

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

黄刚 胡开明 唐颢苏 汪亚 屈侠 赵桂洁

Understanding the Influence of Background Mean-state Field on ENSO Tropical and Extratropical Teleconnection from An Energetic Perspective

HUANG Gang HU Kaiming TANG Haosu WANG Ya QU Xia ZHAO Guijie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2305.23304>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

粒子滤波同化在厄尔尼诺-南方涛动目标观测中的应用

Application of Particle Filter Assimilation in the Target Observation for El Nio-Southern Oscillation

大气科学. 2018, 42(3): 677 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17264>

东亚高空急流协同变化对冬季欧亚遥相关型气候效应的影响

The Influence of Upper Level Jet Streams in East Asia on Climatic Effects of Eurasian Teleconnection Pattern in the Winter

大气科学. 2017, 41(3): 461 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1610.15321>

西北太平洋地区台风环境场的预估研究

Projection of Typhoon-Related Environmental Fields in the Western North Pacific

大气科学. 2020, 44(3): 552 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19168>

CMIP5模式对EU、WP遥相关型的模拟评估和预估

Evaluation and Estimation of Eurasian and West Pacific Teleconnection Pattern in CMIP5

大气科学. 2017, 41(4): 752 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16219>

太平洋年代际振荡、大西洋年代际振荡和全球变暖对北美地区降水的相对贡献

Relative Contributions of Interdecadal Pacific Oscillation, Atlantic Multidecadal Oscillation and Global Warming to the Land Precipitation in North America

大气科学. 2021, 45(6): 1196 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20228>

CMIP5模式对春季北极涛动影响后期冬季ENSO不对称性的模拟能力分析

The Ability of CMIP5 Models in Capturing the Asymmetric Impact of the Spring Arctic Oscillation on the Following Winter El Nio-Southern Oscillation

大气科学. 2020, 44(2): 435 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1908.19124>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄刚, 胡开明, 唐颖苏, 等. 2023. 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 [J]. 大气科学, 47(X): 1–11. HUANG Gang, HU Kaiming, TANG Haosu, et al. 2023. Understanding the Influence of Background Mean-state Field on ENSO Tropical and Extratropical Teleconnection from An Energetic Perspective [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(X): 1–11. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2305.23304

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

黄刚^{1,2,3} 胡开明^{1,2} 唐颖苏^{1,3} 汪亚¹ 屈侠^{1,2} 赵桂洁^{1,4}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 北京市气象台, 北京 100097

摘 要 厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 通过遥相关过程影响全球天气气候。在热带地区, ENSO 能通过影响热带对流层温度导致遥远海盆降水和海表温度异常; 在热带外, ENSO 能通过激发准定常罗斯贝波动造成北美、亚洲等地区气候异常。气候背景场对 ENSO 热带和热带外遥相关有重要影响。一方面, 气候背景大气环流场可以通过正压和斜压能量转换影响 ENSO 遥相关波列的位置和强度。另一方面, 热带气候背景海温和对流场会通过影响湿静力能分布影响 ENSO 热带遥相关过程。这些研究表明分析能量过程有助于理解气候背景场影响 ENSO 遥相关的机理。本文回顾了近几十年来国内外关于气候背景场对 ENSO 热带与热带外遥相关影响的能量分析研究进展, 在此基础上, 回顾了全球变暖背景下 ENSO 遥相关的可能变化, 并提出了一些未来该领域内需要进一步研究的科学问题。

关键词 厄尔尼诺-南方涛动 热带遥相关 热带外遥相关 全球变暖 能量学

文章编号 1006-9895(2023)00-0001-11

中图分类号 P

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2305.23304

Understanding the Influence of Background Mean-state Field on ENSO Tropical and Extratropical Teleconnection from An Energetic Perspective

HUANG Gang^{1,2,3}, HU Kaiming^{1,2}, TANG Haosu^{1,3}, WANG Ya¹,
QU Xia^{1,2}, and ZHAO Guijie^{1,4}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2023-07-18

作者简介 黄刚, 男, 1971 年出生, 研究员/教授, 主要从事气候动力学研究。E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

通讯作者 黄刚, E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (42141019, 41831175, 91937302, 41721004), 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0102)

Funded by the National Natural Science Foundation of China (42141019, 41831175, 91937302, 41721004) and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research program (2019QZKK0102)

4 Beijing Meteorological Station, Beijing 100097

Abstract El Niño-Southern Oscillation (ENSO) influences global weather and climate through teleconnection patterns. In tropical regions, ENSO can induce precipitation and sea surface temperature anomalies over remote ocean basins by influencing tropical tropospheric temperatures. In extratropical regions, ENSO can pose climate impacts over regions such as North America and Asia through the excitation of quasi-stationary Rossby waves. The background mean-state fields are of vital importance to ENSO's tropical and extratropical teleconnections. On one hand, the background mean-state atmospheric circulations can influence the position and intensity of ENSO teleconnection wave trains through barotropic and baroclinic energy conversion. On the other hand, the tropical background mean-state sea surface temperature and convection fields can influence ENSO's tropical teleconnection processes through the adjustment of moist static energy distribution. These studies suggest that analyzing energetic processes can help to understand the mechanisms through which the background mean-state fields influence ENSO teleconnections. The present study reviews the progress in energetic analysis researches on the impacts of the background mean-state fields on ENSO's tropical and extratropical teleconnections in recent decades. Based on it, this study will further review the potential changes of ENSO teleconnections under global warming, and propose some important scientific questions that need to be studied in the future.

Keywords El Niño-Southern Oscillation, tropical teleconnection, extratropical teleconnection, global warming, energy

1 引言

厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 是热带海气耦合年际变率最主要的模态。它可以通过激发大气遥相关对全球天气气候产生影响, 也是全球天气气候季节预报与气候预测最重要的信号来源之一 (Fu and Ye, 1988; Trenberth et al., 1998; Wallace et al., 1998; Huang et al., 2004)。ENSO 可以通过多个物理过程造成全球遥相关。

在热带外地区, ENSO 遥相关主要与热带对流造成的准定常罗斯贝波传播有关。如 Wallace and Gutzler (1981) 利用观测资料发现北半球冬季存在五种大气遥相关型: 分别是西大西洋型、东大西洋型、太平洋-北美型 (Pacific-North America, PNA)、西太平洋型和欧亚型。Horel and Wallace (1981) 进一步发现其中 PNA 遥相关和 ENSO 关系密切。在 ENSO 成熟年冬季, ENSO 会导致热带中东太平洋对流层高层辐散, 形成罗斯贝波源并且激发准定常罗斯贝波动向北美传播, 这是 PNA 遥相关波列形成的重要机制。在 ENSO 衰退年夏季, ENSO 能通过激发东亚-太平洋/太平洋-日本 (East Asia-Pacific/Pacific-Japan, EAP/PJ) 型遥相关波列影响东亚气候 (Huang and Li, 1987; Nitta, 1987)。El Niño 衰退年夏季 EAP/PJ 遥相关与印度洋增暖间存在进一步的正反馈过程, 被称为印度-西太平洋电容器效应

