

叶笃正先生“未来的天气气候预测体系”思想的科学内涵及其在人工智能时代的实现路径

黄刚 解朝阳 张彤 任宇 袁仕楼 屈侠 唐颖苏

Scientific Implications of Professor Ye Duzheng's Concept of a Future Weather-Climate Prediction System and Its Implementation Pathways in the Age of Artificial Intelligence

HUANG Gang XIE Chaoyang ZHANG Yitong REN Yuyao YUAN Shilou QU Xia TANG Haosu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2026.26077>

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

基于葵花卫星和人工智能的MCS降水临近预报模型构建及其检验应用

Application of Geostationary Satellite and Artificial Intelligence-Based Precipitation Prediction for the 23 · 7 Extreme Heavy Precipitation Event in North China

气候与环境研究. 2026, 31(1): 47 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2025.24024>

IAP-DCPv3.5气候预测系统的构建及其性能评估

Development and Performance Evaluation of IAP-DCPv3.5 Climate Prediction System

气候与环境研究. 2026, 31(3): 263 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25047>

基于可变分辨率地球系统模式的海河流域极端降水变化预估

Projected Changes in Extreme Precipitation over Haihe River Basin Based on a Variable-Resolution Community Earth System Model

气候与环境研究. 2025, 30(4): 373 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2025.23153>

保险业应对气候变化的现状回顾

A Review of Insurance Industry Responses to Climate Change

气候与环境研究. 2024, 29(3): 377 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23145>

2022年汛期气候趋势预测与展望

Climate Prediction and Outlook in China for the Flood Season 2022

气候与环境研究. 2022, 27(4): 547 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2022.22059>

不同大气强迫作用下陆面模式CAS-LSM多年冻土活动层厚度模拟与不确定性研究

Simulation and Uncertainty of Active Layer Thickness of Permafrost by Land Surface Model CAS-LSM under Different Atmospheric Forcing Data

气候与环境研究. 2021, 26(1): 31 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19144>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



黄刚, 解朝阳, 张祎彤, 等. 2026. 叶笃正先生“未来的天气气候预测体系”思想的科学内涵及其在人工智能时代的实现路径 [J]. 气候与环境研究, 31(5): 1–12. HUANG Gang, XIE Chaoyang, ZHANG Yitong, et al. 2026. Scientific Implications of Professor Ye Duzheng's Concept of a Future Weather-Climate Prediction System and Its Implementation Pathways in the Age of Artificial Intelligence [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 31 (5): 1–12. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2026.26077

叶笃正先生“未来的天气气候预测体系”思想的科学内涵及其在人工智能时代的实现路径

黄刚^{1,2} 解朝阳^{1,2} 张祎彤^{1,2} 任宇垚^{1,2} 袁仕楼^{1,2} 屈侠³ 唐颖苏⁴

1 中国科学院大气物理研究所地球系统数值模拟与应用全国重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

4 谢菲尔德大学地理与规划学院, 谢菲尔德, 英国

摘 要 在全球变化与人工智能快速发展的背景下, 重新审视叶笃正等(2006)提出的“未来的天气气候预测体系”思想, 不仅有助于理解天气气候预测能力演进的内在逻辑, 也为人工智能时代预测体系重构提供了理论依据。结合现阶段气象学科的发展, 本文对叶笃正思想进行了如下三方面的解读: 第一, 将叶先生相关论述概括为“体系化组织、不确定性管理、自然—人类耦合、用户导向”四个相互关联的核心维度; 第二, 指出天气气候预测能力的提升实质上是从单一模型技巧改进转向观测、资料同化、模式演化、评估检验与服务反馈协同耦合的闭环体系建设; 第三, 提出人工智能的现实意义不在于替代物理模式, 而在于作为可嵌入预测体系的功能模块, 在多源信息融合、概率集合生成、误差订正与替身参数化等环节推动体系的结构重组。本文认为, 未来综合预测体系的建设应以物理一致性、可校准的不确定性表达和可治理的系统更新机制为基本原则。

关键词 未来的天气气候预测体系 地球系统动力学 人工智能 不确定性管理 风险沟通

文章编号 1006-9585(2026)05-0001-12

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2026.26077

Scientific Implications of Professor Ye Duzheng's Concept of a Future Weather-Climate Prediction System and Its Implementation Pathways in the Age of Artificial Intelligence

HUANG Gang^{1,2}, XIE Chaoyang^{1,2}, ZHANG Yitong^{1,2}, REN Yuyao^{1,2},
YUAN Shilou^{1,2}, QU Xia³, and TANG Haosu⁴

1 National Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

4 School of Geography and Planning, University of Sheffield, Sheffield, UK

Abstract Reinterpreting Professor Ye Duzheng's concept of a future weather-climate prediction system in the context

收稿日期 2026-06-06; 网络预出版日期 2026-08-14

作者简介 黄刚, 男, 博士, 研究员, 主要从事海气相互作用和人工智能交叉方向研究。E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 42530606、42261144687, 国家重点研发计划 2025YFF0812000

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42530606 and 42261144687), National Key Research and Development Program of China (Grant 2025YFF0812000)

of global change and rapid advances in Artificial Intelligence (AI) helps clarify both its scientific implications and its contemporary relevance. This paper makes three main points. First, Ye's ideas can be organized around four linked dimensions: systems organization, uncertainty management, human–nature coupling, and user-oriented service. Second, improvements in prediction skill increasingly depend not on a single model alone, but on a closed-loop system integrating observations, data assimilation, model evolution, verification, and service feedback. Third, AI should be understood not as a substitute for physical models but as an embedded functional module that can enhance multi-source information fusion, probabilistic ensemble generation, bias correction, and surrogate parameterization. Future integrated prediction systems should therefore be built around physical consistency, calibrated uncertainty quantification, and governable update mechanisms.

