China. *Mem Natl Res Inst Meteorol Acad Sinica*, 15(4): 1-20 (in Chinese)
- 陶诗言, 陈隆勳. 1957. 夏季亚洲大陆上空大气环流的結構. *气象学报*, 28(3): 234-247. Dao S Y, Chen L S. 1957. The structure of general circulation over continent of Asia in Summer. *Acta Meteor Sinica*, 28(3): 234-247 (in Chinese)
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系. *气象学报*, 34(4): 387-396. Dao S Y, Zhu F K. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the Far East. *Acta Meteor Sinica*, 34(4): 387-396 (in Chinese)
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社. Tao S Y. 1980. Heavy Rainfall in China. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 陶诗言, 朱文妹, 赵卫. 1988. 论梅雨的年际变异. *大气科学*, 12(S1): 13-21. Tao S Y, Zhu W M, Zhao W. 1988. Interannual variability of Meiyu rainfalls. *Sci Atmos Sinica*, 12(S1): 13-21 (in Chinese)
- 陶诗言, 陈联寿, 徐祥德等. 1999. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展. 北京: 气象出版社. Tao S Y, Chen L S, Xu X D, et al. 1999. Advances in Theoretical Research of the Second Tibetan Plateau Atmospheric Scientific Experiment. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 陶诗言, 张小玲, 张顺利. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究. 北京: 气象出版社. Tao S Y, Zhang X L, Zhang S L. 2004. A Study on the Disaster Of heavy Rainfalls over the Yangtze river Basin in the Meiyu Period. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 涂长望, 黄仕松. 1944. 中国夏季风之进退. *气象学报*, 18(1): 82-92. Tu C W, Huang S S. 1944. The advances and retreats of the summer monsoon in China. *Acta Meteor Sinica*, 18(1): 82-92 (in Chinese)
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征. *大气科学*,

- 37(2): 313-318. Wang H J, Fan K. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 37(2): 313-318 (in Chinese)
- 王静, 祁莉, 何金海等. 2016. 青藏高原春季土壤湿度与我国长江流域夏季降水的联系及其可能机理. *地球物理学报*, 59(11): 3985-3995. Wang J, Qi L, He J H, et al. 2016. Relationship between spring soil moisture in the Tibetan Plateau and summer precipitation in the Yangtze River basin and its possible mechanism. *Chinese J Geophys*, 59(11): 3985-3995 (in Chinese)
- 王阔, 封国林, 孙树鹏等. 2012. 基于 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻事件 10–30 天延伸期稳定分量的研究. *物理学报*, 61(10): 109201. Wang K, Feng G L, Sun S P, et al. 2012. Study of the stable components in extended-range forecasting for the coming 10–30 days during the snow storm event in January 2008. *Acta Phys Sinica*, 61(10): 109201 (in Chinese)
- 王林, 龚海楠, 兰晓青. 2021. 北极涛动的年代际变化及其气候影响. *大气科学学报*, 44(1): 50-60. Wang L, Gong H N, Lan X Q. 2021. Interdecadal variation of the Arctic Oscillation and its influence on climate. *Trans Atmos Sci*, 44(1): 50-60 (in Chinese)
- 王林, 徐需强. 2024. 北半球夏季急流遥相关: 进展与展望. *大气科学*, 48(1): 287-304. Wang L, Xu P Q. 2024. Waveguide teleconnections in the boreal summer: Progress and perspectives. *Chinese J Atmos Sci*, 48(1): 287-304 (in Chinese)
- 汪品先, 卞云华, 李保华等. 1996. 西太平洋边缘海的“新仙女木”事件. *中国科学(D 辑)*, 26(5): 452-460. Wang P X, Bian Y H, Li B H, et al. 1996. The "Younger Dryas climate event" in the west Pacific margin. *Sci China Ser D*, 26(5): 452-460 (in Chinese)
- 汪品先, 翦知湣, 赵泉鸿等. 2003. 南海演变与季风历史的深海证据. *科学通报*, 48(21): 2228-2239. Wang P X, Jian Z M, Zhao Q H, et al. 2003. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep-sea records. *Chinese Sci Bull*, 48(23): 2549-2561
- 汪品先. 2005. 新生代亚洲形变与海陆相互作用. *地球科学: 中国地质大学学报*, 30(1): 1-18. Wang P X. 2005. Cenozoic deformation and history of sea-land interactions in Asia. *Earth Sci J China Univ Geosci*, 30(1): 1-18 (in Chinese)
- 王启光, 封国林, 郑志海等. 2012. 基于 Lorenz 系统提取数值模式可预报分量的初步试验. *大气科学*, 36(3): 539-550. Wang Q G, Feng G L, Zheng Z H, et al. 2012. The preliminary analysis of the procedures of extracting predictable components in numerical model of Lorenz system. *Chinese J Atmos Sci*, 36(3): 539-550 (in Chinese)
- 王启光, 丑纪范, 封国林. 2014. 数值模式延伸期可预报分量提取及预报技术研究. *中国科学: 地球科学*, 44(2): 343-354. Wang Q G, Chou J F, Feng G L. 2014. Extracting predictable components and forecasting techniques in extended-range numerical weather prediction. *Sci China Earth Sci*, 57(7): 1525-1537
- 王绍武, 赵宗慈. 1979. 近五百年我国旱涝史料的分析. *地理学报*, 34(4): 329-341. Wang S W, Zhao Z C. 1979. An analyses of historical data of droughts and floods in last 500 years in China. *Acta Geogr Sinica*, 34(4): 329-341 (in Chinese)
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 9(4): 392-401. Wang S W, Ye J L, Gong D Y, et al. 1998. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China. *Quart J Appl Meteor*, 9(4): 392-401 (in Chinese)
- 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳等. 2000. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率. *地理学报*, 55(3): 281-293. Wang S W, Gong D Y, Ye J L, et al. 2000. Seasonal precipitation series of eastern China since 1880 and the variability. *Acta Geogr Sinica*, 55(3): 281-293 (in Chinese)
- 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红等. 2002. 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化. *气象学报*, 60(5): 637-639. Wang S W, Cai J N, Zhu J H, et al. 2002. The interdecadal variations of annual precipitation in China during 1880's ~ 1990's. *Acta Meteor Sinica*, 60(5): 637-639 (in Chinese)
- 王绍武, 闻新宇, 罗勇等. 2007. 近千年中国温度序列的建立. *科学通报*, 52(8): 958-964. Wang S W, Wen X Y, Luo Y, et al. 2007. Reconstruction of temperature series of China for the last 1000 years. *Chinese Sci Bull*, 52(23): 3272-3280
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社. Wei F Y. 1999. The Current Statistical Climatic Diagnosis and Forecasting Technology. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高 I. 热力适应和过流. *大气科学*, 24(4): 433-446. Wu G X, Liu Y M. 2000. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone Part I: Thermal adaptation and overshooting. *Chinese J Atmos Sci*, 24(4): 433-446 (in Chinese)
- 吴国雄, 孙菽芬, 陈文等. 2003. 青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响. 北京: 气象出版社. Wu G X, Sun S F, Chen W, et al. 2003. The Impact of the Tibetan Plateau and the Northwest arid Region on Climate Disasters. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘新等. 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局. *大气科学*, 29(1): 47-56. Wu G X, Liu Y M, Liu X, et al. 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer. *Chinese J Atmos Sci*, 29(1): 47-56
- 吴国雄, 李建平, 周天军等. 2006. 影响我国短期气候异常的关键区: 亚印太交汇区. *地球科学进展*, 21(11): 1109-1118. Wu G X, Li J P, Zhou T J, et al. 2006. The key region affecting the short-term climate variations in China: the joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean. *Adv Earth Sci*, 21(11): 1109-1118 (in Chinese)
- 吴国雄, 刘屹岷, 何编等. 2018. 青藏高原感热热泵影响亚洲夏季风的机制. *大气科学*, 42(3): 488-504. Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2018. Review of the impact of the Tibetan Plateau sensible heat driven air-pump on the Asian summer monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 42(3): 488-504 (in Chinese)
- 吴国雄, 刘屹岷, 黄建平. 2023. 青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应——专辑 II: 青藏高原对季风和全球气候的影响. 北京: 气象出版社. Wu G X, Liu Y M, Huang J P, et al. 2023. The Impact of the

- Tibetan Plateau Land-Atmosphere Coupling System Changes and Its Global Climate Effects: Vol. II. Effects of the Tibetan Plateau on Monsoon and Global Climate. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 吴浩, 颜鹏程, 侯威等. 2022. 近百年及未来百年 PDO 位相年代际转变检测及其早期预警信号研究. *大气科学*, 46(2): 225-236. Wu H, Yan P C, Hou W, et al. 2022. Detection of decadal phase transition and early warning signals of PDO in recent and next 100 years. *Chinese J Atmos Sci*, 46(2): 225-236 (in Chinese)
- 吴捷, 许小峰, 金飞等. 2013. 东亚-太平洋型季节内演变和维持机理研究. *气象学报*, 71(3): 476-491. Wu J, Xu X F, Jin F F, et al. 2013. Research of the intraseasonal evolution of the East Asia Pacific pattern and the maintenance mechanism. *Acta Meteor Sinica*, 71(3): 476-491 (in Chinese)
- 伍荣生. 1985. 长波近似与大气中的线性与非线性 Rossby 波. *中国科学 B 辑*, 15(2): 1149-1158. Wu R S. 1986. Long wave approximation, linear and non-linear Rossby waves. *Sci China Ser B*, 29(3): 302-312
- 吴祥定, 林振耀. 1981. 历史时期青藏高原气候变化特征的初步分析. *气象学报*, 39(1): 90-97. Wu X D, Lin Z Y. 1981. Some characteristics of the climatic changes during the historical time of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Meteor Sinica*, 39(1): 90-97 (in Chinese)
- 熊开国, 封国林, 胡经国等. 2009. 气候变化中高温破纪录事件的蒙特卡罗模拟研究. *物理学报*, 58(4): 2843-2852. Xiong K G, Feng G L, Hu J G, et al. 2009. Monte Carlo simulation of the record-breaking high temperature events of climate changes. *Acta Phys Sinica*, 58(4): 2843-2852 (in Chinese)
- 徐淑英, 高由禧. 1962. 我国季风进退及其日期的确定. *地理学报*, 28(1): 1-18, doi: 10.11821/xb196201001. Xu S Y, Gao Y X. 1962. Determination of monsoon advance and retreat dates in China. *Acta Geogr Sinica*, 28(1): 1-18 (in Chinese).
- 徐祥德. 2009. 青藏高原“敏感区”对我国灾害天气气候的影响及其监测. *中国工程科学*, 11(10): 96-107. Xu X D. 2009. The effects of sensitive region over Tibetan Plateau on disastrous weather and climate and its monitoring. *Strat Study Chinese Acad Eng*, 11(10): 96-107 (in Chinese)
- 颜鹏程, 侯威, 胡经国. 2012. 基于 Logistic 模型的均值突变时间序列临界预警研究. *物理学报*, 61(18): 189202. Yan P C, Hou W, Hu J G. 2012. The critical warning research of the mean time series mutations based on Logistic model. *Acta Phys Sinica*, 61(18): 189202 (in Chinese)
- 颜鹏程, 封国林, 侯威等. 2014. 500hPa 温度场时间序列的年代际突变过程统计特征. *大气科学*, 38(5): 861-873. Yan P C, Feng G L, Hou W, et al. 2014. Statistical characteristics on decadal abrupt change process of time sequence in 500 hPa temperature field. *Chinese J Atmos Sci*, 38(5): 861-873 (in Chinese)
- 晏红明, 胡娟, 周建琴等. 2017. 一个新的东亚副热带夏季风指数的定义. *气象学报*, 75(2): 193-210. Yan H M, Hu J, Zhou J Q, et al. 2017. Definition of a new East Asian subtropical summer monsoon index. *Acta Meteor Sinica*, 75(2): 193-210 (in Chinese)
- 杨海军, 温琴, 姚杰等. 2023. 青藏高原对海洋环流的影响及其气候效应 // 吴国雄, 刘屹岷, 黄建平. 青藏高原地-气耦合系统变化及其全球气候效应——专辑 II: 青藏高原对季风和全球气候的影响. 北京: 气象出版社, 221-275. Yang H J, Wen Q, Yao J, et al. 2023. Impact of the Tibetan Plateau on ocean circulation and its climatic effects // Wu G X, Liu Y M, Huang J P, et al. Changes in the Land-Atmosphere Coupling System over the Tibetan Plateau and Their Global Climate Effects—Volume II: Impacts on Monsoon and Global Climate. Beijing: China Meteorological Press, 221-275 (in Chinese)
- 杨杰, 侯威, 封国林. 2010. 干旱破纪录事件预估理论研究. *物理学报*, 59(1): 664-675. Yang J, Hou W, Feng G L. 2010. A prediction theory of record-breaking PDSI of China. *Acta Phys Sinica*, 59(1): 664-675 (in Chinese)
- 杨鉴初, 陶诗言, 叶笃正等. 1960. 西藏高原气象学. 北京: 科学出版社. Yang J C, Tao S Y, Ye D Z, et al. 1960. Tibetan Plateau Meteorology. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 杨萍, 侯威, 封国林. 2010. 中国极端气候事件的群发性规律研究. *气候与环境研究*, 15(4): 365-370. Yang P, Hou W, Feng G L. 2010. A study of the characteristics of the cluster extreme events in China. *Climatic Environ Res*, 15(4): 365-370 (in Chinese)
- 杨修群, 谢倩, 朱益民等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型. *地球物理学报*, 48(4): 789-797. Yang X Q, Xie Q, Zhu Y M, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns. *Chinese J Geophys*, 48(4): 789-797 (in Chinese)
- 叶笃正, 顾震潮. 1956. 西藏高原对大气环流和中国天气的影响. 苏联科学院公报, 地理序列, 127-129. Ye D Z, Gu Z C. 1956. Effects of the Tibetan Plateau on atmospheric circulation and weather in China. *Bull Sov Acad Sci Geogr Ser*, 127-129 (in Russian)
- 葉篤正, 羅四維, 朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流場結構和對流層大氣的熱量平衡. *氣象學報*, 28(2): 108-121. Yeh T C, Lo S W, Chu B C. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding. *Acta Meteor Sinica*, 28(2): 108-121 (in Chinese)
- 葉篤正, 陶詩言, 李麥村. 1958. 在六月和十月大氣環流的突變現象. *氣象學報*, 29(4): 249-263. Yeh T C, Dao S Y, Li M T. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October. *Acta Meteor Sinica*, 29(4): 249-263 (in Chinese)
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社. Ye D Z, Gao Y X. 1979. Meteorology of the Tibetan Plateau. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 叶笃正, 吕建华. 2003. 气候研究进展和 21 世纪发展战略. *自然科学进展*, 13(1): 42-46. Ye D Z, Lü J H. 2003. Progress in climate research and development strategy for the 21st century. *Prog Nat Sci*, 13(1): 42-46 (in Chinese)
- 宇如聪, 周天军, 李建等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展. *大气科学*, 32(4): 893-905. Yu R C, Zhou T J, Li J, et al. 2008.

- Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China. *Chinese J Atmos Sci*, 32(4): 893-905 (in Chinese)
- 郁淑华, 高文良, 彭骏. 2013. 近 13 年青藏高原切变线活动及其对中国降水影响的若干统计. *高原气象*, 32(6): 1527-1537. Yu S H, Gao W L, Peng J. 2013. Statistical analysis of shearline activity in QXP and its influence on rainfall in China in recent 13 years. *Plateau Meteor*, 32(6): 1527-1537 (in Chinese)
- 郁淑华, 高文良. 2018. 冷空气对夏季高原涡移出高原后长久与短期活动影响的对比分析. *大气科学*, 42(6): 1297-1326. Yu S H, Gao W L. 2018. A comparative analysis of cold air influences on short-and long-time maintenance of the Tibetan Plateau vortex after it moves out of the plateau. *Chinese J Atmos Sci*, 42(6): 1297-1326 (in Chinese)
- 曾庆存, 李建平. 2002. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质. *大气科学*, 26(4): 433-448. Zeng Q C, Li J P. 2002. Interactions between the northern and southern hemispheric atmospheres and the essence of monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 26(4): 433-448 (in Chinese)
- 曾庆存, 王会军, 林朝晖等. 2003. 气候动力学与气候预测理论的研究. *大气科学*, 27(4): 468-483. Zeng Q C, Wang H J, Lin Z H, et al. 2003. A study of the climate dynamics and climate prediction theory. *Chinese J Atmos Sci*, 27(4): 468-483 (in Chinese)
- 张德二. 1980. 中国南部近 500 年冬季温度变化的若干特征. *科学通报*, 25(6): 270-272. Zhang D E. 1980. Some characteristics of winter temperature changes in southern China over the past 500 years. *Chinese Sci Bull*, 25(6): 270-272 (in Chinese)
- 张德二, 刘传志, 江剑民. 1997. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. *第四纪研究*, 17(1): 1-11. Zhang D E, Liu C Z, Jiang J M. 1997. Reconstruction-of six regional dry /wet series and their abrupt changes during the last 1000 years in East China. *Quat Sci*, 17(1): 1-11 (in Chinese)
- 章基嘉, 朱抱真, 朱福康等. 1988. 青藏高原气象学进展. 北京: 科学出版社. Zhang J J, Zhu B Z, Zhu F K, et al. 1988. *Advances in Tibetan Plateau Meteorology*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 张家诚, 张先恭. 1979. 近五百年我国气候的几种振动及其相互关系. *气象学报*, 37(2): 49-57. Zhang J C, Zhang X G. 1979. Climatic fluctuations during the last 500-year in China and their interdependence. *Acta Meteor Sinica*, 37(2): 49-57 (in Chinese)
- 张林源, 蒋兆理, 刘晓东. 1991. 论东亚季风与青藏高原在形成和发展过程中的关系//中国第四纪冰川与环境研究中心, 中国第四纪研究委员会. 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1-14. Zhang L Y, Jiang Z L, Liu X D. 1991. On the relationship between the East Asian monsoon and the Tibetan Plateau in its formation and development process//China Quaternary Glaciers and Environment Research Center, China Quaternary Research Committee. *Quaternary Glaciers and Environment in Western China*. Beijing: Science Press, 1-14 (in Chinese)
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云等. 2002. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件. *科学通报*, 47(6): 467-473. Zhang S L, Tao S Y, Zhang Q Y, et al. 2002. Large and meso- α scale characteristics of intense rainfall in the mid — and lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Sci Bull*, 47(9): 779-786
- 张志森, 龚志强, 支蓉. 2013. 利用传递熵对 Lorenz 系统和 Walker 环流信息传输方向的分析. *物理学报*, 62(12): 129203. Zhang Z S, Gong Z Q, Zhi R. 2013. Analysis of the direction of information transfer of Lorenz system and Walker circulation with transfer entropy. *Acta Phys Sinica*, 62(12): 129203 (in Chinese)
- 赵佳港, 李树峰, Farnsworth A 等. 2022. 古近纪至新近纪青藏高原的气候演变及其驱动因素. *中国科学: 地球科学*, 52(8): 1562-1576. Zhao J G, Li S F, Farnsworth A, et al. 2022. The Paleogene to Neogene climate evolution and driving factors on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Sci China Earth Sci*, 65(7): 1339-1352
- 赵俊虎, 王启光, 支蓉等. 2012. 中国极端温度的群发性研究. *气象学报*, 70(2): 302-310. Zhao J H, Wang Q G, Zhi R, et al. 2012. A study of the extreme temperature group-occurring events in China. *Acta Meteor Sinica*, 70(2): 302-310 (in Chinese)
- 赵溱. 1984. 欧亚大陆雪盖与东亚夏季风. *气象*, 10(7): 27-29. Zhao Z. 1984. Eurasian snow cover and East Asian summer monsoon. *Meteor Mon*, 10(7): 27-29 (in Chinese)(查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)
- 郑景云, 郝志新, 方修琦等. 2014. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征. *地理科学进展*, 33(1): 3-12. Zheng J Y, Hao Z X, Fang X Q, et al. 2014. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China. *Prog Geogr*, 33(1): 3-12 (in Chinese)
- 郑志海, 封国林, 黄建平平等. 2012. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验. *物理学报*, 61(19): 543-550. Zheng Z H, Feng G L, Huang J P, et al. 2012. Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments. *Acta Phys Sinica*, 61(19): 543-550 (in Chinese)
- 郑志海, 黄建平, 封国林等. 2013. 延伸期可预报分量的预报方案和策略. *中国科学: 地球科学*, 43(4): 594-605. Zheng Z H, Huang J P, Feng G L, et al. 2013. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components. *Sci China Earth Sci*, 56(5): 878-899
- 中央气象局气象科学研究院. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社. Chinese Academy of Meteorological Sciences. 1981. Beijing: Sinomap Press (in Chinese)
- 周磊, 龚志强, 支蓉等. 2008. 利用复杂网络研究中国温度序列的拓扑性质. *物理学报*, 57(11): 7380-7389. Zhou L, Gong Z Q, Zhi R, et al. 2008. An approach to research the topology of Chinese temperature sequence based on complex network. *Acta Phys Sinica*, 57(11): 7380-7389 (in Chinese)
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 我国华北地区春季降水的年代际变化特征及其可能成因的探讨. *气候与环境研究*, 11(4): 441-450. Zhou L T, Huang R H. 2006. Characteristics of interdecadal variability of spring precipitation in North China and its possible cause. *Climatic Environ Res*, 11(4): 441-450 (in Chinese)

- 周天军, 邹立维, 吴波等. 2014. 中国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施近 20 年回顾. *气象学报*, 72(5): 892-907. Zhou T J, Zou L W, Wu B, et al. 2014. Development of earth/climate system models in China: a review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective. *Acta Meteor Sinica*, 72(5): 892-907 (in Chinese)
- 周天军, 陈晓龙, 何编等. 2019. 全球季风模式比较计划(GMMIP)概述. *气候变化研究进展*, 15(5): 493-497. Zhou T J, Chen X L, He B, et al. 2019. Short commentary on CMIP6 Global Monsoons Model Intercomparison Project (GMMIP). *Climate Change Res*, 15(5): 493-497 (in Chinese)
- 周天军, 张文霞, 张丽霞等. 2020. 人为气溶胶导致全球陆地季风区降水减少的动力和热力过程. *中国科学: 地球科学*, 50(8): 1122-1137. Zhou T J, Zhang W X, Zhang L X, et al. 2020. The dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation driven by anthropogenic aerosols emission. *Sci China Earth Sci*, 63(7): 919-933
- 周天军, 张文霞, 陈德亮等. 2022. 2021 年诺贝尔物理学奖解读: 从温室效应到地球系统科学. *中国科学: 地球科学*, 52(4): 579-594. Zhou T J, Zhang W X, Chen D L, et al. 2022. Understanding and building upon the pioneering work of Nobel Prize in Physics 2021 laureates Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann: From the greenhouse effect to Earth system science and beyond. *Sci China Earth Sci*, 65(4): 589-600
- 周晓平, 顧震潮. 1958. 大地形對高空行星波傳播的影響. *氣象學報*, 29(2): 99-103. Zhou X P, Gu Z C. 1958. The influence of the slope of a plateau on the movement of troughs and ridges. *Acta Meteor Sinica*, 29(2): 99-103 (in Chinese)
- 周秀骥. 2005. 大气随机动力学与可预报性. *气象学报*, 63(5): 806-811. Zhou X J. 2005. Atmospheric stochastic dynamics and predictability. *Acta Meteor Sinica*, 63(5): 806-811 (in Chinese)
- 周秀骥, 赵平, 陈军明等. 2009. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39(11): 1473-1486. Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate. *Sci China Ser D Earth Sci*, 52(11): 1679-1693
- 朱抱真, 丁一汇, 罗会邦. 1990. 关于东亚大气环流和季风的研究. *气象学报*, 48(1): 4-16. Zhu B Z, Ding Y H, Luo H B. 1990. A review of the atmospheric general circulation and monsoon in East Asia. *Acta Meteor Sinica*, 48(1): 4-16 (in Chinese)
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系. *气象学报*, 65(6): 946-958. Zhu Y X, Ding Y H, Xu H G. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in east China. *Acta Meteor Sinica*, 65(6): 946-958 (in Chinese)
- 竺可桢. 1934. 東南季風與中國之雨量. *地理學報*, 1(1): 1-27. Chu C C. 1934. The enigma of southeast monsoon in China. *Acta Geogr Sinica*, 1(1): 1-27 (in Chinese)
- 竺可桢. 1972. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *考古学报*, (1): 15-38. Zhu K Z. 1972. A preliminary study on climatic variations in China over the past five millennia. *Acta Archaeol Sinica*, (1): 15-38 (in Chinese)
- Ai S C, Chen Q L, Li J P, et al. 2017. Baseline predictability of daily East Asian summer monsoon circulation indices. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 53(2): 243-256
- Alizadeh O. 2024. A review of ENSO teleconnections at present and under future global warming. *WIREs Climate Change*, 15(1): e861
- An Z S. 2000. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quat Sci Rev*, 19(1-5): 171-187
- An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, et al. 2000. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon. *Quat Sci Rev*, 19(8): 743-762
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411(6833): 62-66
- Andrews T, Forster P M, Boucher O, et al. 2010. Precipitation, radiative forcing and global temperature change. *Geophys Res Lett*, 37(14): L14701, doi: 10.29102/2010GL043991
- Bi K F, Xie L X, Zhang H H, et al. 2023. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature*, 619(7970): 533-538
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Wea Rev*, 97(3): 163-172
- Bolin B. 1950. On the influence of the earth's orography on the general character of the westerlies. *Tellus A*, 2(3): 184-195
- Branstator G. 2002. Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic oscillation. *J Climate*, 15(14): 1893-1910
- Brient F. 2020. Reducing uncertainties in climate projections with emergent constraints: Concepts, examples and prospects. *Adv Atmos Sci*, 37(1): 1-15
- Bunde A. 2023. The different types of noise and how they effect data analysis. *Chem Ing Tech*, 95(11): 1758-1767
- Cai W J, Wang G J, Santoso A, et al. 2015a. Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nat Climate Change*, 5(2): 132-137
- Cai W J, Santoso A, Wang G J, et al. 2015b. ENSO and greenhouse warming. *Nat Climate Change*, 5(9): 849-859
- Cai Y J, Fung I Y, Edwards R L, et al. 2015. Variability of stalagmite-inferred Indian monsoon precipitation over the past 252, 000 y. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112(10): 2954-2959
- Cao L, Bala G, Caldeira K. 2011. Why is there a short-term increase in global precipitation in response to diminished CO₂ forcing? *Geophys Res Lett*, 38(6): L06703 doi:10.1029/2011GL046713
- Cao L, Bala G, Caldeira K. 2012. Climate response to changes in atmospheric carbon dioxide and solar irradiance on the time scale of days to weeks. *Environ Res Lett*, 7(3): 034015
- Cao L, Bala G, Zheng M D, et al. 2015. Fast and slow climate responses to