(Indo-western Pacific Ocean capacitor effect, IPOC)。这种跨海盆的海气耦合过程像电容器一样将前冬 ENSO 信号存储并在夏季释放激发西北太平洋异常反气旋, IPOC 理论解释了为什么 ENSO 衰退年夏季全球最显著的气候异常信号被锚定在印度洋-西北太平洋区域, 同时也解释了为什么 EAP/PJ 遥相关是印度洋-西北太平洋地区夏季年际变率的主导模态 (Kosaka et al., 2013; Xie et al., 2016; Du et al., 2022)。

在热带地区, 由于科氏力系数很小, 对流层温度水平梯度只能保持很小的值 (Charney, 1963; Sobel et al., 2001)。ENSO 海表温度异常导致的对流层气温异常会通过热带波动传播至整个热带地区 (Sobel et al., 2002; Su et al., 2003)。对流层温度异常会通过改变海表热通量, 造成印度洋、西太平洋和大西洋海表温度异常, 被称之为大气桥过程 (Lau and Nath, 1996; Klein et al., 1999)。此外, 对流层温度异常会通过改变湿静力能分布从而导致热带降水异常, 被称之为湿遥相关过程 (Neelin and Su, 2005)。

ENSO 还会通过影响经圈环流导致热带外气温和降水异常 (Seager et al., 2003, 2005)。在 El Niño 成熟期, 副热带急流增强并且向赤道偏移。急流的移动使天气波动导致的西风动量辐合区也向赤道偏移, 从而产生了热带外上升而热带下沉的经圈环流异常。经圈环流异常会导致中纬度对流层温

度偏低、降水偏多。

气候态背景场对 ENSO 遥相关有显著影响。[Simmons et al. \(1983\)](#) 发现 PNA 型遥相关的位置与气候态急流出口区的分布有密切联系。在太平洋副热带急流出口区，纬向扁平的扰动环流能从背景场中获取动能，从而有利于 PNA 型遥相关波列的增长和维持。[Hu et al. \(2020\)](#) 研究表明夏季西北太平洋东风信风和西风季风交汇区有利于异常反气旋从背景场中获取动能，El Niño 造成的大气扰动可以在该地区通过正压能量增长发展成反气旋异常，并激发 EAP/PJ 波列。在热带地区，ENSO 的湿遥相关过程也依赖于气候态海温和对流的分布。如 [Neelin and Su \(2005\)](#) 研究发现 El Niño 造成的自由对流层温度异常会在气候态对流区增加水汽异常，从而改变了湿静力能平流，造成热带大西洋和南美亚马逊地区降水负异常。

这些研究表明 ENSO 的气候影响不仅取决于 ENSO 自身也依赖于气候背景场 ([Simmons et al., 1983](#); [杨修群和黄士松, 1992](#); [Neelin and Su, 2005](#); [Hu et al., 2020](#))。目前国内外对 ENSO 的遥相关有很多回顾性质的文章，但是对背景场在 ENSO 遥相关中的作用总结较少。本文主要从能量角度回顾了气候背景场对 ENSO 遥相关的影响。为了系统地回顾这些研究工作，本文安排了以下的章节：第 2 节总结了背景场对 ENSO 热带外遥相关的影响；第 3 节给出背景场对 ENSO 热带遥相关的影响；第 4 节总结了全球变暖下 ENSO 遥相关的可能变化；第 5 节给出了全文的总结和讨论。

2 背景场对 ENSO 热带外遥相关的影响

ENSO 的热带外遥相关主要是由热带波源激发的准定常罗斯贝波传播造成的，对全球天气气候有重要影响 ([图 1](#))。大气背景流场对 ENSO 激发的准定常波动的形成和维持有着重要影响，本小节将从正压与斜压能量转换的角度分析这一过程。

2.1 PNA 与 PSA 遥相关型

热带外的 PNA 遥相关型是最著名的 ENSO 遥相关，其通常被定义为北半球 200 hPa 或 500 hPa 位势高度的经验正交分解第一模态，它是 ENSO 影响北美乃至北大西洋地区温度、降水异常最重要的路径之一，对局地极端天气气候事件有重要调制作用。PNA 环流特征表现为从北太平洋到北美的波列结构，在夏威夷群岛、北太平洋、加拿大和北美东南部存在四个活动中心 ([Wallace and Gutzler, 1981](#))。在 PNA 正 (负) 位相，夏威夷群岛和加拿大西部上空的位势高度为正 (负) 异常，北太平洋和北美东南部为负 (正) 异常，北美区域的西部脊和东部槽被放大 (衰减)。[Horel and Wallace \(1981\)](#) 发现赤道东太平洋海温异常驱使的大气遥相关型与 PNA 型相一致，认为 PNA 是大气对于 ENSO 的响应。[Simmons et al. \(1983\)](#) 进一步发现 PNA 和背景环流场的正压不稳定有密切联系。在北太平洋副热带西风急流出口处，扰动会从背景场获取动能，从而有利于 PNA 遥相关型的发生和维持。前人研究进一步指出，El Niño 与 La Niña

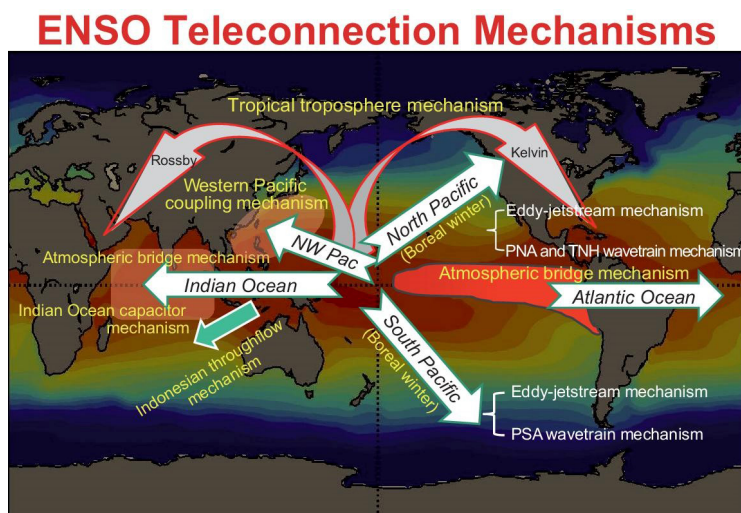


图 1 ENSO 影响全球天气气候的主要遥相关机制示意图。引自 [Yang et al. \(2018\)](#)。

Fig. 1 A schematic illustrating the major teleconnections through which ENSO affects the global weather and climate. From [Yang et al. \(2018\)](#).