Keywords Future weather and climate prediction system, Earth system dynamics, Artificial intelligence, Uncertainty management, Risk communication

1 引言

在全球气候变暖加速、极端事件频发以及社会风险暴露不断上升的背景下，天气气候预测正从以“提高技巧”为核心的技术问题，逐步转向以“支撑风险决策”为导向的系统性问题（Bauer et al., 2015; WMO, 2015）。天气与气候系统本质上是非线性、非平稳、多尺度耦合的复杂系统，具有显著的初值敏感性（Lorenz, 1963），其预测的复杂程度随人类活动强迫的深度融入而进一步加剧。未来预测所面对的已不只是单一方程求解问题，而是一个涉及地球系统多圈层耦合、不确定性传播、人类活动强迫及用户决策接口的综合性科学与工程问题。

在这样的复杂系统背景和预测范式转型背景下，叶笃正先生前瞻性地提出了“未来的天气气候预测体系”思想。叶笃正等（2006）指出：“为使天气气候预测成为有效的决策基础，一方面必须加强天气和气候系统本身的研究，使得预测所赖以进行的理论基础更加完善。另一方面则应该通过和应用者的协作，对各种可能天气气候变化的风险及其应对措施进行评估，针对不同用户决定各预测报告。”由此可见，这一思想的核心并不是简单提高单一预报的准确率，而是将科学预测、风险评估、用户需求和决策反馈组织为相互作用的综合体系。气候变化预测具有显著的不确定性，既要聚焦于最可能发生的气候情景，也必须重视小概率高影响事件的风险防控与预案制定（叶笃正等, 2007; Ye et al., 2009），这一理念进一步凸显了构建综合预测体系的必要性。

叶先生这一思想并非一蹴而就，而是建立在其长期深耕气象科学、持续推动中国天气气候预测理

论发展的基础之上。叶先生早年提出大气长波频散理论（Yeh, 1949），奠定了大气动力学基础；随后围绕东亚与环流问题，创立东亚大气环流理论（Staff Members of Academia Sinica, 1957, 1958; Yeh et al., 1959; 叶笃正等, 1962），为天气预报和短期气候预测奠定了理论基础；进一步提出地转适应理论（Yeh, 1957），并开展青藏高原气象学研究（叶笃正等, 1957; 叶笃正和高由禧, 1979）；再到全球与全人类视角，提出全球气候变化的适应理论和“有序人类活动”的概念（叶笃正等, 2001），引领了全球气候研究的新方向（Fu, 2017; 黄荣辉和黄刚, 2024）。叶先生还提出未来模式的发展目标应把物理气候模式、生物地球化学循环模式和人与自然之间关系的模式三者耦合起来，从而用于各种气候变化和环境变化的预测（叶笃正和吕建华, 2003）。这一脉相承的学术轨迹始终以扎实的物理经验和动力学理论为根基，逐步对天气气候预测进行重构，并将天气气候预测与用户的不同需求结合起来，最终提出“未来的天气气候预测体系”这一构想，这也为人工智能（AI）时代重新理解天气气候预测体系提供了重要理论基础。

值得关注的是，叶先生于 2006 年提出“未来的天气气候预测体系”，并非处在一个单纯追求模式分辨率提升的静态时期。当时，国际上集合预报、概率预报和面向用户决策的综合预测正在加快发展，观测、同化、预报、服务一体化开始成为天气气候预测的重要方向；国内也同步推进自主数值天气预报业务体系建设、资料同化能力提升与预报服务现代化也在持续推进。正是在这一国际与国内双重背景下，叶先生率先突破“提高单一模式预报技巧”的传统思维，将天气气候预测的发展命题提升

至重构整体预测体系的战略高度。

从更宽的思想脉络看，“未来的天气气候预测体系”并不是孤立的技术设想，而是叶先生地球系统观、全球变化研究以及“有序人类活动”理念在预测问题上的延伸。它意味着预测对象不能再局限于狭义自然系统，而应进一步纳入人类活动强迫、风险暴露、用户需求与决策反馈；预测的价值也不再只是科研意义上的“算得更准”，而在于能否服务于风险识别、情景推演和反馈评估。然而人类-自然系统是一个高维、非线性、多反馈的复杂适应系统，人类活动与自然过程深度交织。叶先生在 2001 年就提出：对于随机的群体人类活动，找出其统计规律，并将其作为重要参数纳入地球系统模式，从而实现更精准的气候和环境模拟（叶笃正等, 2001）。这一想法在当时受限于算力与技术条件，未能完全落地，而如今 AI 的快速发展，正逐步将这一设想转化为现实。

天气气候预测能力的提升，本质上是学科知识体系、认知逻辑与系统工程应用能力的持续优化完善。从经验法则、系统观测和数值模式，到集合预报、地球系统模式与智能化方法，预测科学的发展并非断裂式替代，而是围绕复杂系统认知不断扩展证据来源、演化工具和服务接口的连续演进（Bauer et al., 2015; Palmer, 2019）。近年来兴起的 AI 技术为这一过程提供了新的表征方式和计算条件；一批数据驱动模型已在中期天气预报等核心业务中展现出良好的应用效果（Pathak et al., 2022; Bi et al., 2023; Lam et al., 2023）。同时，AI 的出现也拉近了多学科与多圈层之间的距离，实现了多圈层过程的协同模拟、多学科知识的有机整合，为综合预测体系的构建提供了新的技术条件。因此本文关注的重点并不是 AI 是否会取代物理模式，而是在叶先生所提出的体系框架中，AI 可以嵌入哪些环节、改变哪些环节，又必须受到哪些科学约束。

尽管已有研究分别从数值模式发展或 AI 应用角度探讨预测能力提升，但对预测体系本身的结构性重构及其理论内涵仍缺乏系统梳理。本文旨在系统梳理叶笃正先生“未来的天气气候预测体系”思想的科学内涵，并将其置于当代预测科学发展背景下加以重新审视。具体而言，本文首先回顾预测能力从经验预报到现代预测体系的历史演进，进而梳理叶先生关于体系观、不确定性管理、自然—人类耦合与用户导向的核心思想，并在此基础上讨论

AI 条件下这一思想的当代技术条件与工程化实现路径，最后提出面向未来综合预测体系建设的若干原则与评价维度，为构建适应全球变化背景的现代天气气候预测体系提供理论参考与实践思路。本文总体结构如下：第二部分回顾天气气候预测能力的历史演进；第三部分提炼叶笃正先生预测体系思想的核心内涵；第四部分讨论 AI 背景下的实现路径；第五部分提出未来综合预测体系的建设原则与评价框架。

2 从经验预报到现代预测体系：预测能力的历史演进

早期天气预报主要依赖基于长期观测经验所形成的经验性规则，例如“朝霞不出门，晚霞行千里”等谚语。本质上，这类经验规则是对局地环境统计规律和情境识别能力的压缩表达。其价值在于直观、可解释且便于操作，但局限也十分明显：这类规则通常具有强局地性和背景依赖性，难以直接迁移到不同气候区；在全球变化背景下，控制变量、频率分布和相关结构的变化还会进一步削弱其稳定性。

值得注意的是，预报方法从来不只有“经验”与“动力模式”两条彼此割裂的路线。20 世纪后期，国内外已围绕专家系统、统计学习和神经网络开展天气预报探索，国内也曾将相关方法用于台风路径、暴雨和气温降水等预报业务与研究之中。这些尝试虽然受限于算力、样本规模和泛化能力，尚不足以重塑业务体系，但它们已经表明：天气预报中的经验知识并非只能以口传方式存在，而可以被编码、学习和迁移。正如叶笃正等（2006）所预见的，应将难以用物理方程精确描述的经验性知识，提炼为模式可理解的“行为”并植入动力框架，作为一种新的预测思路。这一设想实质上是人类对非线性演变的感性认知进行“参数化”，并与当今人工智能（AI）的发展高度契合：现代 AI 预报的核心，正是利用深度学习从海量资料中自动提取并表征这些复杂的、非解析的系统“行为”。因此，从早期的经验编码到如今的 AI 模式化，反映了人类对大气演变规律认知表达方式的持续演进。