- CO₂ and solar forcing: A linear multivariate regression model characterizing transient climate change. *J Geophys Res: Atmos*, 120(23): 12037-12053
- Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. 2013. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century. *J Geophys Res: Atmos*, 118(15): 8197-8207
- Cao X, Chen S F, Chen G H, et al. 2015. On the weakened relationship between spring Arctic Oscillation and following summer tropical cyclone frequency over the western North Pacific: A comparison between 1968-1986 and 1989-2007. *Adv Atmos Sci*, 32(10): 1319-1328
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J Climate*, 13(24): 4310-4325
- Charney J G, Eliassen A. 1949. A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies. *Tellus*, 1(2): 38-54
- Charney J G, DeVore J G. 1979. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. *J Atmos Sci*, 36(7): 1205-1216
- Chen B H, Li J P, Ding R Q. 2006. Nonlinear local Lyapunov Exponent and atmospheric predictability research. *Sci China Ser D Earth Sci*, 49(10): 1111-1120
- Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. 2008. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat Sci Rev*, 27(3-4): 351-364
- Chen G S, Huang R H. 2012. Excitation mechanisms of the teleconnection patterns affecting the July precipitation in Northwest China. *J Climate*, 25(22): 7834-7851
- Chen J P, Wen Z P, Wu R G, et al. 2014. Interdecadal changes in the relationship between Southern China winter-spring precipitation and ENSO. *Climate Dyn*, 43(5): 1327-1338
- Chen S F, Yu B, Chen W. 2014. An analysis on the physical process of the influence of AO on ENSO. *Climate Dyn*, 42(3): 973-989
- Chen S F, Yu B, Chen W. 2015. An interdecadal change in the influence of the spring Arctic Oscillation on the subsequent ENSO around the early 1970s. *Climate Dyn*, 44(3): 1109-1126
- Chen S F, Wu R G, Chen W, et al. 2020. Structure and dynamics of a springtime atmospheric wave train over the North Atlantic and Eurasia. *Climate Dyn*, 54(11): 5111-5126
- Chen W, Feng J, Wu R G. 2013. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon. *J Climate*, 26(2): 622-635
- Chen W, Hu P, Huangfu J L. 2022. Multi-scale climate variations and mechanisms of the onset and withdrawal of the South China Sea summer monsoon. *Sci China Earth Sci*, 65(7): 1030-1046
- Chen W, Zhang R H, Wu R G, et al. 2023. Recent advances in understanding multi-scale climate variability of the Asian monsoon. *Adv Atmos Sci*, 40(8): 1429-1456
- Chen X L, Zhou T J, Wu P L, et al. 2020. Emergent constraints on future projections of the western North Pacific subtropical high. *Nat Commun*, 11(1): 2802
- Chen Y R, Li Y Q, Kang L. 2019. An index reflecting mesoscale vortex-vortex interaction and its diagnostic applications for rainstorm area. *Atmos Sci Lett*, 20(6): e902
- Chen Z M, Zhou T J, Chen X L, et al. 2022. Observationally constrained projection of Afro-Asian monsoon precipitation. *Nat Commun*, 13(1): 2552
- Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. 2016. The Asian monsoon over the past 640, 000 years and ice age terminations. *Nature*, 534(7609): 640-646
- Cheng X, Chen S F, Chen W, et al. 2023. Observed impact of the Arctic Oscillation in boreal spring on the Indian Ocean Dipole in the following autumn and possible physical processes. *Climate Dyn*, 61(1-2): 883-902
- Cheng X, Chen S F, Chen W, et al. 2024. Selective influence of the arctic oscillation on the Indian Ocean dipole and El Niño-southern oscillation. *Climate Dyn*, 62(5): 3783-3798
- Cheng X D, Li Y Q, Xu L. 2016. An analysis of an extreme rainstorm caused by the interaction of the Tibetan Plateau vortex and the Southwest China vortex from an intensive observation. *Meteor Atmos Phys*, 128(3): 373-399
- Choi K S, Wu C C, Byun H R. 2012. Possible connection between summer tropical cyclone frequency and spring Arctic Oscillation over East Asia. *Climate Dyn*, 38(11): 2613-2629
- Chou C, Neelin J D. 2004. Mechanisms of global warming impacts on regional tropical precipitation. *J Climate*, 17(13): 2688-2701
- Chou C, Neelin J D, Chen C A, et al. 2009. Evaluating the "rich-get-richer" mechanism in tropical precipitation change under global warming. *J Climate*, 22(8): 1982-2005
- Chowdary J S, Hu K M, Srinivas G, et al. 2019. The Eurasian jet streams as conduits for East Asian monsoon variability. *Curr Climate Change Rep*, 5(3): 233-244
- Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, et al. 2007. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change//IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press
- Christensen J H, Kanikicharla K K, Aldrian E, et al. 2013. Evaluation of climate models//IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 741-866
- Cubasch U, Meehl G A, Boer G J, et al. 2001. Projections of future climate change//IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of WG1 to the Third Assessment Report of the IPCC (TAR). Cambridge: Cambridge University Press, 525-582
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J Climate*, 18(17): 3483-3505
- Ding Q H, Wang B. 2007. Intraseasonal teleconnection between the summer Eurasian wave train and the Indian monsoon. *J Climate*, 20(15): 3751-

3767

- Ding R Q, Li J P. 2007. Nonlinear finite-time Lyapunov exponent and predictability. *Phys Lett A*, 364(5): 396-400
- Ding R Q, Li J P, Seo K H. 2010. Predictability of the madden-julian oscillation estimated using observational data. *Mon Wea Rev*, 138(3): 1004-1013
- Ding R Q, Li J P, Seo K H. 2011. Estimate of the predictability of boreal summer and winter intraseasonal oscillations from observations. *Mon Wea Rev*, 139(8): 2421-2438
- Ding R Q, Li J P, Zheng F, et al. 2016. Estimating the limit of decadal-scale climate predictability using observational data. *Climate Dyn*, 46(5): 1563-1580
- Ding R Q, Li J P, Li B S. 2017. Determining the spectrum of the nonlinear local lyapunov exponents in a multidimensional chaotic system. *Adv Atmos Sci*, 34(9): 1027-1034
- Ding Y H, Sun Y. 2004. Changes in Asian summer monsoon and possible mechanisms//Ren G Y, Xu M Z, Tang G L, et al. Climate Changes of the Past 100 Years in China. 47-49 (查阅网上资料, 未能确认本条文献修改是否正确, 请确认)(查阅网上资料, 未找到出版信息, 请补充)
- Ding Y H. 2007. The variability of the Asian summer monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 85B: 21-54
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: possible causes. *Int J Climatol*, 29(13): 1926-1944
- Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z. 2021. The record-breaking Mei-yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies. *Adv Atmos Sci*, 38(12): 1980-1993
- Ding Z, Yu Z, Rutter N W, et al. 1994. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quat Sci Rev*, 13(1): 39-70
- Ding Z L, Liu T S, Rutter N W, et al. 1995. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800, 000 years. *Quat Res*, 44(2): 149-159
- Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, et al. 1999. Pedostratigraphy and paleomagnetism of a ~7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai, Loess Plateau, north-central China and the implications for paleomonsoon evolution. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 152(1-2): 49-66
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. 2002. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 17(3): 1033
- Dong T Y, Zhao S S, Mei Y, et al. 2021. Whether the CMIP5 models can reproduce the long-range correlation of daily precipitation? *Front Environ Sci*, 9: 656639 doi:10.3389/fenvs.2021.656639
- Du Y, Xie S P, Huang G, et al. 2009. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced North Indian Ocean warming. *J Climate*, 22(8): 2023-2038
- Duan A M, Sun R Z, He J H. 2017. Impact of surface sensible heating over the Tibetan Plateau on the western Pacific subtropical high: a land-air-sea interaction perspective. *Adv Atmos Sci*, 34(2): 157-168
- Duan A M, Hu D, Hu W T, et al. 2020. Precursor effect of the Tibetan Plateau heating anomaly on the seasonal march of the East Asian summer monsoon precipitation. *J Geophys Res: Atmos*, 125(23): e2020JD032948
- Duan W S, Mu M, Wang B. 2004. Conditional nonlinear optimal perturbations as the optimal precursors for El Niño-Southern Oscillation events. *J Geophys Res: Atmos*, 109(D23): D23105
- Duan W S, Liu X C, Zhu K Y, et al. 2009. Exploring the initial errors that cause a significant "spring predictability barrier" for El Niño events. *J Geophys Res: Atmos*, 114(C4): C04022
- Duan W S, Zhou F F. 2013. Non-linear forcing singular vector of a two-dimensional quasi-geostrophic model. *Tellus A*, 65(1): 18452
- Duan W S, Zhao P. 2015. Revealing the most disturbing tendency error of Zebiak-Cane model associated with El Niño predictions by nonlinear forcing singular vector approach. *Climate Dyn*, 44(9): 2351-2367
- Duan W S, Mu M. 2018. Predictability of El Niño-Southern Oscillation events//Oxford Research Encyclopedia of Climate Science
- Duan W S, Feng R, Yang L C, et al. 2022. A new approach to data assimilation for numerical weather forecasting and climate prediction. *J Appl Anal Comput*, 12(3): 1007-1021
- Duan W S, Yang L C, Mu M, et al. 2023. Recent advances in China on the predictability of weather and climate. *Adv Atmos Sci*, 40(8): 1521-1547
- Eady E T. 1950. The cause of the general circulation of the atmosphere. *Centen Proc Roy Meteor Soc*, 76: 156-172
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129(587): 157-178
- Fang C X, Liu Y, Song H M, et al. 2024. A new monsoon circulation index defining precipitation variability in the East Asian summer monsoon northern marginal zone. *Theor Appl Climatol*, 155(5): 3811-3830
- Farrell B F. 1990. Small error dynamics and the predictability of atmospheric flows. *J Atmos Sci*, 47(20): 2409-2416
- Feng A X, Wang Q G, Zhang S X, et al. 2022. Characteristics of vapor based on complex networks in China. *Chinese Phys B*, 31(4): 049201
- Feng J, Ding R Q, Liu D Q, et al. 2014. The application of nonlinear local lyapunov vectors to ensemble predictions in Lorenz systems. *J Atmos Sci*, 71(9): 3554-3567
- Feng J, Ding R Q, Li J P, et al. 2016. Comparison of nonlinear local lyapunov vectors with bred vectors, random perturbations and ensemble transform Kalman filter strategies in a barotropic model. *Adv Atmos Sci*, 33(9): 1036-1046
- Feng J, Li J P, Ding R Q, et al. 2018. Comparison of nonlinear local lyapunov vectors and bred vectors in estimating the spatial distribution of error growth. *J Atmos Sci*, 75(4): 1073-1087
- Feng R, Duan W S. 2014. The spatial patterns of initial errors related to the "winter predictability barrier" of the Indian Ocean dipole. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 7(5): 406-410