对 PNA 波列的影响不是对称的。与 El Niño 发生期间相比,在 La Niña 年激发的 PNA 波列位置会发生西移,这可以归因于热带异常对流位置的不对称 (Hoerling et al., 1997)。基于背景环流场和扰动场的相互作用, Wang et al. (2021) 提出了一个新的 ENSO 对 PNA 波列非对称响应机制。ENSO 盛期,由于热带中东太平洋地区存在对流异常,中东太平洋地区赤道与副热带区域间的经向温度梯度变化,进而导致副热带急流及其出口区位置发生变化。副热带急流出口区的移动会通过影响平均动能向扰动动能的能量转换导致波响应位置不对称。除北半球的 PNA 波列之外,ENSO 同样会影响南半球的太平洋-南美 (Pacific-South America, PSA) 型遥相关波列,其主要特征是新西兰以东、阿蒙森海附近和南美洲出现气压波动,定常波信号向极地和南极洲东侧传播,可以影响阿蒙森海低压的强度,进而调制南极气温、海冰等。能量诊断和线性斜压模式数值试验表明,大气背景场同样可通过影响能量转换导致 PSA 型遥相关的非对称性 (Wang et al., 2022b),这表明前述机制存在一定普适性。

2.2 EAP/PJ 遥相关

Horel and Wallace (1981) 使用热源强迫的大气准定常罗斯贝波理论成功解释了 ENSO 盛期 PNA 遥相关型的形成,自此,针对热带-热带外遥相关的研究日益成为国际气候动力学领域的热点问题。Huang and Li (1987) 指出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存在重要影响,他们将这种遥相关型称为 EAP 遥相关型。同年, Nitta (1987) 利用 1978–1984 年共 7 年的卫星云量资料也独立发现了夏季菲律宾群岛附近的云量与东亚中纬度地区云量呈反相关关系,并将之命名为 PJ 遥相关型。因此,该遥相关型也常被称之为 EAP/PJ 遥相关型。当 EAP/PJ 遥相关型位于正位相时,东亚中纬度地区将被高压控制,造成日本炎热天气以及中国江淮流域旱灾 (Tang et al., 2023a),反之,在负位相时我国江淮流域降水偏多而黄河流域降水偏少 (Nitta, 1987; 黄荣辉和孙凤英, 1994)。因此, EAP/PJ 遥相关型在东亚气候动力学研究中占据重要地位。

EAP/PJ 遥相关型是连接 ENSO 和东亚气候的关键大气桥。很多研究发现 El Niño 能通过导致西太暖池 (Huang and Wu, 1989; Wang et al., 2003)、印度洋 (Xie et al., 2009; Wu et al., 2010) 以及大

西洋 (Rong et al., 2010) 海温异常来激发副热带西北太平洋反气旋式环流异常。该异常反气旋在 El Niño 发展年秋季出现,可一直维持至 El Niño 衰退年夏季,它也被视作 EAP/PJ 遥相关波列的热带部分。除了热带海温的热力强迫外, EAP/PJ 遥相关型也是一个区域大气内部模态,可以从热带对流活动以及通过正压和斜压能量转换从背景场基本流中获得维持自身发展的能量。Kosaka and Nakamura (2006) 指出 EAP/PJ 遥相关型具有垂直向北倾斜的空间结构,这种空间结构有利于从东亚-西北太平洋地区背景环流中获得斜压能量,从而有助于遥相关型的形成和维持 (Hirota and Takahashi, 2012)。Lu and Lin (2009) 指出 EAP/PJ 遥相关型造成的夏季东亚副热带降水异常对 EAP/PJ 遥相关型高层环流场的维持也起了重要作用。Hu et al. (2020) 研究表明夏季西北太平洋东北信风和西南季风交汇区有利于异常反气旋从背景场中获取动能,从而使 EAP/PJ 波列维持 (图 2)。Tang et al. (2021) 利用能量收支分析发现 EAP/PJ 的位置会发生季节内演变,并且这种季节内演变和背景气候态的季节内变化密切相关。从 6 月至 8 月,副热带西风急流逐步向北推进,大气中最有利于发展出扰动环流的位置也在逐步向北推进,从而导致 El Niño 引起的反气旋异常也在逐步向北推进并增强 (唐颖苏等, 2019),对应的 EAP/PJ 遥相关位置也向北推进。

2.3 沿西风急流传播的波列

Hoskins and Ambrizzi (1993) 发现准静止罗斯贝波动会向波数大的区域折射,从而在西风急流强的区域会沿着急流向下游传播。常见的有沿着副热带急流波导传播的遥相关波列 (如丝绸之路型遥相关; Lu et al., 2002; Enomoto et al., 2003; Ding and Wang, 2005) 和沿着极锋急流波导传播的遥相关波列 (Xu et al., 2022)。这些遥相关波列主要是中高纬大气内部模态 (Ding et al., 2011),但是与 ENSO 存在一定联系。如 Hu et al. (2018) 发现 El Niño 导致的热带东太平洋波源会激发沿着副热带急流传播的遥相关波列,导致东亚冬季降水和气温异常。但是 ENSO 对西风急流上波列的影响较为复杂,和热带热源的位置以及副热带急流自身异常都有密切联系 (Li et al., 2006)。Song et al. (2013) 发现在 El Niño 冬季北非上空大气位势涡度经向梯度增强导致北大西洋涛动激发的波列沿着副热带急流传播,在 La Niña 冬季北非上空大气位