随着近代航运、农业生产和灾害预警需求的增长，系统性观测网络逐步建立起来，标志着气象预报完成了从碎片的“个体口传经验”向标准化、可

积累的客观观测数据的范式转型。在系统观测资料不断积累的基础上,预测方法开始从经验统计逐步迈向基于物理方程的动力学框架,理查森曾尝试依据大气动力和热力学框架进行数值预报,但受限于当时的观测、理论与计算条件,相关尝试尚难成功。直到 1950 年,Charney、Fjortoft 和 von Neumann 利用电子计算机 ENIAC,基于准地转正压涡度方程成功实现了人类历史上第一次数值天气预报(Charney et al., 1950),预测问题才真正进入物理方程与计算框架相结合的定量化阶段。与此同时,模式工程化进程中也存在一定的挑战:计算机资源的限制、初始值的不确定性、计算方案的截断误差、多尺度耦合的复杂性、次网格过程的参数化误差以及模型本身的结构误差,这意味着“算力+方程”并不能给出绝对完美的唯一答案。值得注意的是,在数值模式的演进过程中,理论驱动的底层构建始终是提升模拟精度的关键。叶笃正先生所创立的“能量频散”、“大气运动适应过程”等一系列经典动力学理论(Yeh, 1949, 1957),深刻推动了中国数值天气预报的发展(沈学顺等, 2020)。

随着预测时效延长和系统耦合程度加深,预测能力逐渐受到初值敏感性与边界强迫共同约束,预测中的不确定性逐渐成为无法回避的核心问题。叶笃正等(2006)指出,未来天气气候预测所面对的不确定性,至少可以从三个方面理解:一是初值不确定性,即对系统当前状态的估计并不完备,观测网络的有限性和资料同化误差都会使初始场偏离真实状态,而在具有显著初值敏感性的非线性系统中,这类微小偏差会随时间迅速放大,即所谓的“确定性混沌”特征;二是模式结构不确定性,即不同动力框架、数值离散方案以及次网格物理过程参数化处理方式的差异,会使模拟结果产生系统偏差,当然,随着相关物理过程认识的加深,这类不确定性也可逐步缩小;三是外部强迫情景不确定性,尤其在气候预测和预估中,不同温室气体排放路径、土地利用变化以及火山气溶胶等外部扰动的设定,都会显著影响系统演变方向。由此可见,预测误差并不只是“算得还不够细”的问题,更与我们如何认识系统、表征过程和设定未来情景密切相关。因此,不确定性并非附加问题,而是预测系统的内在属性。

由此,预测观念也随之发生变化,预测科学由确定性描述转向概率描述:预测不再只是给出一个

唯一答案,而是需要给出一组可能结果及其概率分布。集合预报、多模式比较和概率预报因此不只是技术补充,而是应对复杂系统不确定性的观念升级;它们使预测能够从“会不会发生”的判断,进一步转向“以多大概率发生、风险边界在哪里”的表达。也正是在这一转向中,未来预测的关键不再只是提高单一模式技巧,而在于如何把观测、模式、评估、AI 提取的行为规律、概率表达和用户需求组织为一个完整体系。这也为理解叶笃正先生所提出的“未来的天气气候预测体系”提供了重要的历史背景。

3 叶笃正先生“未来的天气气候预测体系”思想的科学内涵

叶笃正等(2006)提出“未来的天气气候预测体系”时,所推动的并不只是预测工具更新,而是对预测对象、预测方式与预测服务关系的整体重构。在全球变化背景下,天气—气候系统耦合增强,不确定性传播更加突出,预测结果与社会决策之间的联系也日益紧密。概括而言,这一思想可提炼为四个相互关联的核心维度:其一,预报是一套系统工程,而非单一模型输出;其二,未来预测必须从追求单值结果转向管理不确定性与风险;其三,预测对象应从狭义自然系统扩展到自然—人类耦合系统;其四,预测结果应面向用户决策与风险沟通。考虑到后两者在叶先生论述中彼此紧密相连,下文在 3.3 中合并讨论。

3.1 预报是一套系统工程

叶先生关于“未来的天气气候预测体系”的第一层推进,在于强调预报能力提升并不等同于某一模式技巧的单点突破,而依赖于观测、资料融合、模式演化、检验评估、业务服务和持续更新等环节的协同组织。真正的“未来的天气气候预测体系”,不是某一模型分辨率更高、参数化更细或技巧评分更优的线性外推,而是多环节协同工作的系统工程。

就运行链条而言,这一体系以观测和再分析资料为证据基础,经资料同化与多源融合形成系统状态估计,由模式作为演化核模拟未来变化,再通过检验与评估实现可证伪、可比较和可校准,随后转化为面向不同用户的服务产品,并在持续观测和用户反馈中完成迭代更新。换言之,这一预测体系本

质上是一种组织知识、组织证据和组织不确定性的工程框架，而不是单一模型性能的线性外推。由此，评价预测能力的对象也不再只是模式技巧本身，而是整条链条在闭环运行中的协同效率、检验能力和服务效用。图1概括了未来的天气气候预测体系的闭环示意图。从系统科学角度看，该体系可理解为一个由状态估计、动力演化、误差传播与决策映射等子系统构成的多模块耦合系统。

3.2 从追求单值预报到管理不确定性与风险

如第二节所述，叶笃正等（2006）已将未来天气气候预测中的不确定性概括为初值、模式结构和外部强迫情景三个来源。本节不再重复其分类展开，而转向讨论叶先生更具前瞻性的推进：如何把不确定性转化为概率信息与风险信息。

具体而言，预测结果不应被理解为一个唯一数值，而应被理解为一组可能结果及其概率分布。由“最大概率”给出的结果归根结底仍是概率事件，

因此预测者需要面向不同用户的风险承受能力和决策目标，对预测信息进行修正并明确告知相应风险。叶先生以降水为例说明，当引入用户风险损失函数后，面向用户的最优产品并不必然等同于概率分布的峰值，而会随风险偏好发生偏移。其意义在于，预测不再只是给出最可能结果，而是要把概率信息转换为可用于决策的风险表达。这类概率信息的有效性还需通过可靠度、分辨率以及 Brier 评分（BS）、连续分级概率评分（continuous ranked probability score，CRPS）等综合指标进行系统评估，以检验其校准性与决策可用性。