- Fu C B, Ye D Z. 1988. The tropical very low-frequency oscillation on interannual scale. *Adv Atmos Sci*, 5(3): 369-388
- Fu Y H, Guo D. 2020. Projection of the East Asian westerly jet under six global warming targets. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 13(2): 129-135
- Fu Z T, Liu S K, Liu S D, et al. 2001. New Jacobi elliptic function expansion and new periodic solutions of nonlinear wave equations. *Phys Lett A*, 290(1-2): 72-76
- Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Adv Atmos Sci*, 19(5): 927-942
- Gao Y J Y, Mu M, Dai G K. 2023. Targeted observations on Arctic sea ice concentration for improving extended-range prediction of Ural Blocking. *J Geophys Res: Atmos*, 128(22): e2023JD039630
- Gates W L, Rowntree P R, Zeng Q C, et al. 1990. Validation of climate model//Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climatic Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press
- Gates W L, Mitchell J F B, Boer G J, et al. 1992. Climate modelling, climate prediction and model validation//Houghton J T, Callander B A, Varney S K. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press
- Ge Q S, Zheng J Y, Fang X Q, et al. 2003. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, 13(6): 933-940
- Gillett N P, Shiogama H, Funke B, et al. 2016. The detection and attribution model intercomparison project (DAMIP v1.0) contribution to CMIP6. *Geosci Model Dev*, 9(10): 3685-3697
- Gong D Y, Wang S W. 1998. Antarctic oscillation: Concept and applications. *Chinese Sci Bull*, 43(9): 734-738
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of antarctic oscillation index. *Geophys Res Lett*, 26(4): 459-462
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and arctic oscillation. *Geophys Res Lett*, 28(10): 2073-2076
- Gong D Y, Ho C H. 2003. Arctic oscillation signals in the East Asian summer monsoon. *J Geophys Res: Atmos*, 108(D2): 4066
- Gong D Y, Mao R, Fan Y D. 2006. East Asian dust storm and weather disturbance: possible links to the Arctic Oscillation. *Int J Climatol*, 26(10): 1379-1396
- Gong D Y, Yang J, Kim S J, et al. 2011. Spring Arctic Oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific. *Climate Dyn*, 37(11): 2199-2216
- Gong H H, Fu Z T. 2023. Modified DFA for a robust discrimination between short-term and long-range correlations in short time series. *Phys A: Stat Mech Appl*, 625: 128997
- Gong Z Q, Hutin C, Feng G L. 2016. Methods for improving the prediction skill of summer precipitation over East Asia-West Pacific. *Wea Forecasting*, 31(4): 1381-1392
- Gong Z Q, Feng G L, Dogar M M, et al. 2018. The possible physical mechanism for the EAP-SR co-action. *Climate Dyn*, 51(4): 1499-1516
- Guan Z Y, Yamagata T. 2001. Interhemispheric oscillations in the surface air pressure field. *Geophys Res Lett*, 28(2): 263-266
- Guo Z, Liu T, Guot J, et al. 1996. High frequency pulses of East Asian monsoon climate in the last two glaciations: Link with the North Atlantic. *Climate Dyn*, 12(10): 701-709
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159-163
- Guo Z T, Sun B, Zhang Z S, et al. 2008. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene. *Climate Past*, 4(3): 153-174
- Hall A, Cox P, Huntingford C, et al. 2019. Progressing emergent constraints on future climate change. *Nat Climate Change*, 9(4): 269-278
- Han Z, Dai G K, Mu M, et al. 2023. Extent of the impact of arctic atmospheric uncertainty on extended-range forecasting of cold events in East Asia. *J Geophys Res: Atmos*, 128(9): e2022JD037187
- Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models Part I. Theory. *Tellus*, 28(6): 473-485
- He B, Wu G X, Liu Y M, et al. 2015. Astronomical and hydrological perspective of mountain impacts on the Asian summer monsoon. *Sci Rep*, 5: 17586
- He B, Bao Q, Wang X C, et al. 2019a. CAS FGOALS-f3-L model datasets for CMIP6 historical atmospheric model intercomparison project simulation. *Adv Atmos Sci*, 36(7): 771-778
- He B, Liu Y M, Wu G X, et al. 2019b. The role of air-sea interactions in regulating the thermal effect of the Tibetan-Iranian Plateau on the Asian summer monsoon. *Climate Dyn*, 52(7): 4227-4245
- He C, Zhou T J. 2015a. Responses of the western north pacific subtropical high to global warming under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios projected by 33 CMIP5 models: the dominance of tropical Indian Ocean-tropical Western Pacific SST gradient. *J Climate*, 28(1): 365-380
- He C, Zhou T J, Lin A L, et al. 2015b. Enhanced or weakened western North Pacific subtropical high under global warming?. *Sci Rep*, 5: 16771
- He C, Wang Z Q, Zhou T J, et al. 2019. Enhanced latent heating over the Tibetan Plateau as a key to the enhanced East Asian summer monsoon circulation under a warming climate. *J Climate*, 32(11): 3373-3388
- He C. 2023. Future drying subtropical East Asia in Winter: mechanism and observational constraint. *J Climate*, 36(9): 2985-2998
- He S P, Gao Y Q, Li F, et al. 2017. Impact of arctic oscillation on the East Asian climate: a review. *Earth-Sci Rev*, 164: 48-62
- He W, Feng G L, Wu Q, et al. 2008. A new method for abrupt change detection in dynamic structures. *Nonl Processes Geophys*, 15(4): 601-606
- He W P, Xie X Q, Mei Y, et al. 2021. Decreasing predictability as a precursor indicator for abrupt climate change. *Climate Dyn*, 56(11): 3899-3908
- Held I M. 1975. Momentum transport by quasi-geostrophic eddies. *J Atmos Sci*, 32(7): 1494-1497

- Held I M. 1983. Stationary and quasi-stationary eddies in the extratropical troposphere: Theory//Hoskins B, Pearce R. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere. London: Academic Press, 168
- Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J Climate*, 19(21): 5686-5699
- Held I M. 2019. 100 years of progress in understanding the general circulation of the atmosphere. *Meteor Monogr*, 59(1): 6.1-6.23
- Hori M E, Ueda H. 2006. Impact of global warming on the East Asian winter monsoon as revealed by nine coupled atmosphere-ocean GCMs. *Geophys Res Lett*, 33(3): L03713
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J Atmos Sci*, 38(6): 1179-1196
- Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. *J Atmos Sci*, 50(12): 1661-1671
- Hou W, Feng G L, Yan P C, et al. 2018. Multifractal analysis of the drought area in seven large regions of China from 1961 to 2012. *Meteor Atmos Phys*, 130(4): 459-471
- Hou Z L, Li J P, Ding R Q, et al. 2018a. The application of nonlinear local Lyapunov vectors to the Zebiak-Cane model and their performance in ensemble prediction. *Climate Dyn*, 51(1-2): 283-304
- Hou Z L, Li J P, Ding R Q, et al. 2018b. Asymmetry of the predictability limit of the warm ENSO phase. *Geophys Res Lett*, 45(15): 7646-7653
- Hou Z L, Zuo B, Zhang S Q, et al. 2020. Model forecast error correction based on the local dynamical analog method: an example application to the ENSO forecast by an intermediate coupled model. *Geophys Res Lett*, 47(19): e2020GL088986
- Hou Z L, Li J P, Zuo B. 2021. Correction of monthly SST forecasts in CFSv2 using the local dynamical analog method. *Wea Forecasting*, 36(3): 843-858
- Hou Z L, Li J P, Ding R Q, et al. 2022a. Investigating decadal variations of the seasonal predictability limit of sea surface temperature in the tropical Pacific. *Climate Dyn*, 59(3): 1079-1096
- Hou Z L, Li J P, Wang L, et al. 2022b. Improving the forecast accuracy of ECMWF 2-m air temperature using a historical dataset. *Atmos Res*, 273: 106177
- Hou Z L, Li J P, Diao Y N, et al. 2024. Asymmetric influences of ENSO phases on the predictability of North Pacific sea surface temperature. *Geophys Res Lett*, 51(7): e2023GL108091
- Hu J, Duan A M. 2015. Relative contributions of the Tibetan Plateau thermal forcing and the Indian Ocean Sea surface temperature basin mode to the interannual variability of the East Asian summer monsoon. *Climate Dyn*, 45(8): 2697-2711
- Hu K M, Huang G, Wu R G, et al. 2018. Structure and dynamics of a wave train along the wintertime Asian jet and its impact on East Asian climate. *Climate Dyn*, 51(11): 4123-4137
- Hu K M, Huang G, Xie S P, et al. 2019. Effect of the mean flow on the anomalous anticyclone over the Indo-Northwest Pacific in post-El Niño summers. *Climate Dyn*, 53(9): 5725-5741
- Hu K M, Huang G, Huang P, et al. 2021. Intensification of El Niño-induced atmospheric anomalies under greenhouse warming. *Nat Geosci*, 14(6): 377-382
- Hu P, Chen W, Chen S F, et al. 2020. Impact of the September Silk Road Pattern on the South China Sea summer monsoon withdrawal. *Int J Climatol*, 40(15): 6361-6368
- Hu P, Chen W, Chen S F, et al. 2021. Impact of the March Arctic Oscillation on the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 41(S1): E3239-E3248
- Hu P, Chen W, Wang L, et al. 2022. Revisiting the ENSO-monsoonal rainfall relationship: new insights based on an objective determination of the Asian summer monsoon duration. *Environ Res Lett*, 17(10): 104050
- Hu P, Chen W, Chen S F, et al. 2023. Impacts of Pacific Ocean SST on the interdecadal variations of tropical Asian summer monsoon onset: new eastward-propagating mechanisms. *Climate Dyn*, 61(9): 4733-4748
- Hu P, Chen W, Chen S F, et al. 2024. Revisiting the linkage between the Pacific-Japan pattern and Indian summer monsoon rainfall: the crucial role of the Maritime Continent. *Geophys Res Lett*, 51(3): e2023GL106982
- Hu S, Zhou T J, Wu B. 2021. Impact of developing ENSO on Tibetan Plateau summer rainfall. *J Climate*, 34(9): 3385-3400
- Hu Z Z. 1997. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature. *J Geophys Res: Atmos*, 102(D16): 19403-19412
- Hu Z Z, Bengtsson L, Arpe K. 2000. Impact of global warming on the Asian winter monsoon in a coupled GCM. *J Geophys Res: Atmos*, 105(D4): 4607-4624
- Hu Z Z, Yang S, Wu R G. 2003. Long-term climate variations in China and global warming signals. *J Geophys Res: Atmos*, 108(D19): 4614
- Huan D B, Yan Q. 2024. Asymmetric and irreversible response of tropical cyclone potential intensity to CO₂ removal. *Geophys Res Lett*, 51(14): e2024GL109269
- Huang A N, Zhang Y C, Gao X F. 2007. Impacts of coastal SST variability on the East Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 24(2): 259-270
- Huang G. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index. *Adv Atmos Sci*, 21(1): 41-52
- Huang J P, Zhou X J, Wu G X, et al. 2023. Global climate impacts of land-surface and atmospheric processes over the Tibetan Plateau. *Rev Geophys*, 61(3): e2022RG000771
- Huang P, Ying J. 2015. A multimodel ensemble pattern regression method to correct the tropical Pacific SST change patterns under global warming. *J Climate*, 28(12): 4706-4723
- Huang R H, Gambo K. 1983. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources in summer. *J Meteor Soc Japan*, 61(4): 495-509

- Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific for the subtropical high over East Asia//International Conference on the General Circulation of East Asia. Chendu, 40-50
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the Tropical Western Pacific on the East Asian Summer Monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 70(1B): 243-256
- Huang W Y, Wang B, Wright J S. 2016. A potential vorticity-based index for the East Asian winter monsoon. *J Geophys Res: Atmos*, 121(16): 9382-9399
- Huang Y, Fu Z T. 2019. Enhanced time series predictability with well-defined structures. *Theor Appl Climatol*, 138(1-2): 373-385
- Huang Y, Fu Z T. 2023. Estimating prediction horizon of reservoir computer on L63 system when observed variables are incomplete. *J Phys Complex*, 40(2): 025010
- Hurst H E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans Amer Soc Civil Eng*, 116(1): 770-799
- IPCC. 1990. FAR Climate Change: Scientific Assessment of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Ji X, Neelin J D, Mechoso C R. 2016. Baroclinic-to-barotropic pathway in El Niño-southern oscillation teleconnections from the viewpoint of a barotropic rossby wave source. *J Atmos Sci*, 73(12): 4989-5002
- Jiang D B, Lang X M. 2010. Last glacial maximum East Asian monsoon: results of PMIP simulations. *J Climate*, 23(18): 5030-5038
- Jiang D B, Lang X M, Tian Z P, et al. 2013. Mid-Holocene East Asian summer monsoon strengthening: insights from Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP) simulations. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 369: 422-429
- Jiang J L, Su T H, Liu Y M, et al. 2022. Southeast China extreme drought event in august 2019: context of coupling of midlatitude and tropical systems. *J Climate*, 35(22): 7299-7313
- Jiang J L, Liu Y M, Mao J Y, et al. 2023. Extreme heatwave over Eastern China in summer 2022: the role of three oceans and local soil moisture feedback. *Environ Res Lett*, 18(4): 044025
- Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C. 2013. Maximum wind speed changes over China. *Acta Meteor Sinica*, 27(1): 63-74
- Jiang Y Q, Liu X H, Yang X Q, et al. 2013. A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation. *Atmos Environ*, 70: 51-63
- Jin H M, He W P, Liu Q Q, et al. 2016. The applicability of research on moving cut data-approximate entropy on abrupt climate change detection. *Theor Appl Climatol*, 124(1-2): 475-486
- Jin R, Wu Z W, Zhang P. 2018. Tibetan Plateau capacitor effect during the summer preceding ENSO: from the Yellow River climate perspective. *Climate Dyn*, 51(1-2): 57-71
- Kawamura R, Ogasawara T. 2006. On the role of typhoons in generating PJ teleconnection patterns over the Western North Pacific in late summer. *SOLA*, 2: 37-40
- Kimoto M. 2005. Simulated change of the East Asian circulation under global warming scenario. *Geophys Res Lett*, 32(16): L16701
- Ko K C, Liu J H. 2016. Quasi-periodic behavior of the pacific-Japan pattern affecting propagation routes of summertime wave patterns and the associated tropical cyclone tracks over the Western North Pacific. *Mon Wea Rev*, 144(1): 393-408
- Kochkov D, Yuval J, Langmore I, et al. 2024. Neural general circulation models for weather and climate. *Nature*, 632(8027): 1060-1066
- Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132(619): 2009-2030
- Kosaka Y, Nakamura H, Watanabe M, et al. 2009. Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian Jet based on a reanalysis dataset and climate model simulations. *J Meteor Soc Japan*, 87(3): 561-580
- Kosaka Y, Nakamura H. 2010. Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: the Pacific-Japan pattern. *J Climate*, 23(19): 5085-5108
- Kosaka Y, Xie S P, Lau N C, et al. 2013. Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110(19): 7574-7579
- Kubota H, Kosaka Y, Xie S P. 2016. A 117-year long index of the Pacific-Japan pattern with application to interdecadal variability. *Int J Climatol*, 36(4): 1575-1589
- Kuo H L. 1951. Dynamical aspects of the general circulation and the stability of zonal flow. *Tellus*, 3(4): 268-284
- Kutzbach J E, Liu X D, Liu Z Y, et al. 2008. Simulation of the evolutionary response of global summer monsoons to orbital forcing over the past 280,000 years. *Climate Dyn*, 30(6): 567-579
- Kwon M, Jhun J G, Wang B, et al. 2005. Decadal change in relationship between East Asian and WNP summer monsoons. *Geophys Res Lett*, 32(16): L1670
- Kwon M, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid - 1990s. *Geophys Res Lett*, 34(21): L21706
- Lau K M, Peno L. 1992. Dynamics of atmospheric teleconnections during the northern summer. *J Climate*, 5(2): 140-158
- Lau W K M, Kim K M, Lee J Y. 2004. Interannual variability, global teleconnection, and potential predictability associated with the Asian summer monsoon//Chang C P. East Asian Monsoon. Hackensack: World Scientific, 153-176
- Lee J Y, Marotzke J, Bala G, et al. 2023. Future global climate: scenario-based