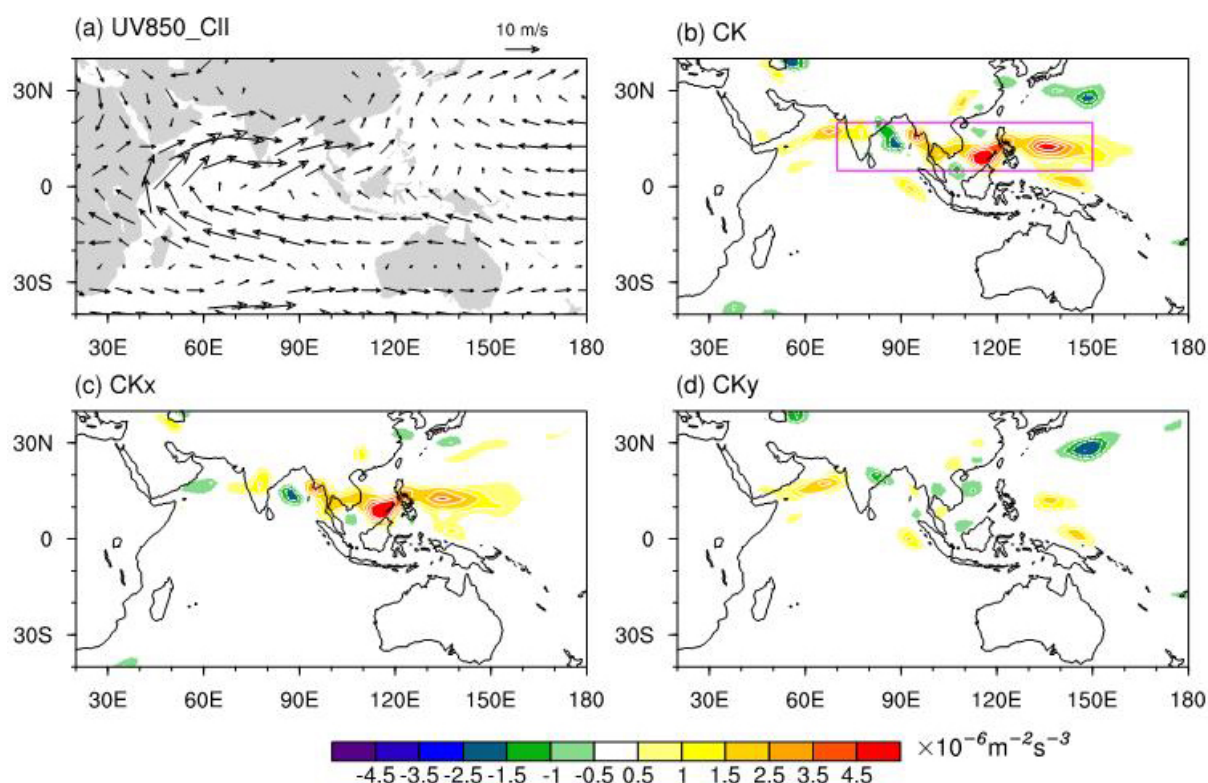


图2 El Niño 衰退年夏季西北太平洋背景场动能和扰动动能之间的转换。(a) 西北太平洋 850-hPa 气候态风场 (矢量, 单位: m/s), (b) 850-hPa 扰动场从背景场中获取的动能转换 (CK, 单位: m^2/s^3), (c) 和 (d) 分别为 CK 的纬向部分和经向部分 (单位: m^2/s^3)。引自 Hu et al. (2019)

Fig. 2 The energy conversion between the background mean flow and perturbations in the Northwest Pacific during the El Niño decaying summer. (a) Boreal summer 850-hPa wind climatology (vectors, unit: m/s). (b) Conversion of kinetic energy (CK, unit: m^2/s^3) at 850-hPa from the basic state to perturbations. (c) and (d) are the zonal and meridional parts of CK (unit: m^2/s^3), respectively. From Hu et al. (2019).

势涡度经向梯度减弱导致北大西洋涛动激发的波列沿着极锋急流传播。Hu et al. (2018) 研究发现与 ENSO 联系紧密的亚洲副热带急流波列具有固定的空间分布, 主要表现为地中海、中东地区、南亚地区、中国南部上空的气旋或反气旋结构, 即位相锁定特征。进一步的分析表明, 该准定常罗斯贝波容易在急流上获取正压和斜压能量。从对波列维持和发展的贡献上看, 尽管正压能量转换比斜压能量转换效率弱, 但对副热带急流波列的位相锁定特征起着关键作用 (Kosaka et al., 2009)。此外, 在地中海以北地区定常波动和瞬变波存在正反馈, 从而有利于准定常罗斯贝波动的维持和发展。

3 背景场对 ENSO 热带遥相关的影响

ENSO 的热带遥相关主要包含 ENSO 造成的整个热带对流层温度、海表温度和降水异常。热带气候背景海温和对流场对 ENSO 热带遥相关发生、发展与维持有重要影响, 本节将回顾能量收支在

这一过程中的作用。

3.1 ENSO 的对流层温度遥相关

热带大气科氏力系数非常小, 大气水平温度梯度只能维持较小的状态, 因此局部海表温度异常导致的对流层温度异常能通过热带波动过程扩散到整个热带地区 (Charney, 1963; Sobel et al., 2001)。很多研究发现 ENSO 是热带对流层温度年际变率的主要驱动因子, El Niño 年热带对流层温度偏暖, 而 La Niña 年热带对流层温度偏冷 (Sobel et al., 2002)。湿对流调整是热带局地海温影响大气对流层温度的重要机制 (Neelin and Su, 2005)。在热带对流区, 对流会让大气向湿对流中性层结调整。当海表温度升高时, 边界层气温和湿度会升高, 增强低层大气湿静力能。与此对应, 湿对流调整过程增加高层大气湿静力能, 使大气继续保持对流中性层结, 从而使自由对流层气温也会升高。在非对流区, 热带自由对流层和海表温度之间的耦合很弱。因此, Sobel et al. (2002) 认为 ENSO 对热带自由

对流层温度的影响, 主要是由气候态对流区海温异常贡献的。但是, Su et al. (2003) 利用数值模式模拟发现局地海温异常对自由对流层温度的影响只是部分依赖于背景场海温及对流。即使在冷舌所在的热带东太平洋, 海温异常依然对热带自由对流层气温异常有较大的贡献。目前这两者观点间的分歧还尚未得到解决。在气候态对流区, 自由对流层大气温度对海温的响应主要是通过湿对流调整来实现; 而在气候态非对流区, 大气边界层气温依旧会受到海表温度异常影响, 会造成边界层水汽辐合异常, 从而可能影响自由对流层大气温度。

3.2 ENSO 的热带海温遥相关

伴随着 El Niño 事件, 南海、印度洋和热带北大西洋会在热带东太平洋海温异常达到峰值后约 3 至 6 个月出现海温正异常。Lau and Nath (1996) 和 Klein et al. (1999) 指出 ENSO 主要是通过改变云以及海表蒸发来造成其它海盆海表温度异常。在东印度洋和南中国海, El Niño 期间的下沉增强减少了云层覆盖, 增加了海洋吸收的太阳辐射, 从而导致海表温度正异常。在热带北大西洋, El Niño 期间信风的减弱减少了地表蒸发, 增加了海表温度。此外, 海洋的动力过程也在 ENSO 的热带海温遥相关中起重要作用 (Xie et al., 2002)。冬季 El Niño 会在东南印度洋激发大气反气旋异常, 造成了下沉海洋罗斯贝波动, 并在 El Niño 次年春季传播至热带西印度洋。由于热带西南印度洋背景气候态温跃层较浅薄, 西传的海洋罗斯贝波动造成的下沉流会导致热带西南印度洋偏暖。热带西南印度洋暖异常进一步会导致印度洋赤道反对称环流风场异常 (Wu et al., 2008), 减弱北印度洋风速和蒸发, 从而造成北印度洋海表温度偏高, 与偏暖的热带西南印度洋共同形成了印度洋海盆一致增温的现象 (Du et al., 2009; 黄刚等, 2016)。热带西南印度洋温跃层深度存在年代际变化, 导致了 ENSO 对印度洋海温遥相关的年代际变化 (Huang et al., 2010; Xie et al., 2010)。