因此，这一预测体系的目标不只是“尽量算准”，而是能够表达不确定性、传播不确定性、校准不确定性，并把不确定性转化为可用的风险信息。对于极端事件、小概率高影响事件以及不同区域、不同部门所面对的脆弱性差异，预测体系尤其需要给出概率边界、风险等级和情景说明，而非停

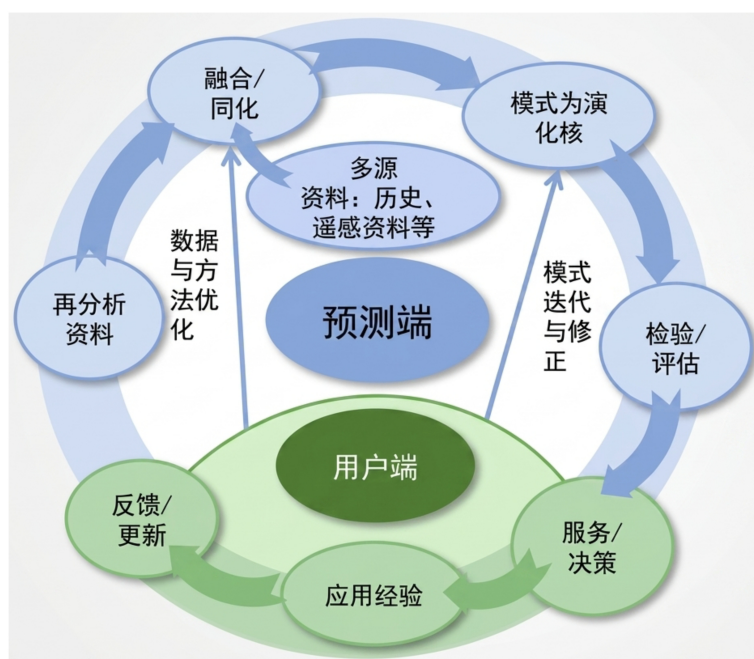


图1 未来的天气气候预测体系的闭环链条示意。蓝色区域代表预测端，绿色区域代表用户端。以“多源资料”（包含历史数据与遥感资料等）为基础输入，通过“融合/同化”进行数据标准化与质量控制；以“模式为演化核”执行核心算法驱动与数值模拟；模拟结果经“检验/评估”后输出，并提炼为“再分析资料”实现预测端的自我修正与更新。最后预测结果转化为“服/决策”直接赋能用户，用户在实际场景中积累“应用经验”，并通过“反馈/更新”模块将实际效果逆向传导。

Fig.1 Schematic diagram of the closed-loop chain of the future weather-climate prediction system. The blue area in the diagram represents the forecasting side, and the green area represents the user side. Based on the input of "multi-source data" (including historical data and remote sensing data, etc.), data standardization and quality control are performed through "fusion/data assimilation". Then, the core algorithm drive and numerical simulation are executed with the "model as the evolution kernel". After the simulation results undergo "verification/evaluation", they are output and refined into "reanalysis data" to achieve self-correction and updates on the forecasting side. Finally, the forecasting results are transformed into "services/decisions" to directly empower users. Users accumulate "application experience" in actual scenarios and reverse-transmit the actual effects back through the "feedback/update" module.

留在单一均值或最可能情形之上。

沿着叶先生关于“不确定性管理—高风险事件识别”的思路，今天有必要进一步把关注对象从一般概率分布扩展到低概率高影响事件及其潜在系统跃迁。叶笃正等（2006）虽然并未直接提出“临界转变（tipping point）”这一术语，但其关于敏感带、脆弱带和风险识别的讨论，为当代相关研究提供了问题意识上的延伸。基于这一延伸，当代研究开始关注海冰、季风、陆地—植被反馈和区域水循环等关键子系统的临界转变信号、敏感区域与脆弱带（Armstrong McKay et al., 2022; Meng and Chen, 2026），并尝试将低概率高影响事件纳入预测与评估框架。世界气候研究计划关于高风险事件的研究（WCRP, 2026），正体现了从“追求单次确定判断”转向“提升风险识别、情景推演和概率表达能力”的这一延伸方向。

3.3 将人类活动与用户决策纳入预测框架

叶先生思想的第三条主轴，在于把预测对象从狭义自然系统扩展到包括人类活动在内的地球系统，并把预测结果的价值判据从科研输出推进到服务决策之中。也就是说，“未来的天气气候预测体系”所面向的，不仅是自然过程本身的演变，而且是自然变化、人类活动与社会决策相互作用的整体框架。

在人类活动的定位上，叶笃正等（2006）指出，温室气体排放、气溶胶变化及陆面生态状态变化等均可通过外部强迫与反馈机制影响气候系统演变。这意味着，人类活动不再只是预测体系之外的背景条件，而是边界条件、外部强迫和反馈结构的一部分。叶先生在讨论“有序人类活动”概念时，已经提出建立“人类活动-生存环境模式”的设想，即在气候系统模式基础上引入人类活动过程参数化子模式，将政策强制性程度、参与人口数、劳动生产率等因素转化为可进入模式的参数；同时，可进一步结合多目标优化参数方法，对环境、经济、社会效益进行量化评估，来评估人类活动总体效率（叶笃正等, 2001）。若结合“有序人类活动”理念来看，这种关系就更为清楚：所谓“有序”，并非简单压缩人类活动总量，而是强调通过制度安排、技术选择和行为调节，使人类活动的强度、空间分布与时间节律尽可能与地球系统承载能力相协调；而“未来的天气气候预测体系”则为这种协调提供风险识别、情景推演和反馈评估的知识基础。由此，

预测不仅要刻画自然演变，还要尽可能把人类活动作为可演化、可反馈的过程变量纳入情景设定、模式表达和服务链条。

在预测与决策的关系上，叶先生强调应打破预测者向用户的单向信息传递。将不确定性转化为风险信息时，还需要考虑不同用户在理解、接受和使用概率预报信息时各有差异，即使对于同一概率信息，在缺乏清晰语境时，不同用户也会产生不同解释。公众需要直观、明确的风险预报信息来指导个体的行动（Gigerenzer et al., 2005; Morss et al., 2008）；行业部门关注风险等级与业务损失之间的关系，例如能源系统中的风光预测不确定性会直接影响电力调度以及市场决策（Möhrlen et al., 2022）；而应急管理部门则需要将概率预报转化为不同风险等级的响应以及资源调度等问题。预测者不仅要提高预报精度，还应依据用户需求和风险偏好，对预报产品的表达方式、风险分级和服务方式进行调整，并将相应风险清晰传达给用户；反过来，用户需求、行业场景和风险函数也应反馈到样本设计、集合预报和产品生成过程中。换言之，用户并非预测链条末端的被动接收者，而是需求约束、风险函数和反馈信息的提供者。这一思路与当代基于影响的预报理念在方向上是相通的，后者强调将气象预警信息与社会经济脆弱性评估相结合（WMO, 2015）。