- projections and near-term information//IPCC. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 553-672
- Lei Y H, Hoskins B, Slingo J. 2014. Natural variability of summer rainfall over China in HadCM3. *Climate Dyn*, 42(1-2): 417-432
- Li C X, Dai G K, Mu M, et al. 2023. Influence of arctic sea-ice concentration on extended-range forecasting of cold events in East Asia. *Adv Atmos Sci*, 40(12): 2224-2241
- Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. 2010a. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950-2000. *Climate Dyn*, 34(4): 501-514
- Li H M, Zhou T J, Li C. 2010b. Decreasing trend in global land monsoon precipitation over the past 50 years simulated by a coupled climate model. *Adv Atmos Sci*, 27(2): 285-292
- Li J P, Chou J F. 1997a. The effects of external forcing, dissipation and nonlinearity on the solutions of atmospheric equations. *Acta Meteor Sinica*, 11(1): 57-65
- Li J P, Chou J F. 1997b. Existence of the atmosphere attractor. *Sci China Ser D Earth Sci*, 40(2): 215-220
- Li J P, Chou J F. 1997c. Further study on the properties of operators of atmospheric equations and the existence of attractor. *Acta Meteor Sinica*, 11(2): 216-223
- Li J P, Zeng Q C. 2002. A unified monsoon index. *Geophys Res Lett*, 29(8): 1274
- Li J P, Chou J F. 2003. Global analysis theory of climate system and its applications. *Chinese Sci Bull*, 48(10): 1034-1039
- Li J P, Wang S H. 2007. Some mathematical and numerical issues in geophysical fluid dynamics and climate dynamics. *Commun Comput Phys*, 3(4): 759-793
- Li J P, Ding R Q. 2011. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogs. *Mon Wea Rev*, 139(10): 3265-3283
- Li J P, Ding R Q. 2013. Temporal-spatial distribution of the predictability limit of monthly sea surface temperature in the global oceans. *Int J Climatol*, 33(8): 1936-1947
- Li J P, Ding R Q. 2015. Weather forecasting | Seasonal and interannual weather prediction//North G, Pyle J, Zhang F Q. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 303-312
- Li J P, Feng J, Ding R Q. 2018a. Attractor radius and global attractor radius and their application to the quantification of predictability limits. *Climate Dyn*, 51(5): 2359-2374
- Li J P, Ruan C Q. 2018b. The North Atlantic–Eurasian teleconnection in summer and its effects on Eurasian climates. *Environ Res Lett*, 13(2): 024007
- Li J P, Zheng F, Sun C, et al. 2019. Pathways of influence of the northern hemisphere mid-high latitudes on East Asian climate: a review. *Adv Atmos Sci*, 36(9): 902-921
- Li J Y, Mao J Y. 2018. The impact of interactions between tropical and midlatitude intraseasonal oscillations around the Tibetan Plateau on the 1998 Yangtze floods. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(713): 1123-1139
- Li L J, Wang B, Zhou T J. 2007. Contributions of natural and anthropogenic forcings to the summer cooling over eastern China: an AGCM study. *Geophys Res Lett*, 34(18): L18807
- Li R C Y, Zhou W. 2018. Revisiting the intraseasonal, interannual and interdecadal variability of tropical cyclones in the western North Pacific. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 11(2): 198-208
- Li R Z, Li J P, Hou Z L, et al. 2025. Estimating the decadal-scale climate predictability limit using nonlinear local Lyapunov exponent with optimal local dynamic analogues. *Climate Dyn*, 63(1): 85
- Li S L, Lu J, Huang G, et al. 2008. Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: a multiple AGCM study. *J Climate*, 21(22): 6080-6088
- Li T, Wang B, Wu B, et al. 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in Western North Pacific during El Niño: a review. *J Meteor Res*, 31(6): 987-1006
- Li T, Wang Y H, Wang B, et al. 2022. Distinctive South and East Asian monsoon circulation responses to global warming. *Sci Bull*, 67(7): 762-770
- Li X, Ding R Q, Li J P. 2020. Quantitative comparison of predictabilities of warm and cold events using the backward nonlinear local lyapunov exponent method. *Adv Atmos Sci*, 37(9): 951-958
- Li X, Ding R Q. 2023. The backward nonlinear local Lyapunov exponent and its application to quantifying the local predictability of extreme high-temperature events. *Climate Dyn*, 60(9-10): 2767-2781
- Li X Y, Lu R Y, Greatbatch R J, et al. 2020. Maintenance mechanism for the teleconnection pattern over the high latitudes of the Eurasian continent in summer. *J Climate*, 33(3): 1017-1030
- Li X Z, Liu X D, Qiu L J, et al. 2013. Transient simulation of orbital-scale precipitation variation in monsoonal East Asia and Arid Central Asia during the last 150 ka. *J Geophys Res: Atmos*, 118(14): 7481-7488
- Li Y D, Wang Y, Song Y, et al. 2008. Characteristics of summer convective systems initiated over the Tibetan Plateau. Part I: origin, track, development, and precipitation. *J Appl Meteorol Climatol*, 47(10): 2679-2695
- Li Y J, Li J P, Feng J. 2013. Boreal summer convection oscillation over the Indo - Western Pacific and its relationship with the East Asian summer monsoon. *Atmos Sci Lett*, 14(2): 66-71
- Li Z H, Dai G K, Mu M. 2024. Effects of stratospheric warming on ural blocking events in winter. *J Geophys Res: Atmos*, 129(2): e2023JD039672
- Liang X Y, Liu Y M, Wu G X. 2005. The role of land-sea distribution in the formation of the Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 32(3):

L03708

- Limpasuvan V, Hartmann D L. 1999. Eddies and the annular modes of climate variability. *Geophys Res Lett*, 26(20): 3133-3136
- Limpasuvan V, Hartmann D L. 2000. Wave-maintained annular modes of climate variability. *J Climate*, 13(24): 4414-4429
- Lin R P, Zhou T J, Qian Y. 2014. Evaluation of global monsoon precipitation changes based on five reanalysis datasets. *J Climate*, 27(3): 1271-1289
- Ling S N, Lu R Y. 2022. Tropical cyclones over the western north pacific strengthen the East Asia—Pacific pattern during summer. *Adv Atmos Sci*, 39(2): 249-259
- Liu A Q, Xue D K, Chen X L, et al. 2024. Emergent constraints on the future East Asian winter surface air temperature changes. *Environ Res Lett*, 19(6): 064050
- Liu B Q, Wu G X, Mao J Y, et al. 2013. Genesis of the South Asian high and its impact on the asian summer monsoon onset. *J Climate*, 26(9): 2976-2991
- Liu C, An S I, Jin F F, et al. 2023. Hysteresis of the El Niño–Southern Oscillation to CO₂ forcing. *Sci Adv*, 9(31): eadh8442
- Liu D, Duan W S, Feng R, et al. 2018. Summer predictability barrier of Indian Ocean dipole events and corresponding error growth dynamics. *J Geophys Res: Oceans*, 123(5): 3635-3650
- Liu D L, Wang L J, Guan Z Y, et al. 2024. Maintenance mechanism for the summertime +EAP/-SR combination pattern. *Climate Dyn*, 62(7): 6555-6578
- Liu G, Zhao P, Chen J M. 2017. Possible effect of the thermal condition of the Tibetan Plateau on the interannual variability of the summer Asian-Pacific oscillation. *J Climate*, 30(24): 9965-9977
- Liu J, Storch H, Chen X, et al. 2005. Simulated and reconstructed winter temperature in the eastern China during the last millennium. *Chinese Sci Bull*, 50(24): 2872-2877
- Liu J, Wang B, Ding Q H, et al. 2009. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: results from ECHO-G model. *J Climate*, 22(9): 2356-2371
- Liu S D, Liu S K. 1985. Nonlinear waves in barotropic model. *Adv Atmos Sci*, 2(2): 147-157
- Liu S F, Duan A M, Wu G X. 2020. Asymmetrical response of the East Asian summer monsoon to the quadrennial oscillation of global sea surface temperature associated with the Tibetan Plateau thermal feedback. *J Geophys Res: Atmos*, 125(20): e2019JD032129
- Liu S K, Fu Z T, Liu S D, et al. 2001. Jacobi elliptic function expansion method and periodic wave solutions of nonlinear wave equations. *Phys Lett A*, 289(1-2): 69-74
- Liu S K, Fu Z T, Liu S D, et al. 2004. Lamé function and multi-order exact solutions to nonlinear evolution equations. *Chaos Soliton Fract*, 19(4): 795-801
- Liu T, Ding Z L. 1998. Chinese loess and the paleomonsoon. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 26: 111-145
- Liu T, Li J P, Li Y J, et al. 2018. Influence of the May Southern annular mode on the South China Sea summer monsoon. *Climate Dyn*, 51(11): 4095-4107
- Liu T, Gao Y Q, Song X S, et al. 2023. A multi-model prediction system for ENSO. *Sci China Earth Sci*, 66(6): 1231-1240
- Liu X D, Chen B D. 2000. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *Int J Climatol*, 20(14): 1729-1742
- Liu X D, Yin Z Y. 2002. Sensitivity of East Asian monsoon climate to the uplift of the Tibetan Plateau. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 183(3-4): 223-245
- Liu X D, Sun H, Miao Y F, et al. 2015. Impacts of uplift of northern Tibetan Plateau and formation of Asian inland deserts on regional climate and environment. *Quat Sci Rev*, 116: 1-14
- Liu X D, Xie X X, Guo Z T, et al. 2022. Model-based orbital-scale precipitation $\delta^{18}\text{O}$ variations and distinct mechanisms in Asian monsoon and arid regions. *Natl Sci Rev*, 9(11): nwac182
- Liu X H, Ding R Q. 2007. The relationship between the Spring Asian Atmospheric circulation and the previous winter Northern Hemisphere annular mode. *Theor Appl Climatol*, 88(1-2): 71-81
- Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al. 2001. Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the Eastern Hemisphere. *Climate Dyn*, 17(4): 327-338
- Liu Y M, Hoskins B, Blackburn M. 2007. Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia. *J Meteor Soc Japan*, 85B: 1-19
- Liu Y M, Wu G X, Hong J L, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: II. Change. *Climate Dyn*, 39(5): 1183-1195
- Liu Y M, Wang Z Q, Zhuo H F, et al. 2017. Two types of summertime heating over Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing II. Sensible heating over Tibetan-Iranian Plateau. *Sci China Earth Sci*, 60(4): 733-744
- Liu Y M, Luan L L, Wu G X, et al. 2023. Impacts of the surface potential vorticity circulation over the Tibetan Plateau on the East Asian monsoon in July. *Atmosphere*, 14(6): 1038
- Lorenz E N. 1963. Section of planetary sciences: the predictability of hydrodynamic flow. *Trans N Y Acad Sci*, 25(4 Series II): 409-432
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17(3): 321-333
- Lu D Y, Ding R Q, Zhong Q J, et al. 2023. A rapid intensification warning index for tropical cyclones based on the analog method. *Geophys Res Lett*, 50(4): e2022GL101951
- Lu M M, Yang S, Li Z N, et al. 2018. Possible effect of the Tibetan Plateau on the "upstream" climate over West Asia, North Africa, South Europe and the North Atlantic. *Climate Dyn*, 51(4): 1485-1498
- Lu M M, Kuang Z M, Yang S, et al. 2020. A bridging role of winter snow over northern China and Southern Mongolia in linking the East Asian winter and summer monsoons. *J Climate*, 33(22): 9849-9862

- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer. *Tellus A*, 54(1): 44-55
- Lu R Y. 2004. Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction. *J Meteor Soc Japan*, 82(1): 155-165
- Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 33(24): L24701
- Lu R Y, Lin Z D. 2009. Role of subtropical precipitation anomalies in maintaining the summertime meridional teleconnection over the Western North Pacific and East Asia. *J Climate*, 22(8): 2058-2072
- Lu Z Y, Dong L, Song F F, et al. 2024. Quantifying the relative contributions of three tropical oceans to the western North Pacific anomalous anticyclone. *Environ Res Lett*, 19(10): 104016
- Luo D H. 2000. Planetary-scale baroclinic envelope Rossby solitons in a two-layer model and their interaction with synoptic-scale eddies. *Dyn Atmos Oceans*, 32(1): 27-74
- Luo D H. 2005. A barotropic envelope Rossby soliton model for block–eddy interaction. Part I: Effect of topography. *J Atmos Sci*, 62(1): 5-21
- Luo D H, Zhang W Q, Zhong L H, et al. 2019. A nonlinear theory of atmospheric blocking: a potential vorticity gradient view. *J Atmos Sci*, 76(8): 2399-2427
- Luo D H, Zhang W Q. 2020. A nonlinear multiscale theory of atmospheric blocking: eastward and upward propagation and energy dispersion of tropospheric blocking wave packets. *J Atmos Sci*, 77(12): 4025-4049
- Lyu M X, Wen M, Wu Z W. 2018. Possible contribution of the inter-annual Tibetan Plateau snow cover variation to the Madden-Julian oscillation convection variability. *Int J Climatol*, 38(10): 3787-3800
- Ma D, Boos W, Kuang Z M. 2014. Effects of orography and surface heat fluxes on the South Asian summer monsoon. *J Climate*, 27(17): 6647-6659
- Ma J, Xie S P, Kosaka Y. 2012. Mechanisms for tropical tropospheric circulation change in response to global warming. *J Climate*, 25(8): 2979-2994
- Ma T T, Wu G X, Liu Y M, et al. 2022. Abnormal warm sea-surface temperature in the Indian Ocean, active potential vorticity over the Tibetan Plateau, and severe flooding along the Yangtze River in summer 2020. *Quart J Roy Meteor Soc*, 148(743): 1001-1019
- Man W M, Zhou T J, Junglaus J H. 2014. Effects of large volcanic eruptions on global summer climate and east asian monsoon changes during the last millennium: analysis of MPI-ESM simulations. *J Climate*, 27(19): 7394-7409
- Manabe S, Wetherald R T. 1975. The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J Atmos Sci*, 32(1): 3-15
- Mandelbrot B B, Van Ness J W. 1968. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*, 10(4): 422-437
- McWilliams J C. 1980. An application of equivalent modons to atmospheric blocking. *Dyn Atmos Oceans*, 5(1): 43-66
- Min S K, Park E H, Kwon W T. 2004. Future projections of East Asian climate change from multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES scenario simulations. *J Meteor Soc Japan*, 82(4): 1187-1211
- Miralles D G, Gentile P, Seneviratne S I, et al. 2019. Land–atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. *Ann N Y Acad Sci*, 1436(1): 19-35
- Mu M. 2000. Nonlinear singular vectors and nonlinear singular values. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 43(4): 375-385
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 10(6): 493-501
- Mu M, Sun L, Dijkstra H A. 2004. The sensitivity and stability of the ocean's thermohaline circulation to finite-amplitude perturbations. *J Phys Oceanogr*, 34(10): 2305-2315
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2007. Season - dependent dynamics of nonlinear optimal error growth and El Niño - Southern Oscillation predictability in a theoretical model. *J Geophys Res: Atmos*, 112(D10): D10113
- Mu M, Zhou F F, Wang H L. 2009. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: conditional nonlinear optimal perturbation. *Mon Wea Rev*, 137(5): 1623-1639
- Mu M, Duan W, Wang Q, et al. 2010. An extension of conditional nonlinear optimal perturbation approach and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 17(2): 211-220
- Mu M, Feng R, Duan W S. 2017. Relationship between optimal precursors for Indian Ocean Dipole events and optimally growing initial errors in its prediction. *J Geophys Res: Oceans*, 122(2): 1141-1153
- Nakamura N, Huang C S Y. 2018. Atmospheric blocking as a traffic jam in the jet stream. *Science*, 361(6397): 42-47
- Nan S L, Li J P. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. *Geophys Res Lett*, 30(24): 2266
- Nian D, Yuan N M, Ying K R, et al. 2020. Identifying the sources of seasonal predictability based on climate memory analysis and variance decomposition. *Climate Dyn*, 55(11): 3239-3252
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J Meteor Soc Japan*, 65(3): 373-390
- Nitta T, Hu Z Z. 1996. Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection. *J Meteor Soc Japan*, 74(4): 425-445
- Noh E, Kim J, Jun S Y, et al. 2021. The role of the pacific-japan pattern in extreme heatwaves over Korea and Japan. *Geophys Res Lett*, 48(18): e2021GL093990
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 55(4): 633-653

- Pan W J, Mao J Y, Wu G X. 2013. Characteristics and mechanism of the 10-20-day oscillation of spring rainfall over southern China. *J Climate*, 26(14): 5072-5087
- Park C, Son S W, Kim H, et al. 2021. Record-breaking summer rainfall in South Korea in 2020: synoptic characteristics and the role of large-scale circulations. *Mon Wea Rev*, 149(9): 3085-3100
- Polson D, Bollasina M, Hegerl G C, et al. 2014. Decreased monsoon precipitation in the Northern Hemisphere due to anthropogenic aerosols. *Geophys Res Lett*, 41(16): 6023-6029
- Porter S C, An Z S. 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 375(6529): 305-308
- Qian Z H, Feng G L, Zhang Z P. 2015. Characteristic of skewed distribution about Chinese daily average temperature records in summer. *Energy Educ Sci Technol Part A: Energy Sci Res*, 33: 33
- Qiao P J, Gong Z Q, Liu W Q, et al. 2022. Asymmetrical synchronization of extreme rainfall events in southwest China. *Int J Climatol*, 42(11): 5935-5948
- Qin X H, Duan W S, Mu M. 2013. Conditions under which CNOP sensitivity is valid for tropical cyclone adaptive observations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 139(675): 1544-1554
- Qin X H, Mu M. 2014. Can adaptive observations improve tropical cyclone intensity forecasts? *Adv Atmos Sci*, 31(2): 252-262 doi:10.1007/s00376-013-3008-0
- Qu X, Huang G, Zhu L H. 2020a. CO₂-induced heat source changes over the Tibetan Plateau in boreal summer-Part I: the total effects of increased CO₂. *Climate Dyn*, 55(7): 1793-1807
- Qu X, Huang G. 2020b. CO₂-induced heat source changes over the Tibetan Plateau in boreal summer-part II: the effects of CO₂ direct radiation and uniform sea surface warming. *Climate Dyn*, 55(5): 1631-1647
- Qu X, Huang G, Hou H Y, et al. 2022. The opposite response of the South Asian high to increasing CO₂ at different heights. *Atmos Sci Lett*, 23(8): e1093
- Qu X, Huang G. 2023. The primary factors influencing the cooling effect of carbon dioxide removal. *npj Climate Atmos Sci*, 6(1): 215
- Queney P. 1948. The problem of air flow over mountains: a summary of theoretical studies. *Bull Amer Meteor Soc*, 29(1): 16-26
- Ren Q J, Mu M, Sun G D, et al. 2023. A new sensitivity analysis approach using conditional nonlinear optimal perturbations and its preliminary application. *Adv Atmos Sci*, 40(2): 285-304
- Ren R C, Zhu C D, Cai M. 2019. Linking quasi-biweekly variability of the South Asian High to atmospheric heating over Tibetan Plateau in summer. *Climate Dyn*, 53(5): 3419-3429
- Rong X Y, Zhang R H, Li T. 2010. Impacts of Atlantic Sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship. *Chinese Sci Bull*, 55(22): 2458-2468
- Rossby C G. 2020. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Mar Res*, 78(1): 43-58
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. *J Atmos Sci*, 45(7): 1228-1251
- Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci Rev*, 99(3-4): 125-161
- Sha Y Y, Shi Z G, Liu X D, et al. 2018. Role of the Tian Shan mountains and Pamir Plateau in increasing spatiotemporal differentiation of precipitation over interior Asia. *J Climate*, 31(19): 8141-8162
- Shen S, Lau K M. 1995. Biennial oscillation associated with the East Asian summer monsoon and tropical sea surface temperatures. *J Meteor Soc Japan*, 73(1): 105-124
- Shi Z G, Liu X D, An Z S, et al. 2011. Simulated variations of eolian dust from inner Asian deserts at the mid-Pliocene, last glacial maximum, and present day: contributions from the regional tectonic uplift and global climate change. *Climate Dyn*, 37(11): 2289-2301
- Shutts G J. 1983. The propagation of eddies in diffluent jetstreams: eddy vorticity forcing of 'blocking' flow fields. *Quart J Roy Meteor Soc*, 109(462): 737-761
- Si D, Ding Y H. 2012. The tropospheric biennial oscillation in the East Asian monsoon region and its influence on the precipitation in China and large-scale atmospheric circulation in East Asia. *Int J Climatol*, 32(11): 1697-1716
- Si D, Ding Y H. 2013. Decadal change in the correlation pattern between the Tibetan Plateau winter snow and the East Asian summer precipitation during 1979-2011. *J Climate*, 26(19): 7622-7634
- Si D, Ding Y H. 2016. Oceanic forcings of the interdecadal variability in East Asian summer rainfall. *J Climate*, 29(11): 7633-7649
- Simmons A J, Hoskins B J. 1978. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves. *J Atmos Sci*, 35(3): 414-432
- Song F F, Zhou T J, Qian Y. 2014. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models. *Geophys Res Lett*, 41(2): 596-603
- Srinivas G, Chowdary J S, Kosaka Y, et al. 2018. Influence of the Pacific-Japan pattern on Indian summer monsoon rainfall. *J Climate*, 31(10): 3943-3958
- Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, et al. 2015. Combination mode dynamics of the anomalous Northwest Pacific anticyclone. *J Climate*, 28(3): 1093-1111
- Sun G D, Mu M. 2014. The analyses of the net primary production due to regional and seasonal temperature differences in eastern China using the LPJ model. *Ecol Modell*, 289: 66-76
- Sun G D, Mu M, You Q L. 2020. Identification of key physical processes and improvements for simulating and predicting net primary production over the Tibetan Plateau. *J Geophys Res: Atmos*, 125(23): e2020JD033128
- Sun G D, Mu M, Ren Q J, et al. 2022. Determinants of physical processes and