3.3 ENSO 热带降水遥相关

伴随着 El Niño 事件, 赤道中东太平洋降水偏多, 在降水异常偏多区的南北两侧以及西太平洋降水减少, 同时在南美洲和赤道大西洋降水减少。Neelin and Su (2005) 指出 ENSO 的热带降水遥相关与湿静力能收支有密切联系。El Niño 事件期间, 热带中东太平洋暖海温异常增强了局地海洋向

大气能量通量, 导致降水以及自由对流层大气温度正异常。大气温度异常会通过热带波动传播到整个热带。在气候态对流区, 由于湿对流调整的作用, 自由对流层暖异常会导致边界层湿度正异常; 而在气候态非对流区, 边界层湿度异常与自由对流层气温异常不存在耦合关系。因此, 在气候态对流区外围会有明显的负湿静力能平流, 导致了降水的减少。这是亚马逊区域、热带北大西洋以及热带北太平洋降水减少的主要机制 (图 3)。

4 全球变暖背景下 ENSO 遥相关的变化

联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出, 全球平均地表温度较工业革命时期已增温超过 1 摄氏度, 预计未来变暖仍将持续。全球增暖背景下, ENSO 的遥相关过程可能会发生变化 (Yeh et al., 2018; Johnson et al., 2022), 这种变化和背景气候态大气环流、气温以及海温变化密切相关。

4.1 ENSO 热带外遥相关的变化

数值模式预估表明全球变暖下 ENSO 导致的 PNA 和 PSA 遥相关型将向东移动。大量研究表明 PNA、PSA 遥相关波列的移动与热带背景态海温有密切联系, 全球变暖下热带中东太平洋增温更加明显, 导致 El Niño 降水异常向东移动, 进而造成 ENSO 遥相关波列的东移 (Kug et al., 2010; Zhou et al., 2014)。但另一方面, 一些研究指出热带外背景气候态的变化对于 PNA 和 PSA 响应的变化起到一定的作用 (Meehl et al., 2007; Müller and Roeckner, 2008)。Wang et al. (2022b) 发现即使不考虑未来海温增暖的分布型, 海洋均匀增暖也可以导致 PSA 遥相关型的东移现象, 这表明除传统观点认为的对流位置导致波列东移之外, 还有其他因素对其有贡献。进一步研究发现未来气候态副热带急流出口区的东移, 可以通过影响正压能量转换导致波列响应位置东移。这表明未来 ENSO 热带外遥相关的东移现象由多种因素共同导致, 热带外大气背景场的变化在其中发挥重要作用。

4.2 ENSO 热带遥相关的变化

ENSO 具有非常复杂的反馈过程, 这些反馈过程为预估全球变暖下 ENSO 海温振幅的变化带来不确定 (Collins et al., 2010)。相较于 ENSO 海表温度振幅, 数值模式在预估未来 ENSO 降水变化

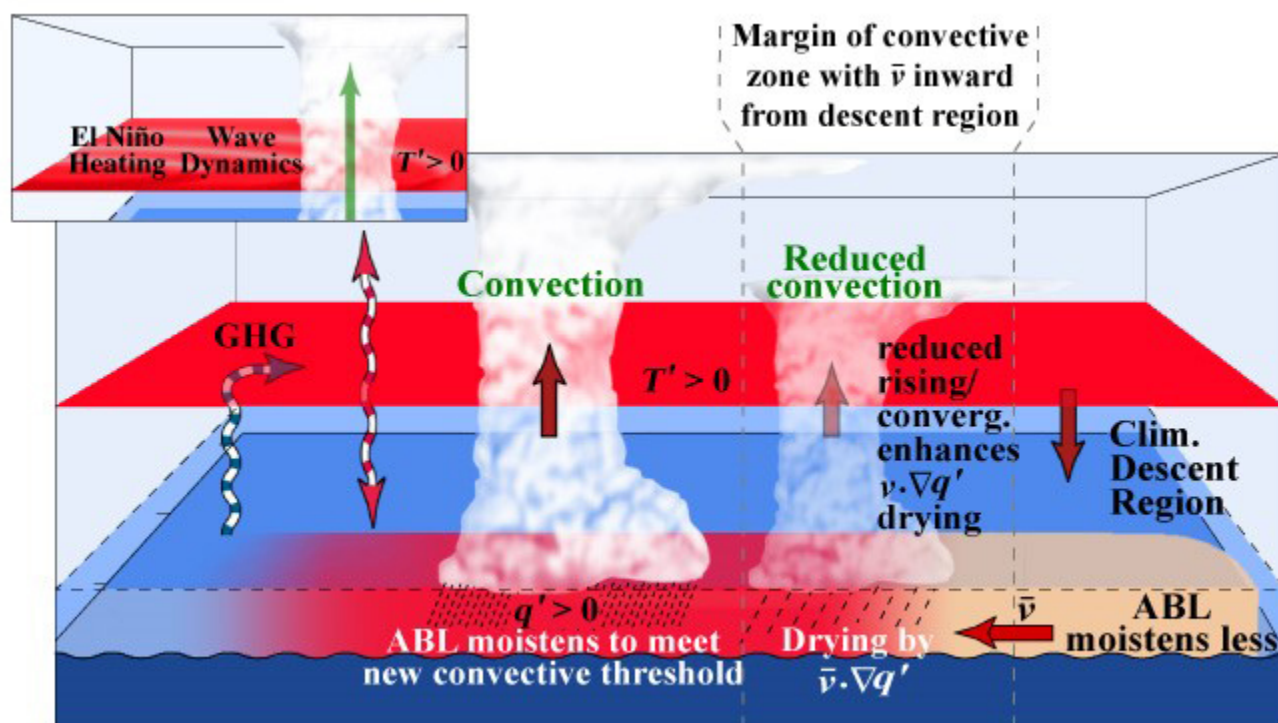


Fig. 3 Schematic diagram of the upped-ante mechanism and the anomalous gross moist stability (rich-get-richer) mechanism. Adapted from [Neelin and Su \(2005\)](#).

上表现一致性，主要表现为热带中太平洋降水强度增强并且向东移动（Power et al., 2013; Cai et al., 2015; Huang and Xie, 2015）。Hu et al.（2021）基于水汽对气温的非线性响应，提出了一个全球变暖下 ENSO 热带遥相关的变化机制 (图 4)。根据克劳修斯-克拉佩龙水汽方程，大气饱和水汽压随着气温增加呈现出准指数型增长，背景温度场每增加 1 摄氏度，水汽含量将增加大约 7%，同时水汽对温度的响应也将增加大约 7%。水汽对气温响应的非线性变化将导致全球变暖下 ENSO 发生一系列确定性变化：首先，水汽对气温响应的增强导致 ENSO 能激发更大的水汽异常；其次，在湿对流调整的约束下，ENSO 激发的热带对流层气温异常将显著增强；最后，根据热成风关系以及热带湿静力稳定度调整，ENSO 导致的副热带高空西风急流异常以及热带降水异常将显著增强。