在其思想基础上的进一步发展，当代研究已开始尝试在地球系统模式中显式引入部分人类活动过程，例如城市化背景下的能源利用与空调使用等（Li et al., 2024）。而人类作为系统中的关键因素甚至最大的不确定性来源，同时具有随机性与秩序性。早期，如耦合模式比较计划第五阶段（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5）气候模拟主要依赖典型浓度路径（Representative Concentration Pathways, RCPs）将人类活动融入到预测、模拟中，耦合模式比较计划第六阶段（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6）时期的社会共享经济路径（Shared Socioeconomic Pathways, SSPs）考虑不同社会发展模式，进一步综合了人口、经济发展等信息，二者均将人类活动过程作为外强迫来驱动模式运行；近年来研究将人类活动作为内生变量，强调气候驱动人类适应的反馈过程（Schoenberg et al., 2025），使得人类活动过程研究从单向强迫转向双向深度耦合。这与叶笃正和季劲钧（2005）强调的“变化—

适应，再变化—再适应”，即人类活动影响气候变化，气候变化驱动人类适应的理念一致。

但具体要模拟“人”，还需从微观到宏观，结合个体行为与群体行为两个角度具体展开。个体往往具有异质的特点，而群体具有临界共识的特点 (Nyborg et al., 2016)。因此，在个体行为层面，可以利用基于智能体的模型 (Agent-Based Modeling, ABM) 捕捉个体异质性与有限理性，将个体行为参数化融入框架中，例如模拟农户对气候变化的适应行为 (Eren, 2025)；在群体行为层面，我们可以结合社会科学复杂网络耦合，将个体意识量变到社会共识临界点的过程，以及群体为应对气候变化采取适应决策的反馈过程参数化加入模拟中。

而这种从单向到双向的深度耦合、从微观向宏观的深度联系的研究，涉及非线性、多维、异构的数据。AI 天然地擅长处理这类数据，能够通过多模态表征学习，融合多圈层，多学科的多源数据信息，构建一个高维空间，进而捕捉其中非线性关系，将自然过程、社会过程、人类活动过程联系起来。

因此，未来应以从整体出发，追求整体系统最优为核心目标，通过社会科学方法与自然科学方法分别指导、交叉指导人类秩序与自然秩序。经济发

展政策能够指定人类文化属性，进而维护未来公共健康、政策适应自然界发展等人类秩序；而生态平衡、物种多样性、自然循环等自然秩序能够促进气候环境有序发展。二者相辅相成，我们可以再利用人工智能和地球系统模式技术，具体地，可以采取 AI 替代地球系统模式中计算量大的参数化方案，反过来，用物理机制来约束 AI 来达到预测目的。图 2 是自然过程、人类活动与预测服务之间的耦合闭环示意图。这种耦合闭环与深度融合有望将叶笃正先生提倡的“有序人类活动”真正转化为可计算、模拟的实际手段，实现人与自然和谐共处。

这些进展与展望并不是对叶先生原始理论的简单延伸，而是沿着其“自然—人类耦合、预测服务于决策”这一核心理念指导下，对模式结构与过程表征的实质性拓展。这说明，叶先生所强调的“自然—人类耦合”和“预测服务于决策”已经不再只是理念层面的倡议，而正在转化为可计算、可表达、可评估的模型结构问题。也正因为如此，第 4 章讨论 AI 的重点不应是其是否替代动力学模式，而应是它能否在观测融合、概率表达、跨尺度衔接和系统治理等关键环节，为这一预测体系补足传统框架中的工程短板。基于这一逻辑，下文将按预测体系



图 2 自然过程、人类活动与预测服务之间的耦合闭环示意。实线双向箭头表示“人类秩序”与“自然秩序”之间的双向反馈，其中从人类秩序指向自然秩序的箭头代表人类活动对自然环境的强迫作用，反向则代表自然气候变化对人类社会的反馈作用；交叉的红色单向箭头分别代表社会科学方法与自然科学方法在处理跨学科问题时的方法论互补与交叉融合路径；垂直双向箭头表示核心目标与具体方法之间的自上而下指导与自下而上支撑反馈。

Fig. 2 Schematic diagram of the coupled loop linking natural processes, human activities, prediction services, and decision feedback. Solid bidirectional arrows represent reciprocal feedback between human and natural orders, where arrows from human to natural indicate anthropogenic forcing on the environment, and the reverse indicates climate change feedback on society. Crossed red arrows illustrate methodological complementarity and integration between social and natural sciences for interdisciplinary problems. Vertical bidirectional arrows depict top-down guidance and bottom-up supportive feedback between core goals and specific methods.

链条, 讨论 AI 的嵌入位置、作用边界及其相应的科学约束。

4 AI 驱动的预测体系重构: 技术基础与工程化实现路径

前述分析表明, 叶笃正先生“未来的天气气候预测体系”所强调的体系化组织、不确定性管理与自然—人类耦合, 并不是一个单纯依靠提高单一模式技巧即可实现的目标。近年来, AI 方法在天气气候预测相关任务中展现出新的潜力, 为多源信息融合、概率集合生成、误差订正与跨尺度衔接等环节提供了新的技术条件 (Pathak et al., 2022; Bi et al., 2023; Lam et al., 2023)。本节围绕预测体系链条中的关键环节, 讨论 AI 的嵌入位置、具体功能与适用边界, 关注的重点在于 AI 能否增强整个预测体系的组织效率、不确定性表达能力和服务可用性。

4.1 AI 的定位: 作为预测体系功能模块的嵌入逻辑

当前, 伴随大模型的成功, 学界出现了一些关于“纯数值模式时代即将结束”的技术乐观论调。面对新技术的快速发展, 尤需保持审慎的科学态度。地球大气系统具有非线性复杂动力机制, 其演变遵循基本热力学与动力学规律。因此, 评估 AI 在我们学科中的深远意义, 不能简单地用不可解释的“黑箱”替代经过数十年发展的动力学模式框架。

相反, AI 更适合被理解作为一种新的表征与计算模块, 用于从海量观测资料和模式输出中提取可预测结构, 并提升预测链条若干环节的计算效率。在这一点上, AI 是对预测体系中特征提取和计算效率的极大增强。AI 正在推动天气气候预测方法层面的重要变化, 但它并未动摇预测科学的根本——高质量的观测基础、自然界严格的物理守恒

约束, 以及系统预报不确定性研究, 依然是科学预报的核心。可以说, AI 的加入推动了预测体系结构的重组, 使之向“物理约束+数据驱动”的混合智能方向演进。

本文讨论 AI, 并非将其视为对动力学框架的替代, 而是将其视为嵌入这一预测体系若干关键环节的一类新方法模块 (表 1)。AI 改变的是预测体系中部分环节的表征方式、计算效率和信息组织能力, 而并未取消观测基础、物理约束和不确定性评估的重要性。