- their contributions for uncertainties in simulated evapotranspiration over the Tibetan Plateau. *J Geophys Res: Atmos*, 127(4): e2021JD035756
- Sun G D, Mu M, Zhang Q Y, et al. 2023. Application of the observation-oriented CNOP-P sensitivity analysis method in evapotranspiration simulation and prediction over the Tibetan Plateau. *Water Resour Res*, 59(8): e2022WR033216
- Sun H, Liu X D. 2018. Impacts of the uplift of four mountain ranges on the arid climate and dust cycle of inland Asia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 505: 167-179
- Sun R Z, Duan A M, Chen L L, et al. 2019. Interannual variability of the North Pacific mixed layer associated with the spring Tibetan Plateau thermal forcing. *J Climate*, 32(11): 3109-3130
- Sun X J, Wang P X. 2005. How old is the Asian monsoon system?— Palaeobotanical records from China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 222(3-4): 181-222
- Sun Y, Niu F L, Liu H F, et al. 2012. Crustal structure and deformation of the SE Tibetan Plateau revealed by receiver function data. *Earth Planet Sci Lett*, 349-350: 186-197
- Sun Y, Zhu Z W, Yang Y, et al. 2024. Decadal change in the connection between the Pacific-Japan pattern and the Indian Ocean SST basin mode. *Climate Dyn*, 62(5): 4281-4296
- Sun Y B, Clemens S C, An Z S, et al. 2006. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau. *Quat Sci Rev*, 25(1-2): 33-48
- Sun Y B, Kutzbach J, An Z S, et al. 2015. Astronomical and glacial forcing of East Asian summer monsoon variability. *Quat Sci Rev*, 115: 132-142
- Sun Y B, Wang T, Yin Q Z, et al. 2022. A review of orbital-scale monsoon variability and dynamics in East Asia during the Quaternary. *Quat Sci Rev*, 288: 107593
- Takemura K, Mukougawa H. 2020. Dynamical relationship between quasi-stationary Rossby wave propagation along the Asian jet and Pacific-Japan pattern in boreal summer. *J Meteor Soc Japan*, 98(1): 169-187
- Takemura K, Mukougawa H. 2022. A new perspective of Pacific-Japan pattern: estimated percentage of the cases triggered by Rossby wave breaking. *J Meteor Soc Japan*, 100(1): 115-139
- Takemura K, Mukougawa H. 2023. What percentage of Silk-Road pattern triggers Pacific-Japan pattern through Rossby wave breaking? *J Meteor Soc Japan*, 101(1): 5-19 doi:10.2151/jmsj.2023-001
- Tang H S, Hu K M, Huang G, et al. 2022. Intensification and northward extension of Northwest Pacific anomalous anticyclone in El Niño decaying mid-summer: an energetic perspective. *Climate Dyn*, 58(1-2): 591-606
- Tang S K, Qiao S B, Feng T C, et al. 2022. Predictability of the record-breaking rainfall over the Yangtze and Huaihe River valley in 2020 summer by the NCEP CFSv2. *Atmos Res*, 266: 105956
- Tao L J, Duan W S. 2019. Using a nonlinear forcing singular vector approach to reduce model error effects in ENSO forecasting. *Wea Forecasting*, 34(5): 1321-1342
- Tao L J, Duan W S, Vannitsem S. 2020. Improving forecasts of El Niño diversity: a nonlinear forcing singular vector approach. *Climate Dyn*, 55(3): 739-754
- Tao L J, Duan W S, Jiang L. 2022. Model errors of an intermediate model and their effects on realistic predictions of El Niño diversity. *Int J Climatol*, 42(15): 7443-7464
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of Cmp5 and the experiment design. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(4): 485-498
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 25(9): 1297-1300
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *J Climate*, 13(5): 1000-1016
- Thompson P D. 1957. Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns. *Tellus A*, 9(3): 275-295
- Tian F X, Dong B W, Robson J, et al. 2018. Forced decadal changes in the East Asian summer monsoon: the roles of greenhouse gases and anthropogenic aerosols. *Climate Dyn*, 51(9): 3699-3715
- Tung K K, Lindzen R S. 1979. A theory of stationary long waves. Part I: a simple theory of blocking. *Mon Wea Rev*, 107(6): 714-734
- von Storch H, Zwiers F W. 1999. Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge: Cambridge University Press
- Wakabayashi S, Kawamura R. 2004. Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan. *J Meteor Soc Japan*, 82(6): 1577-1588
- Walker G T. 1924. Correlation in seasonal variations of weather, IX. A further study of world weather. *Mem Indian Meteor Dep*, 24(9): 275-333
- Walker G T, Bliss E W. 1932. World weather V. *Mem Roy Meteor Soc*, 4(36): 53-84
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon Wea Rev*, 109(4): 784-812
- Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. 2007. Development of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 254(3-4): 561-582
- Wang B, Fan Z. 1999. Choice of south Asian summer monsoon indices. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(4): 629-638
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?. *J Climate*, 13(9): 1517-1536
- Wang B, Wu R G, Lau K M. 2001. Interannual variability of the Asian

- summer monsoon: contrasts between the Indian and the Western North Pacific–East Asian monsoons. *J Climate*, 14(20): 4073–4090
- Wang B, Wu R G, Li T. 2003. Atmosphere–warm ocean interaction and its impacts on Asian–Australian monsoon variation. *J Climate*, 16(8): 1195–1211
- Wang B, Ding Q H. 2006. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys Res Lett*, 33(6): L06711
- Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. 2008a. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia. *Geophys Res Lett*, 35(14): L14702
- Wang B, Wu Z W, Li J P, et al. 2008b. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *J Climate*, 21(17): 4449–4463
- Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al. 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: the northern and southern temperature modes. *J Climate*, 23(6): 1495–1512
- Wang B, Liu J, Kim H J, et al. 2012. Recent change of the global monsoon precipitation (1979–2008). *Climate Dyn*, 39(5): 1123–1135
- Wang B, Xiang B Q, Lee J Y. 2013. Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110(8): 2718–2722
- Wang B, Biasutti M, Byrne M P, et al. 2021. Monsoons climate change assessment. *Bull Amer Meteor Soc*, 102(1): E1–E19
- Wang C H, Yang K, Li Y L, et al. 2017. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in Eastern China. *J Climate*, 30(3): 885–903
- Wang C Z. 2018. A review of ENSO theories. *Natl Sci Rev*, 5(6): 813–825
- Wang H J. 1999. Role of vegetation and soil in the Holocene megathermal climate over China. *J Geophys Res: Atmos*, 104(D8): 9361–9367
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv Atmos Sci*, 18(3): 376–386
- Wang M Y, Li J P. 2024. Interpretable predictions of chaotic dynamical systems using dynamical system deep learning. *Sci Rep*, 14(1): 3143
- Wang Q, Mu M. 2015. A new application of conditional nonlinear optimal perturbation approach to boundary condition uncertainty. *J Geophys Res: Oceans*, 120(12): 7979–7996
- Wang Q, Mu M, Sun G D. 2020. A useful approach to sensitivity and predictability studies in geophysical fluid dynamics: conditional nonlinear optimal perturbation. *Natl Sci Rev*, 7(1): 214–223
- Wang T, Wang H J, Otterå O H, et al. 2013. Anthropogenic agent implicated as a prime driver of shift in precipitation in eastern China in the late 1970s. *Atmos Chem Phys*, 13(24): 12433–12450
- Wang T J, Zhong Z, Sun Y, et al. 2022. Characteristics and mechanisms study of abnormal meridional movement of the Western Pacific Subtropical High in July 2020. *Theor Appl Climatol*, 149(1–2): 773–786
- Wang X, Jiang X W, Yang S, et al. 2013. Different impacts of the two types of El Niño on Asian summer monsoon onset. *Environ Res Lett*, 8(4): 044053
- Wang X J, Liu L, Hu P, et al. 2019. Improving the prediction skill for China summer rainfall through correcting leading modes in Beijing Climate Center's Climate System Model. *Int J Climatol*, 39(11): 4329–4339
- Wang Y, Yan P C, Feng T C, et al. 2021. Detection of anthropogenically driven trends in Arctic amplification. *Climatic Change*, 169(3): 41
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2005. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308(5723): 854–857
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2008. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224, 000 years. *Nature*, 451(7182): 1090–1093
- Wang Y M, Li S L, Luo D H. 2009. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation. *J Geophys Res: Atmos*, 114(D2): D02112
- Wang Z Q, Yang S, Lau N C, et al. 2018. Teleconnection between Summer NAO and East China Rainfall Variations: A Bridge Effect of the Tibetan Plateau. *J Climate*, 31(16): 6433–6444
- Wei J H, Lin Z H. 2009. The leading mode of wintertime cold wave frequency in Northern China during the last 42 years and its association with arctic oscillation. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2(3): 130–134
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. 2014. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian High and its influence on summer rainfall over China. *Climate Dyn*, 43(5): 1257–1269
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. 2015. Interannual variation of the South Asian high and its relation with Indian and East Asian summer monsoon rainfall. *J Climate*, 28(7): 2623–2634
- Wei W, Zhang R H, Yang S, et al. 2019. Quasi-biweekly oscillation of the South Asian high and its role in connecting the Indian and East Asian summer rainfalls. *Geophys Res Lett*, 46(24): 14742–14750
- Wei Y T, Mu M, Ren H L, et al. 2019. Conditional nonlinear optimal perturbations of moisture triggering primary MJO initiation. *Geophys Res Lett*, 46(6): 3492–3501
- Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008. *Mon Wea Rev*, 137(3): 1111–1131
- Wen Q, Yang H J. 2020. Investigating the role of the Tibetan Plateau in the formation of pacific meridional overturning circulation. *J Climate*, 33(9): 3603–3617
- Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. 1985. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Phys D Nonlin Phenom*, 16(3): 285–317
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate. *J Climate*, 22(11): 2992–3005
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the Western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer. *J Climate*, 23(11): 2974–2986
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2017a. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the Western North Pacific anomalous anticyclone

- during El Niño. Part I: maintenance mechanisms. *J Climate*, 30(23): 9621-9635
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2017b. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the Western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part II: formation processes. *J Climate*, 30(23): 9637-9650
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter arctic oscillation, siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 29(19): 1897
- Wu G X. 1984. The nonlinear response of the atmosphere to large-scale mechanical and thermal forcing. *J Atmos Sci*, 41(16): 2456-2476
- Wu G X, Liu H Z. 1998. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface. *Dyn Atmos Oceans*, 27(1-4): 715-743
- Wu G X, Liu Y M, Zhang Q, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. *J Hydrometeorol*, 8(4): 770-789
- Wu G X, Liu Y, Zhu X, et al. 2009. Multi-scale forcing and the formation of subtropical desert and monsoon. *Ann Geophys*, 27(9): 3631-3644
- Wu G X, Guan Y, Liu Y M, et al. 2012a. Air-sea interaction and formation of the Asian summer monsoon onset vortex over the Bay of Bengal. *Climate Dyn*, 38(1-2): 261-279
- Wu G X, Liu Y M, Dong B W, et al. 2012b. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: I. Formation. *Climate Dyn*, 39(5): 1169-1181
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2012c. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Sci Rep*, 2: 404
- Wu G X, Duan A M, Liu Y M, et al. 2015a. Tibetan Plateau climate dynamics: recent research progress and outlook. *Natl Sci Rev*, 2(1): 100-116
- Wu G X, He B, Liu Y M, et al. 2015b. Location and variation of the summertime upper-troposphere temperature maximum over South Asia. *Climate Dyn*, 45(9): 2757-2774
- Wu G X, Zhuo H F, Wang Z Q, et al. 2016. Two types of summertime heating over the Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing I. Over Tibetan Plateau. *Sci China Earth Sci*, 59(10): 1996-2008
- Wu G X, Ma T T, Liu Y M, et al. 2020. PV-Q perspective of cyclogenesis and vertical velocity development downstream of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res: Atmos*, 125(16): e2019JD030912
- Wu G X, Tang Y Q, He B, et al. 2022. Potential vorticity perspective of the genesis of a Tibetan Plateau vortex in June 2016. *Climate Dyn*, 58(11): 3351-3367
- Wu Q, Xie X Q, Mei Y, et al. 2021. A new early warning indicator of abrupt climate change based on the changing normalized dynamic range. *Int J Climatol*, 41(5): 2983-2995
- Wu R G. 2002. A mid-latitude Asian circulation anomaly pattern in boreal summer and its connection with the Indian and East Asian summer monsoons. *Int J Climatol*, 22(15): 1879-1895
- Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2010. An interdecadal change in Southern China summer rainfall around 1992/93. *J Climate*, 23(9): 2389-2403
- Wu R G. 2017. Relationship between Indian and East Asian summer rainfall variations. *Adv Atmos Sci*, 34(1): 4-15
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: an observational investigation. *J Climate*, 16(12): 2038-2051
- Wu Z W, Li J P, Wang B, et al. 2009. Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon? *J Geophys Res: Atmos*, 114(D11): D11107
- Xiang S Y, Li Y Q, Li D A, et al. 2013. An analysis of heavy precipitation caused by a retracing plateau vortex based on TRMM data. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 122(1-2): 33-45
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on indo-western pacific climate during the summer following El Niño. *J Climate*, 22(3): 730-747
- Xie S P, Deser C, Vecchi G A, et al. 2010. Global warming pattern formation: sea surface temperature and rainfall. *J Climate*, 23(4): 966-986
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review. *Adv Atmos Sci*, 33(4): 411-432
- Xie X Q, He W P, Gu B, et al. 2019. The robustness of the skewness as an early warning signal for abrupt climate change. *Int J Climatol*, 39(15): 5672-5687
- Xie Y K, Huang J P, Wu G X, et al. 2023. Oceanic repeaters boost the global climatic impact of the Tibetan Plateau. *Sci Bull*, 68(19): 2225-2235
- Xu P Q, Wang L, Chen W, et al. 2019a. Structural changes in the Pacific-Japan pattern in the late 1990s. *J Climate*, 32(2): 607-621
- Xu P Q, Wang L, Chen W. 2019b. The British-Baikal corridor: a teleconnection pattern along the summertime polar front jet over Eurasia. *J Climate*, 32(3): 877-896
- Xu P Q, Wang L, Dong Z Z, et al. 2022. The British-Okhotsk corridor pattern and its linkage to the Silk Road pattern. *J Climate*, 35(17): 5787-5804
- Yan P C, Feng G L, Hou W. 2015. A novel method for analyzing the process of abrupt climate change. *Nonlin Processes Geophys*, 22(3): 249-258
- Yan P C, Hou W, Feng G L. 2016. Transition process of abrupt climate change based on global sea surface temperature over the past century. *Nonlin Processes Geophys*, 23(3): 115-126
- Yan Z W, Wang J, Xia J J, et al. 2016. Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China. *Adv Climate Change Res*, 7(3): 154-168
- Yanai M, Wu G X. 2006. Effects of the Tibetan Plateau//Wang B. The Asian Monsoon. *Berlin*, Heidelberg: Springer, 513-549
- Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. 2002. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophys Res Lett*, 29(8): 1324
- Yang B, Qin C, Wang J L, et al. 2014. A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci*