5 结论与讨论

ENSO 是迄今为止月际至年际尺度气候变率最重要的预测因子, 它的遥相关模态从热带的大气斜压波到热带外的正压 PNA 波列、印太暖池区的

IPOC 模态等, 各不相同。本文重点回顾了背景场对 ENSO 遥相关影响中的能量诊断分析。我们发现能量分析能较好揭示背景场对 ENSO 遥相关的影响机制。一方面, 背景气候态大气环流场可以通过正压和斜压能量转换影响 ENSO 遥相关波列的位置和强度, 如让 ENSO 激发的 PNA 波列固定于北太平洋副热带急流出口位置, 让 EAP/PJ 波列锚定于西北太平洋; 另一方面, 热带背景气候态海温和对流场会通过影响湿静力能分布来造成 ENSO 热带遥相关过程, 如让中国南海、印度洋、大西洋在 El Niño 峰值后 3 至 6 个月出现增暖, 让热带大西洋和亚马逊地区出现负降水异常。

目前大多数研究主要是从线性角度来进行分析，将背景场和 ENSO 导致的遥相关场进行了线性分离，在此基础上研究背景场对 ENSO 遥相关场的影响。很多研究表明 ENSO 对气候的影响可以分为纬向对称部分和纬向非对称部分 (Seager et al., 2003; Adames and Wallace, 2017)。纬向对称指在纬圈上近似均匀分布，主要包含 ENSO 导致的热带对流层温度异常、副热带急流异常、平均经圈环流异常及其对应的中纬度温度和降水异常。纬向非

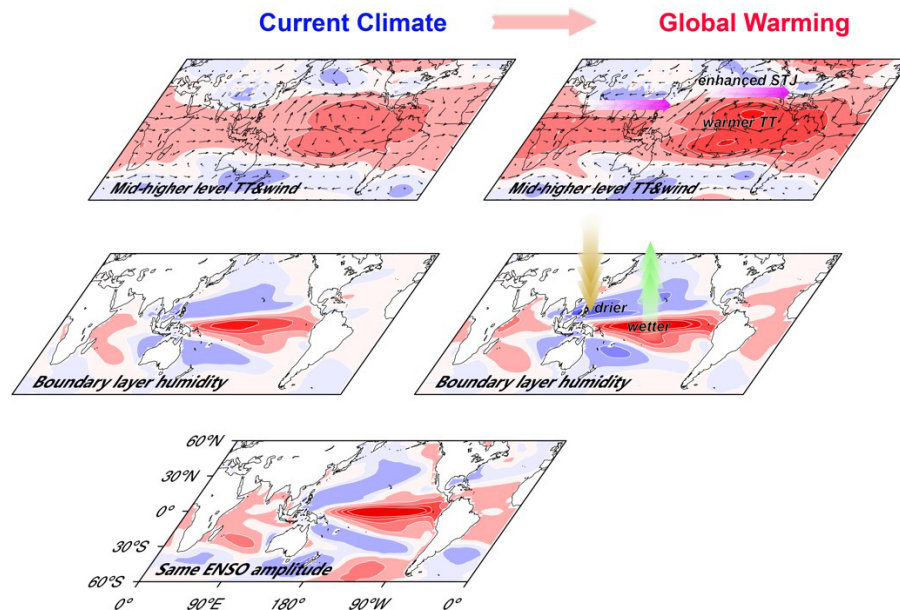


图4 全球变暖下 ENSO 热带遥相关变化示意图。修改自 Hu et al. (2021)。

Fig. 4 Schematic diagram of ENSO tropical teleconnection changes under global warming. Adapted from Hu et al. (2021) .

对称指纬圈上非均匀分布，主要包含 ENSO 导致的沃克环流异常、热带对流异常、和准静止罗斯贝波动异常。ENSO 的纬向对称响应可能会通过影响气候背景场来调制 ENSO 纬向非对称响应。如 El Niño 年副热带急流增强并向赤道偏移可能会改变急流出口区位置，从而改变 PNA 波列的位置。这属于 ENSO 遥相关间的非线性相互作用，然而目前对这种非线性相互作用研究得较少，能量分析将为 ENSO 遥相关间的非线性相互作用提供帮助。

当前 ENSO 遥相关研究领域的另一个挑战是气候模式对热带中东太平洋与全球其他地区遥相关的模拟偏差，这在一定程度上根源于模式对气候背景场的模拟偏差，如模式中赤道太平洋背景气候态冷舌的过度西伸可能会导致 El Niño 次年夏季 EAP/PJ 波列强度模拟偏弱（Jiang et al., 2017; Tao et al., 2018; Tang et al., 2023b）。预估全球变暖背景下 ENSO 遥相关变化的信度依赖于气候模式对历史时期 ENSO 遥相关的模拟性能，减小气候模式中的背景平均态模拟偏差可能可以显著提高模式对 ENSO 遥相关的模拟。此外，如何通过能量学的约束减小未来 ENSO 遥相关变化预估的不确定性也将是本领域未来的重要课题。

参考文献 (References)

Adames Á F, Wallace J M. 2017. On the tropical atmospheric signature

- of El Niño [J]. J. Atmos. Sci., 74(6): 1923–1939. doi:10.1175/JAS-D-16-0309.1
- Cai W J, Santos A, Wang G J, et al. 2015. ENSO and greenhouse warming [J]. Nat. Climate Change, 5(9): 849–859. doi:10.1038/nclimate2743
- Charney J G. 1963. A note on large-scale motions in the tropics [J]. J. Atmos. Sci., 20(6): 607–609. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0607:ANOLSM>2.0.CO;2
- Collins M, An S I, Cai W J, et al. 2010. The impact of global warming on the tropical Pacific ocean and El Niño [J]. Nat. Geosci., 3(6): 391–397. doi:10.1038/ngeo868
- Ding Q H, Wang B, Wallace J M, et al. 2011. Tropical-extratropical teleconnections in boreal summer: Observed interannual variability [J]. J. Climate, 24(7): 1878–1896. doi:10.1175/2011JCLI3621.1
- 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]. J. Climate, 22(8): 2023–2038. doi:10.1175/2008JCLI2590.1
- Du Y, Chen Z S, Xie S P, et al. 2022. Drivers and characteristics of the Indo-western Pacific Ocean capacitor [J]. Front. Climate, 4: 1014138. doi:10.3389/FCLIM.2022.1014138
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 129(587): 157–178. doi:10.1256/qj.01.211
- Fu C B, Ye D Z. 1988. The tropical very low-frequency oscillation on interannual scale [J]. Adv. Atmos. Sci., 5(3): 369–388. doi:10.1007/BF02656760
- Hirota N, Takahashi M. 2012. A tripolar pattern as an internal mode of the East Asian summer monsoon [J]. Climate Dyn., 39(9–10): 2219–2238. doi:10.1007/s00382-012-1416-y
- Hoerling M P, Kumar A, Zhong M. 1997. El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections [J]. J. Climate, 10(8): 1999–2002.