4.2 观测—同化环节: AI 驱动的多源信息融合

叶先生在全球变化与地球系统研究中指出 (叶笃正等, 2001), 地球系统不仅包含大气、海洋、陆地等自然圈层内部的相互作用, 更需将人类活动对各圈层变化过程的影响作为研究的重点。然而, 在传统的资料同化和数值计算框架下, 如何将诸如经济活动排放、土地利用等非平稳社会数据与气象流体变量真正耦合在一起, 始终是制约“地球系统预测”实现的关键瓶颈。

在此基础上, 表征学习等方法为异构数据融合提供了新的可能。以 ClimaX 为例 (Nguyen et al., 2023), 该模型尝试在统一特征空间中联合编码再分析资料、模式输出及不同分辨率变量; Aurora 也展示了基础模型在多类地球系统预测任务上的迁移潜力 (Bodnar et al., 2025)。这些进展表明, AI 有望提升跨尺度、跨模态信息的统一表征能力, 并为将部分与人类活动相关的指标纳入预测框架提供新的技术路径。但这主要意味着表征与融合能力的扩展, 并不意味着人类活动已经能够被充分、稳定地纳入业务预测系统。

需要指出的是, 将人类活动作为“宏观强迫项”与将其作为“内生变量”并不矛盾, 而是对应自然—人类耦合预测体系发展的不同层级。就当前

表 1 AI 在未来的天气气候预测体系中的嵌入环节、主要功能与约束

Table 1 Embedding points, major functions, and constraints of AI in the future weather–climate prediction system

体系环节	AI主要作用	代表任务	主要收益	主要约束
观测/同化	多源信息融合	再分析、遥感、站点和社会经济数据统一编码	改善状态估计、丰富输入	样本偏差、可解释性不足
概率输出/集合	快速生成概率集合	集合预报、概率后处理、小概率高影响事件风险表征	降低计算成本、增强风险表达	可靠性与校准性不足
模式-应用接口	误差订正、降尺度、替身参数化	区域精细化预报、次网格过程近似	打通跨尺度链条	分布漂移、物理一致性风险
运行治理	评估、监测与回滚	基准测试、异常检测、版本控制	提升可检验性与可治理性	指标失配、部署风险

较为可操作的技术路径而言，人口、土地利用、能源消费、排放清单、交通活动和城市运行等人类活动信息，通常首先以外部强迫、边界条件或宏观情景变量的形式进入模式和资料融合环节，用以刻画社会经济活动对气候系统的总体影响；而在更高层次的耦合预测体系中，人类活动还应进一步被表征为能够响应气候风险、政策调节和服务信息，并反向改变排放、用能、土地利用和风险暴露状态的内生过程。前文所述 ABM 与复杂网络耦合参数化主要服务于后一层目标，即刻画个体异质性、群体决策和社会反馈机制；本节所讨论的 AI 多源信息融合，则主要为不同空间—时间尺度、不同数据形态的人类活动信息提供统一编码、尺度转换和反馈识别能力。二者分别对应“从外部强迫进入模式”和“向双向耦合内生过程发展”的两个阶段。

4.3 概率输出环节：AI 支持的不确定性管理

AI 的第二类价值并不在于给出一个更“准”的单值答案，而在于降低大规模集合生成和概率后处理（probabilistic post-processing）的成本，使概率预报、情景扩展和小概率高影响事件的风险表达更具可操作性。以 GenCast 为例（Price et al., 2025），这类方法表明生成高质量概率集合的计算成本有望显著下降，从而提升大样本概率预报在业务中的可行性。其意义主要在于增强异常风险表征、概率校准和不确定性沟通能力，而不宜据此直接推演为对长期气候临界转变的单次预测能力。对于情景发散、长期风险和临界转变问题，仍需地球系统模式、情景设定和物理诊断共同支撑。

4.4 模式—应用接口：AI 作为跨尺度桥梁

AI 在这一预测体系中的第三类作用，是作为观测、模式和区域应用之间的桥梁，通过偏差订正、降尺度和替身模型（surrogate model）等方式改善预测链条不同尺度之间的衔接。这一跨尺度衔接的需求贯穿于叶先生对预测体系的整体构想中，而当代 AI 技术为此提供了新的工程化手段。一方面，AI 可以通过深度学习海量的历史站网观测长序列，学习现有数值模式的结构性以及系统性偏差并开展统计订正；另一方面，深度学习和生成式超分辨率方法已被用于统计降尺度和模式输出的高分辨率重建。例如，DeepSD 将单图像超分辨率思想引入气候降尺度，利用多尺度输入从低分辨率气候模式输出中重建高分辨率气候变量场（Vandal et al., 2017）；基于对抗学习的方法也已被用于降水预报

的随机降尺度（Bihlo, 2021），以及全球气候模式风速和太阳辐射输出的精细化重建，可服务于可再生能源资源评估（Stengel et al., 2020）。这类研究表明，AI 可在较低计算成本下将全球或区域模式背景场转化为更细尺度的局地场信息，但其可靠性仍依赖于训练样本代表性、物理一致性约束和独立检验。此外，利用神经网络构建对流、辐射传输等次网格过程的替身模型，已在气候模式中实现了数量级的计算加速且保持数值稳定性（Gentine et al., 2018; Yuval and O’Gorman, 2020），成为衔接宏观动力约束与区域精细化应用的关键纽带。特别是借助这些基于 AI 的动力—统计降尺度与替身参数化技术，这一预测体系的精细化预报能力有望拓展至青藏高原、干旱半干旱区等地球系统气候敏感带与生态脆弱带，从而推动预报能力切实下沉，更精准地支撑地方防灾减灾与生态适应的精细化业务需求。

4.5 AI 嵌入后的可信性、可检验性与可治理性

在 AI 推动预测技术快速发展的同时，必须警惕纯数据驱动范式的潜在风险。任何脱离物理约束的纯数据模型，在面对气候系统持续暖化带来的分布漂移（distribution shift）时，都可能表现出外推能力下降（Watt-Meyer et al., 2025）。已有研究指出，当前主流 AI 气象模型在热带气旋强度的快速增强预报中存在系统性弱化偏差，对极端温度事件的尾部分布倾向于低估，且在超出再分析训练数据覆盖范围的气候尺度预估中性能明显下降（Bonavita, 2024; Charlton-Perez et al., 2024）。此外，部分模型输出存在违背质量守恒或能量守恒的情形，暴露出纯数据驱动范式在物理一致性上的固有缺陷。