- USA, 111(8): 2903-2908
- Yang B, Qin C, Bräuning A, et al. 2021. Long-term decrease in Asian monsoon rainfall and abrupt climate change events over the past 6, 700 years. *Proc Natl Acad Sci USA*, 118(30): e2102007118
- Yang F L, Lau K M. 2004. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea-surface temperatures. *Int J Climatol*, 24(13): 1625-1644
- Yang H J, Shen X C, Yao J, et al. 2020a. Portraying the impact of the Tibetan Plateau on global climate. *J Climate*, 33(9): 3565-3583
- Yang H J, Wen Q. 2020b. Investigating the role of the Tibetan Plateau in the formation of Atlantic meridional overturning circulation. *J Climate*, 33(9): 3585-3601
- Yang H W, Ma Y, Gong Z Q, et al. 2023. The intraseasonal surface air temperature reversal and its predictability analysis in 2021/2022 winter over China. *Int J Climatol*, 43(9): 3977-3993
- Yang K, Cai W J, Huang G, et al. 2022. Increased variability of the western Pacific subtropical high under greenhouse warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 119(23): e2120335119
- Yang R W, Gui S, Cao J. 2019. Bay of bengal-East Asia-Pacific teleconnection in boreal summer. *J Geophys Res: Atmos*, 124(8): 4395-4412
- Yang S, Zhang Z Q, Kousky V E, et al. 2008. Simulations and seasonal prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP Climate Forecast System. *J Climate*, 21(5): 3755-3775
- Yatagai A, Yasunari T. 1994. Trends and decadal-scale fluctuations of surface air temperature and precipitation over China and Mongolia during the recent 40 year period (1951-1990). *J Meteor Soc Japan*, 72(6): 937-957
- Yeh T C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere. *J Atmos Sci*, 6(1): 1-16
- Yeh T C. 1950. The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945-46. *Tellus*, 2(2): 173-183
- Yu H P, Huang J P, Li W J, et al. 2014. Development of the analogue-dynamical method for error correction of numerical forecasts. *J Meteor Res*, 28(5): 934-947
- Yu J H, Li T, Tan Z M, et al. 2016. Effects of tropical North Atlantic SST on tropical cyclone genesis in the western North Pacific. *Climate Dyn*, 46(3): 865-877
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia. *Geophys Res Lett*, 31(22): L22212
- Yu R C, Zhou T J. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon. *J Climate*, 20(21): 5344-5355
- Yu W, Liu Y M, Yang X Q, et al. 2021. Impact of North Atlantic SST and Tibetan Plateau forcing on seasonal transition of springtime South Asian monsoon circulation. *Climate Dyn*, 56(1-2): 559-579
- Yu W, Liu Y M, Zhang T T, et al. 2023. Potential impact of winter-spring North Atlantic tripole SSTAs on the following autumn-winter El Niño-Southern Oscillation: bridging role of the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 50(5): e2022GL100663
- Yuan N M, Fu Z T, Liu S D. 2013. Long-term memory in climate variability: a new look based on fractional integral techniques. *J Geophys Res: Atmos*, 118(23): 12962-12969
- Yuan N M, Fu Z T, Liu S D. 2014. Extracting climate memory using fractional integrated statistical model: A new perspective on climate prediction. *Sci Rep*, 4(1): 6577
- Yuan N M, Franzke C L E, Xiong F L, et al. 2022. The impact of long-term memory on the climate response to greenhouse gas emissions. *Npj Climate Atmos Sci*, 5(1): 70
- Yuan N M, Ma C, Franzke C L E, et al. 2023. Separating anthropogenically- and naturally-caused temperature trends: a systematic approach based on climate memory analysis. *Geophys Res Lett*, 50(9): e2022GL102232
- Yue X, Wang H J. 2008. The springtime North Asia cyclone activity index and the Southern Annular Mode. *Adv Atmos Sci*, 25(4): 673-679
- Zang N H, Zhao J H, Yan P C, et al. 2021. Interdecadal variations of persistent extreme heat events in eastern China under global warming. *Theor Appl Climatol*, 146(1-2): 349-364
- Zang N H, Zhao J H, Yan P C, et al. 2023. The interannual variation of the first regional extreme hot events in southeastern China and the possible mechanism. *Atmos Res*, 283: 106569
- Zeng G, Sun Z B, Wang W C, et al. 2007. Interdecadal variability of the east Asian summer monsoon and associated atmospheric circulations. *Adv Atmos Sci*, 24(5): 915-926
- Zhang H X, Li W P, Li W J. 2019. Influence of late springtime surface sensible heat flux anomalies over the Tibetan and Iranian plateaus on the location of the South Asian High in early summer. *Adv Atmos Sci*, 36(1): 93-103
- Zhang K W, Zuo Z Y, Xiao D. 2023. Decadal variations in the meridional thermal contrast in East Asia and its adjacent regions: relative roles of external forcing and internal variability. *J Climate*, 36(17): 5881-5894
- Zhang L X, Zhou T J. 2011. An assessment of monsoon precipitation changes during 1901-2001. *Climate Dyn*, 37(1-2): 279-296
- Zhang L X, Zhou T J. 2015. Decadal change of East Asian summer tropospheric temperature meridional gradient around the early 1990s. *Sci China Earth Sci*, 58(9): 1609-1622
- Zhang L X, Wu P L, Zhou T J. 2017. Aerosol forcing of extreme summer drought over North China. *Environ Res Lett*, 12(3): 034020
- Zhang M, Ding R Q, Zhong Q J, et al. 2024. Application of the conditional nonlinear local lyapunov exponent to second-kind predictability. *Adv Atmos Sci*, 41(9): 1769-1786
- Zhang P F, Liu Y M, He B A. 2016. Impact of East Asian summer monsoon heating on the interannual variation of the South Asian High. *J Climate*, 29(1): 159-173
- Zhang Q Y, Sun G D, Dai G K, et al. 2024. Impact of uncertainties in land surface processes on subseasonal predictability of heat waves onset over

- the Yangtze River Valley. *J Geophys Res: Atmos*, 129(1): e2023JD038674
- Zhang R, Jiang D B, Liu X D, et al. 2012. Modeling the climate effects of different subregional uplifts within the Himalaya-Tibetan Plateau on Asian summer monsoon evolution. *Chinese Sci Bull*, 57(35): 4617-4626
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: a diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J Meteor Soc Japan*, 74(1): 49-62
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 16(2): 229-241
- Zhang R H, Wu B Y, Zhao P, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over Eastern China and its possible causes. *Acta Meteor Sinica*, 22(4): 435-445
- Zhang W Q, Luo D H. 2020. A nonlinear theory of atmospheric blocking: an application to Greenland blocking changes linked to winter Arctic Sea ice loss. *J Atmos Sci*, 77(2): 723-751
- Zhang X, Yao X P, Ma J L, et al. 2016. Climatology of transverse shear lines related to heavy rainfall over the Tibetan Plateau during boreal summer. *J Meteor Res*, 30(6): 915-926
- Zhang X, Barker S, Knorr G, et al. 2021. Direct astronomical influence on abrupt climate variability. *Nat Geosci*, 14(11): 819-826
- Zhang Y S, Li T, Wang B. 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: the associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon. *J Climate*, 17(14): 2780-2793
- Zhang Z S, Wang H J, Guo Z T, et al. 2007. What triggers the transition of palaeoenvironmental patterns in China, the Tibetan Plateau uplift or the Paratethys Sea retreat? *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 245(3-4): 317-331
- Zhang Z S, Flato F, Wang H J, et al. 2012. Early Eocene Asian climate dominated by desert and steppe with limited monsoons. *J Asian Earth Sci*, 44: 24-35
- Zhao G J, Huang G, Wu R G, et al. 2015. A new upper-level circulation index for the East Asian summer monsoon variability. *J Climate*, 28(24): 9977-9996
- Zhao J H, Zhang H, Zuo J Q, et al. 2023. Correction to: oceanic drivers and empirical prediction of interannual rainfall variability in late summer over Northeast China. *Climate Dyn*, 60(11): 4195-4197
- Zhao P, Zhu Y N, Zhang R H. 2007. An Asian-Pacific teleconnection in summer tropospheric temperature and associated Asian climate variability. *Climate Dyn*, 29(2): 293-303
- Zhao P, Chen J M, Xiao D, et al. 2008. Summer Asian-Pacific oscillation and its relationship with atmospheric circulation and monsoon rainfall. *Acta Meteor Sinica*, 22(4): 455-471
- Zhao P, Xu X D, Chen F, et al. 2018. The third atmospheric scientific experiment for understanding the Earth-atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(4): 757-776
- Zhao P, Zhou X J, Chen J M, et al. 2019. Global climate effects of summer Tibetan Plateau. *Sci Bull*, 64(1): 1-3
- Zhao Y, Duan A M, Wu G X. 2018. Interannual variability of late-spring circulation and diabatic heating over the Tibetan Plateau associated with Indian Ocean forcing. *Adv Atmos Sci*, 35(8): 927-941
- Zhao Y, Duan A M, Wu G X. 2021. Opposite responses of the Indian Ocean to the thermal forcing of the Tibetan Plateau before and after the onset of the South Asian monsoon. *J Climate*, 34(20): 8389-8408
- Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S, et al. 2006. Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1500 years. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 17(3): 579-592
- Zheng X T, Xie S P, Liu Q Y. 2011. Response of the Indian Ocean Basin Mode and its capacitor effect to global warming. *J Climate*, 24(23): 6146-6164
- Zheng X T. 2019. Indo-Pacific climate modes in warming climate: consensus and uncertainty across model projections. *Curr Climate Change Rep*, 5(4): 308-321
- Zhong Q J, Li J P, Zhang L F, et al. 2018a. Predictability of tropical cyclone intensity over the Western North Pacific using the IBTrACS dataset. *Mon Wea Rev*, 146(9): 2741-2755
- Zhong Q J, Zhang L F, Li J P, et al. 2018b. Estimating the predictability limit of tropical cyclone tracks over the Western North Pacific using observational data. *Adv Atmos Sci*, 35(12): 1491-1504
- Zhou F L, Zhang R H, Han J P. 2020. Influences of the East Asian summer rainfall on circumglobal teleconnection. *J Climate*, 33(12): 5213-5221
- Zhou S J, Huang G, Huang P. 2020. Inter-model spread of the changes in the East Asian summer monsoon system in CMIP5/6 models. *J Geophys Res: Atmos*, 125(24): 2020JD033016
- Zhou T J, Yu R C, Li H M, et al. 2008a. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half-century. *J Climate*, 21(15): 3833-3852
- Zhou T J, Zhang L X, Li H M. 2008b. Changes in global land monsoon area and total rainfall accumulation over the last half century. *Geophys Res Lett*, 35(16): L16707
- Zhou T J, Gong D Y, Li J, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon-Recent progress and state of affairs. *Meteorol Z*, 18(4): 455-467
- Zhou T J, Song F F, Lin R P, et al. 2013. The 2012 North China floods: explaining an extreme rainfall event in the context of a longer-term drying tendency. *Bull Amer Meteor Soc*, 94: S1-S7
- Zhou T J, Turner A G, Kinter J L, et al. 2016. GMMIP (v1.0) contribution to CMIP6: Global Monsoons Model Inter-comparison Project. *Geosci Model Dev*, 9(10): 3589-3604
- Zhou W J, Donahue D J, Porter S C, et al. 1996. Variability of monsoon climate in East Asia at the end of the last glaciation. *Quat Res*, 46(3): 219-229
- Zhou X Y, Lu R Y. 2019. Interannual variability of the tropical cyclone

- landfall frequency over the Southern and Northern Regions of East Asia in Autumn. *J Climate*, 32(24): 8677-8686
- Zhu C D, Ren R C, Wu G X. 2018. Varying rossby wave trains from the developing to decaying period of the upper atmospheric heat source over the Tibetan Plateau in Boreal Summer. *Adv Atmos Sci*, 35(9): 1114-1128
- Zhu C D, Ren R C. 2019. The Rossby wave train patterns forced by shallower and deeper Tibetan Plateau atmospheric heat-source in summer in a linear baroclinic model. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 12(1): 35-40
- Zhu C W, Wang B, Qian W H, et al. 2012. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: a possible response to global warming. *Geophys Res Lett*, 39(9): L09701
- Zhu H H, Jiang Z H, Li L, et al. 2023. Intercomparison of multi-model ensemble-processing strategies within a consistent framework for climate projection in China. *Sci China Earth Sci*, 66(9): 2125-2141
- Zhu Z W, Li T. 2016. A new paradigm for continental U. S. summer rainfall variability: Asia-North America teleconnection. *J Climate*, 29(20): 7313-7327
- Zu Z Q, Mu M, Dijkstra H A. 2016. Optimal initial excitations of decadal modification of the Atlantic meridional overturning circulation under the prescribed heat and freshwater flux boundary conditions. *J Phys Oceanogr*, 46(7): 2029-2047