- 1769–1786. doi:[10.1175/1520-0442\(1997\)010<1769:ENOLNA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1769:ENOLNA>2.0.CO;2)
- Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109(4): 813–829. doi:[10.1175/1520-0493\(1981\)109<0813:PSAPAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0813:PSAPAW>2.0.CO;2)
- Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50(12): 1661–1671. doi:[10.1175/1520-0469\(1993\)050<1661:RWPOAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<1661:RWPOAR>2.0.CO;2)
- 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 [J]. *Climate Dyn.*, 51(11): 4123–4137. doi:[10.1007/s00382-017-3674-1](https://doi.org/10.1007/s00382-017-3674-1)
- 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 [J]. *Climate Dyn.*, 53(9): 5725–5741. doi:[10.1007/s00382-019-04893-z](https://doi.org/10.1007/s00382-019-04893-z)
- Hu K M, Huang G, Huang P, et al. 2021. Intensification of El Niño-induced atmospheric anomalies under greenhouse warming [J]. *Nat. Geosci.*, 14(6): 377–382. doi:[10.1038/s41561-021-00730-3](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00730-3)
- Huang G, Hu K M, Xie S P. 2010. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the Northwest Pacific since the Mid-1970s: An atmospheric GCM study [J]. *J. Climate*, 23(19): 5294–5304. doi:[10.1175/2010JCLI3577.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3577.1)
- 黄刚, 胡开明, 屈侠, 等. 2016. 热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾 [J]. *大气科学*, 40(1): 121–130. Huang Gang, Hu Kaiming, Qu Xia, et al. 2016. A review about indian ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(1): 121–130. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143)
- Huang P, Xie S P. 2015. Mechanisms of change in ENSO-induced tropical Pacific rainfall variability in a warming climate [J]. *Nat. Geosci.*, 8(12): 922–926. doi:[10.1038/ngeo2571](https://doi.org/10.1038/ngeo2571)
- Huang R, Li W. 1987. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia [C]//Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia. China, 40–51.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6(1): 21–32. doi:[10.1007/BF02656915](https://doi.org/10.1007/BF02656915)
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响 [J]. *大气科学*, 18(4): 456–465. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impact of the convective activities over the western tropical pacific warm pool on the intraseasonal variability of the East Asian Summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 18(4): 456–465. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1994.04.10](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1994.04.10)
- Huang R H, Chen W, Yang B L, et al. 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21(3): 407–424. doi:[10.1007/BF02915568](https://doi.org/10.1007/BF02915568)
- Jiang W P, Huang G, Hu K M, et al. 2017. Diverse relationship between ENSO and the northwest Pacific summer climate among CMIP5 models: Dependence on the ENSO decay pace [J]. *J. Climate*, 30(1): 109–127. doi:[10.1175/JCLI-D-16-0365.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0365.1)
- Johnson N C, Wittenberg A T, Rosati A J, et al. 2022. Future changes in boreal winter ENSO teleconnections in a large ensemble of high-resolution climate simulations [J]. *Front. Climate*, 4: 941055. doi:[10.3389/fclim.2022.941055](https://doi.org/10.3389/fclim.2022.941055)
- Klein S A, Soden B J, Lau N C. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. *J. Climate*, 12: 917–932. doi:[10.1175/1520-0442\(1999\)012<0917:RSSTVD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<0917:RSSTVD>2.0.CO;2)
- Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific–Japan teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132(619): 2009–2030. doi:[10.1256/qj.05.204](https://doi.org/10.1256/qj.05.204)
- 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]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87(3): 561–580. doi:[10.2151/jmsj.87.561](https://doi.org/10.2151/jmsj.87.561)
- Kosaka Y, Xie S P, Lau N C, et al. 2013. Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110(19): 7574–7579. doi:[10.1073/pnas.1215582110](https://doi.org/10.1073/pnas.1215582110)
- Kug J S, An S I, Ham Y G, et al. 2010. Changes in El Niño and La Niña teleconnections over North Pacific–America in the global warming simulations [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 100(3): 275–282. doi:[10.1007/s00704-009-0183-0](https://doi.org/10.1007/s00704-009-0183-0)
- Lau N C, Nath M J. 1996. The Role of the “Atmospheric Bridge” in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies [J]. *J. Climate*, 9(9): 2036–2057. doi:[10.1175/1520-0442\(1996\)009<2036:TROTBI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2036:TROTBI>2.0.CO;2)
- Li S L, Hoerling M P, Peng S L, et al. 2006. The annular response to tropical Pacific SST forcing [J]. *J. Climate*, 19(9): 1802–1819. doi:[10.1175/JCLI3668.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3668.1)
- 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]. *J. Climate*, 22(8): 2058–2072. doi:[10.1175/2008JCLI2444.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI2444.1)
- 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 [J]. *Tellus A Dyn. Meteor. Oceanogr.*, 54(1): 44–55. doi:[10.3402/tellusa.v54i1.12122](https://doi.org/10.3402/tellusa.v54i1.12122)
- Müller W A, Roeckner E. 2008. ENSO teleconnections in projections of future climate in ECHAM5/MPI-OM [J]. *Climate Dyn.*, 31(5): 533–549. doi:[10.1007/s00382-007-0357-3](https://doi.org/10.1007/s00382-007-0357-3)
- Meehl G A, Tebaldi C, Teng H Y, et al. 2007. Current and future U. S. Weather extremes and El Niño [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(20): L20704. doi:[10.1029/2007GL031027](https://doi.org/10.1029/2007GL031027)
- Neelin J D, Su H. 2005. Moist teleconnection mechanisms for the tropical south american and atlantic sector [J]. *J. Climate*, 18(18): 3928–3950. doi:[10.1175/JCLI3517.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3517.1)
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and