以替身参数化为例，这一风险具有明确的工程含义。神经网络或其他机器学习参数化方案在离线测试中可能表现出较低误差，但一旦嵌入大气或气候模式并与动力框架长期耦合，其误差可能通过温度、水汽、辐射和环流反馈不断累积，进而引发系统漂移、物理守恒偏差甚至数值不稳定。Rasp et al. (2018) 的研究表明，深度学习方法可以用于表征气候模式中的次网格过程；但 Yuval et al. (2021) 也指出，神经网络参数化在在线耦合中可能导致不稳定和气候漂移，其稳定应用依赖于物理约束、训练目标设计和守恒条件处理。因此，AI 替身参数化不能只以离线均方误差或短期技巧评分作为评价标准，而必须同时接受物理一致性、在线稳定性、气候态漂移和极端事件响应等多维检验。

叶先生提出的“预测体系必须具有可评价性与可检验性”的原则，在 AI 时代尤为重要。要将 AI 安全地嵌入这一预测体系，就要求我们必须划定基本科学底线：既要构建严格的物理一致性基准测试框架（benchmark），更要形成涵盖“多维评估—审慎部署—实时监测—错误反馈—敏捷回滚”的系统治理闭环。因此，AI 模块被纳入这一预测体系的前提，不只是技巧提升，更在于其输出必须在物理一致性、概率可靠性和运行治理上经得起持续检验。

5 展望与结语：迈向可检验、可治理的综合预测体系

面向全球变化背景下的未来预测，天气气候预测体系将不是孤立的模式系统，而是由多源数据输入、物理约束、混合演化核、概率输出、评估检验、服务决策和反馈更新共同构成的闭环体系。

为了实现这一闭环体系，未来的天气气候预测体系建设须遵循以下三个建设标准：（1）物理一致性。在引入 AI 技术时，任何智能模型的构建与应用都不能违背基本物理定律，也要避免陷入纯数据驱动的“黑箱”误区；（2）可检验的不确定性。不确定性管理是叶先生“未来的天气气候预测体系”思想的核心内容，预测的结果不能只是单一的值，而是一系列结果的集合或分布。所以预测体系不仅要输出集合预报，更要确保给出的概率预测是可靠的，输出的概率分布必须具备高度的可靠性与可校准性，能够真实反映气候系统中的小概率高影响事件风险与不同强迫情景下的发散性；（3）可治理的更新机制。预测体系本身是一个会不断更新和动态发展的预测系统，并不是一成不变的静态模型，因此整个体系都需进行版本化管理，当预测出现系统性偏差时，能够快速定位问题所在，实现模块的更新与完善，确保技术迭代在透明、安全的框架下进行，从而实现预测系统从模型更新向系统治理的转变。

我们还要重新定义天气气候预测体系的评价标准，打破以往只把模型技巧是否先进当作核心的单一评价维度，建立起包含技术准确性、物理一致性、不确定性可靠性、决策可用性的四维评价框架（表 2）。未来预测工作的目标并不是追求论文相关的指标，而是面向不同行业、不同区域和不同决

策主体给出真正能落地、能实用的预测结果，即实现从科学认知到决策支持的有效转化。未来的预测输出也不再是单一确定性数值，而是多情景、多概率维度的信息集合，结合用户需求的情景分析、风险等级与置信区间，通过人机协同的方式完成信息解释与风险沟通，从而实现从气象数据精准预测到预报成果实用落地的升级。

表 2 四维评价框架

Table 2 A four-dimensional framework for evaluating integrated prediction systems

评价维度	核心问题	可参考指标
技术准确性	预测精度如何	技巧评分、极端事件识别率等
物理一致性	是否满足基本物理约束	质量/能量守恒、稳定性、尺度一致性
不确定性可靠性	概率信息是否可靠	校准度、离散度、小概率高影响事件风险表征
决策可用性	是否支持实际决策	行业适配性、风险沟通效果、服务场景

叶笃正先生的“未来的天气气候预测体系”思想指出未来的预测体系必须突破单一模型的局限，将人类活动、用户需求与风险管理纳入统一框架，这一思想的核心价值不仅是提出了一套气象预测的体系化构想，更在于重构了预测问题的研究范式与价值导向，为预测科学的发展指明了方向。如今，AI 技术的出现与应用并非是对传统预测科学的颠覆与替代，而是在新的技术条件下，为叶先生的构想提供实现路径和工程化支撑，也是对预测体系的扩展与完善，能在更高的维度上实现叶先生的前瞻性构想。

尽管 AI 为叶先生提出的预测体系提供了强大的技术支撑，但在深度融合过程中仍面临一系列不可忽视的风险与挑战。现有 AI 模型高度依赖再分析资料和模式输出，而这些数据本身包含观测误差、同化偏差和非均匀时空覆盖。当训练数据在极端事件、长期趋势或区域特征上存在系统性偏差时，AI 模块可能放大而非修正这些偏差，导致预测在罕见事件或气候变化情景下出现不可靠的外推。同时，技术壁垒与算力分配不均还会加剧全球气象预测领域的“AI 鸿沟”。然而 AI 对信息鸿沟的影响并非单向的。一方面，算力、数据和算法资源的不均衡可能会扩大不同国家和地区在预测能力、风险信息获取和决策支持等方面的差距；另一方面，随着开源模型、云计算平台以及全球数据共享

机制的发展和普及, AI 也有望降低先进预测技术的使用门槛, 提高欠发达地区和普通群众获取气象信息服务的能力, 从而促进预测成果在不同地区和不同用户群体之间的共享。这使得叶先生提出的“有序人类活动”理念在 AI 时代更加具有现实意义, 即在利用 AI 赋能天气气候预测的同时, 应当加强开放合作、数据共享和人工智能管理, 促进算力、算法和预测资源的合理配置, 使 AI 在提升预测能力的同时, 也能够缩小信息鸿沟, 更好地服务于全球风险防范和可持续发展。

总体而言, AI 并未改变未来的天气气候预测体系所面对的根本科学问题: 复杂系统在多大程度上可被预测, 以及预测中的不确定性如何被刻画、校准并转化为可用的风险信息。相反, AI 的加入进一步凸显了体系观、不确定性管理、人与自然耦合系统和用户导向的重要性。叶笃正先生关于“未来的天气气候预测体系”的思考, 并非仅适用于历史背景下的阶段性认识, 至今仍为当代综合预测体系建设提供理论指导。围绕人类活动反馈、小概率高影响事件识别以及跨学科治理机制等问题的进一步研究, 也将持续拓展这一思想的现实意义。

参考文献 (References)