- their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65(3): 373–390. doi:[10.2151/jmsj1965.65.3_373](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.3_373)
- Power S, Delage F, Chung C, et al. 2013. Robust twenty-first-century projections of El Niño and related precipitation variability [J]. *Nature*, 502(7472): 541–545. doi:[10.1038/nature12580](https://doi.org/10.1038/nature12580)
- Rong X Y, Zhang R H, Li T M. 2010. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 55(22): 2458–2468. doi:[10.1007/s11434-010-3098-3](https://doi.org/10.1007/s11434-010-3098-3)
- Seager R, Harnik N, Kushnir Y, et al. 2003. Mechanisms of hemispherically symmetric climate variability [J]. *J. Climate*, 16(18): 2960–2978. doi:[10.1175/1520-0442\(2003\)016<2960:MOHSCV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2960:MOHSCV>2.0.CO;2)
- Seager R, Harnik N, Robinson W A, et al. 2005. Mechanisms of ENSO-forcing of hemispherically symmetric precipitation variability [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131(608): 1501–1527. doi:[10.1256/qj.04.96](https://doi.org/10.1256/qj.04.96)
- Simmons A J, Wallace J M, Branstator G W. 1983. Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection patterns [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40(6): 1363–1392. doi:[10.1175/1520-0469\(1983\)040<1363:BWPAIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1363:BWPAIA>2.0.CO;2)
- Sobel A H, Nilsson J, Polvani L M. 2001. The weak temperature gradient approximation and balanced tropical moisture waves [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58(23): 3650–3665. doi:[10.1175/1520-0469\(2001\)058<3650:TWTGAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<3650:TWTGAA>2.0.CO;2)
- Sobel A H, Held I M, Bretherton C S. 2002. The ENSO signal in tropical tropospheric temperature [J]. *J. Climate*, 15(18): 2702–2706. doi:[10.1175/1520-0442\(2002\)015<2702:TESITT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2702:TESITT>2.0.CO;2)
- Song J, Li C Y, Zhou W. 2013. High and low latitude types of the downstream influences of the North Atlantic Oscillation [J]. *Climate Dyn.*, 42(3–4): 1097–1111. doi:[10.1007/s00382-013-1844-3](https://doi.org/10.1007/s00382-013-1844-3)
- Su H, Neelin J D, Meyerson J E. 2003. Sensitivity of tropical tropospheric temperature to sea surface temperature forcing [J]. *J. Climate*, 16(9): 1283–1301. doi:[10.1175/1520-0442\(2003\)16<1283:SOTTTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1283:SOTTTT>2.0.CO;2)
- 唐颖苏, 胡开明, 黄刚. 2019. El Niño 衰退年夏季西北太平洋异常反气旋季节内演变特征及其机制 [J]. *气候与环境研究*, 24(4): 525–536.
- Tang Haosu, Hu Kaiming, Huang Gang. 2019. Characteristics and mechanisms of sub-seasonal evolution of Northwest Pacific Anomalous anticyclone during the El Niño Decaying Summer [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 24(4): 525–536. doi:[10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18156](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18156)
- Tang H S, Hu K M, Huang G, et al. 2021. Intensification and Northward extension of Northwest Pacific anomalous anticyclone in El Niño decaying mid-summer: An energetic perspective [J]. *Climate Dyn.*, 58(1–2): 591–606. doi:[10.1007/s00382-021-05923-5](https://doi.org/10.1007/s00382-021-05923-5)
- Tang H S, Wang J, Chen Y, et al. 2023a. Human contribution to the risk of 2021 northwestern Pacific concurrent marine and terrestrial summer heat [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 104(3): E673–E679. doi:[10.1175/BAMS-D-22-0238.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0238.1)
- Tang H S, Huang G, Hu K M, et al. 2023b. Weak persistence of Northwest Pacific anomalous anticyclone during post-El Niño summers in CMIP5 and CMIP6 models [J]. *Climate Dyn.*, 61(7–8): 3805–3830.
- Tao W C, Huang G, Wu R G, et al. 2018. Origins of biases in CMIP5 models simulating Northwest Pacific summertime atmospheric circulation anomalies during the decaying phase of ENSO [J]. *J. Climate*, 31(14): 5707–5729. doi:[10.1175/JCLI-D-17-0289.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0289.1)
- Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, et al. 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures [J]. *J. Geophys. Res.*, 103(C7): 14291–14324. doi:[10.1029/97JC01444](https://doi.org/10.1029/97JC01444)
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109(4): 784–812. doi:[10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)
- Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA [J]. *J. Geophys. Res.*, 103(C7): 14241–14259. doi:[10.1029/97JC02905](https://doi.org/10.1029/97JC02905)
- Wang B, Wu R G, Li T. 2003. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation [J]. *J. Climate*, 16(8): 1195–1211. doi:[10.1175/1520-0442\(2003\)16<1195:AOIAII>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1195:AOIAII>2.0.CO;2)
- Wang Y, Hu K M, Huang G, et al. 2021. Asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the Pacific–North American teleconnection pattern: The role of subtropical jet stream [J]. *Environ. Res. Lett.*, 16(11): 114040. doi:[10.1088/1748-9326/ac31ed](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac31ed)
- Wang Y, Huang G, Hu K M, et al. 2022a. Asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the Pacific–South America teleconnection pattern [J]. *J. Climate*, 35(6): 1825–1838. doi:[10.1175/JCLI-D-21-0285.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0285.1)
- Wang Y, Huang G, Hu K M, et al. 2022b. Understanding the eastward shift and intensification of the ENSO teleconnection Over South Pacific and Antarctica under greenhouse warming [J]. *Front. Earth Sci.*, 10: 916624. doi:[10.3389/feart.2022.916624](https://doi.org/10.3389/feart.2022.916624)
- Wu B, Li T M, 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]. *J. Climate*, 23(11): 2974–2986. doi:[10.1175/2010JCLI3300.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3300.1)
- Wu R G, Kirtman B P, Krishnamurthy V. 2008. An asymmetric mode of tropical Indian Ocean rainfall variability in boreal spring [J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D5): D05104. doi:[10.1029/2007JD009316](https://doi.org/10.1029/2007JD009316)
- Xie S P, Annamalai H, Schott F A, et al. 2002. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability [J]. *J. Climate*, 15(8): 864–878. doi:[10.1175/1520-0442\(2002\)015<0864:SAMOSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0864:SAMOSI>2.0.CO;2)
- 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]. *J. Climate*, 22(3): 730–747. doi:[10.1175/2008JCLI2544.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI2544.1)
- Xie S P, Du Y, Huang G, et al. 2010. Decadal shift in El Niño influences on Indo-western Pacific and East Asian climate in the 1970s [J]. *J. Climate*, 23(12): 3352–3368. doi:[10.1175/2010JCLI3300.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3300.1)

[3429.1](#)

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 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(4): 411–432. doi:[10.1007/s00376-015-5192-6](#)

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]. *J. Climate*, 35(17): 5787–5804. doi:[10.1175/JCLI-D-21-0705.1](#)

Yang S, Li Z N, Yu J Y, et al. 2018. El Niño–Southern Oscillation and its impact in the changing climate [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 5(6): 840–857. doi:[10.1093/nsr/nwy046](#)

杨修群, 黄士松. 1992. 北半球夏季遥相关型的水平结构和能量特征

[J]. *气象科学*, 12(2): 119–127. Yang Xiuqun, Huang Shisong. 1992. Horizontal structure and energy characteristics of summer teleconnection patterns in the Northern Hemisphere [J]. *Sci. Meteor. Sinica* (in Chinese), 12(2): 119–127.

Yeh S W, Cai W J, Min S K, et al. 2018. ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing [J]. *Rev. Geophys.*, 56(1): 185–206. doi:[10.1002/2017RG000568](#)

Zhou Z Q, Xie S P, Zheng X T, et al. 2014. Global warming-induced changes in El Niño teleconnections over the North Pacific and North America [J]. *J. Climate*, 27(24): 9050–9064. doi:[10.1175/JCLI-D-14-00254.1](#)