- Armstrong McKay D I, Staal A, Abrams J F, et al. 2022. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points [J]. *Science*, 377(6611): eabn7950. doi:10.1126/science.abn7950
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G. 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction [J]. *Nature*, 525(7567): 47–55. doi:10.1038/nature14956
- Bi K F, Xie L X, Zhang H H, et al. 2023. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks [J]. *Nature*, 619(7970): 533–538. doi:10.1038/s41586-023-06185-3
- Bihlo A. 2021. A generative adversarial network approach to (ensemble) weather prediction [J]. *Neural Networks*, 139: 1–16. doi:10.1016/j.neunet.2021.02.003
- Bodnar C, Bruinsma W P, Lucic A, et al. 2025. A foundation model for the Earth system [J]. *Nature*, 641(8065): 1180–1187. doi:10.1038/s41586-025-09005-y
- Bonavita M. 2024. On some limitations of current machine learning weather prediction models [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 51(12): e2023GL107377. doi:10.1029/2023GL107377
- Charlton-Perez A J, Dacre H F, Driscoll S, et al. 2024. Do AI models produce better weather forecasts than physics-based models? A quantitative evaluation case study of Storm Ciarán [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1): 93. doi:10.1038/s41612-024-00638-w
- Charney J G, Fjörtoft R, Von Neumann J. 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation [J]. *Tellus*, 2(4): 237–254. doi:10.1007/978-1-944970-35-2_15
- Eren L G. 2025. Modelling adaptation to climate change in agricultural systems: Agent-based approach [J]. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(2): 566–585. doi:10.3402/tellusa.v2i4.8607
- Fu C B. 2017. From climate to global change: Following the footprint of Prof. Duzheng YE's research [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(10): 1159–1168. doi:10.1007/s00376-017-6300-6
- Gentine P, Pritchard M, Rasp S, et al. 2018. Could machine learning break the convection parameterization deadlock? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 45(11): 5742–5751. doi:10.1029/2018GL078202
- Gigerenzer G, Hertwig R, Van Den Broek E, et al. 2005. “A 30% chance of rain tomorrow”: How does the public understand probabilistic weather forecasts? [J]. *Risk Analysis*, 25(3): 623–629. doi:10.1111/j.1539-6924.2005.00608.x
- 黄荣辉, 黄刚. 2024. 缅怀我们的恩师——叶笃正先生的学术成就和治学精神 [J]. *大气科学*, 48(1): 1–7. Huang Ronghui, Huang Gang. 2024. In memory of our mentor and Academician Prof. Ye Duzheng: Overview of his academic achievements and serious and careful spirit of scholarship [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 48(1): 1–7. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2310.23302
- Lam R, Sanchez-Gonzalez A, Willson M, et al. 2023. Learning skillful medium-range global weather forecasting [J]. *Science*, 382(6677): 1416–1421. doi:10.1126/science.adi2336
- Li X C, Zhao L, Oleson K, et al. 2024. Enhancing urban climate–energy modeling in the Community Earth System Model (CESM) through explicit representation of urban air-conditioning adoption [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16(4): e2023MS004107. doi:10.1029/2023MS004107
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 20(2): 130–141. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
- Meng J, Chen D L. (2026-01-22). The domino effect of climate tipping points: A multidisciplinary perspective on global risks [J/OL]. *National Science Review*, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwag042>.
- Möhrle C, Bessa R J, Fleischhut N. 2022. A decision-making experiment under wind power forecast uncertainty [J]. *Meteorological Applications*, 29(3): e2077. doi:10.1002/met.2077
- Morss R E, Demuth J L, Lazo J K. 2008. Communicating uncertainty in weather forecasts: A survey of the U. S. public [J]. *Wea. Forecasting*, 23(5): 974–991. doi:10.1175/2008WAF2007088.1
- Nguyen T, Brandstetter J, Kapoor A, et al. 2023. ClimaX: A foundation model for weather and climate [C]//Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning. Honolulu: PMLR, 25904–25938.
- Nyborg K, Anderies J M, Dannenberg A, et al. 2016. Social norms as solutions [J]. *Science*, 354(6308): 42–43. doi:10.1126/science.aaf8317
- Palmer T N. 2019. Stochastic weather and climate models [J]. *Nature Reviews Physics*, 1(7): 463–471. doi:10.1038/s42254-019-0062-2
- Pathak J, Subramanian S, Harrington P, et al. (2022-02-22). FourCastNet: A global data-driven high-resolution weather model

- using adaptive Fourier neural operators [EB/OL]. arXiv, <https://arxiv.org/abs/2202.11214>.
- Price I, Sanchez-Gonzalez A, Alet F, et al. 2025. Probabilistic weather forecasting with machine learning [J]. *Nature*, 637(8044): 84–90. doi:10.1038/s41586-024-08252-9
- Rasp S, Pritchard M S, Gentile P. 2018. Deep learning to represent subgrid processes in climate models [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(39): 9684–9689. doi:10.1073/pnas.1810286115
- Schoenberg W, Blanz B, Rajah J K, et al. 2025. An overview of FRIDA v2.1: A feedback-based, fully coupled, global integrated assessment model of climate and humans [J]. *Geoscientific Model Development*, 18(21): 8047–8069. doi:10.5194/gmd-18-8047-2025
- 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展 [J]. *气象学报*, 78(3): 451–476. Shen Xueshun, Wang Jianjie, Li Zechun, et al. 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 78(3): 451–476. doi:10.11676/qxxb2020.030
- Staff Members of the Section of Synoptic and Dynamic Meteorology, Institute of Geophysics and Meteorology, Academia Sinica. 1957. On the general circulation over eastern Asia (I) [J]. *Tellus*, 9(4): 432–446. doi:10.1111/j.2153-3490.1957.tb01903.x
- Staff Members of the Section of Synoptic and Dynamic Meteorology, Institute of Geophysics and Meteorology, Academia Sinica. 1958. On the general circulation over eastern Asia (III) [J]. *Tellus*, 10(3): 299–312. doi:10.1111/j.2153-3490.1958.tb02018.x
- Stengel K, Glaws A, Hettinger D, et al. 2020. Adversarial super-resolution of climatological wind and solar data [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(29): 16805–16815. doi:10.1073/pnas.1918964117
- Vandal T, Kodra E, Ganguly S, et al. 2017. DeepSD: Generating high resolution climate change projections through single image super-resolution [C]//*Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Halifax: Association for Computing Machinery, 1663–1672. doi:10.1145/3097983.3098004
- Watt-Meyer O, Henn B, McGibbon J, et al. 2025. ACE2: Accurately learning subseasonal to decadal atmospheric variability and forced responses [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8(1): 205. doi:10.1038/s41612-025-01090-0
- WCRP. (2026-02-26)[2026-04-10]. Understanding high-risk events: Safe landing climates lighthouse activity [EB/OL]. <https://www.wcrp-climate.org/working-groups/slc-high-risk>.
- WMO. 2015. WMO guidelines on multi-hazard impact-based forecast and warning services [R]. WMO-No. 1150.
- 叶笃正, 符淙斌, 季劲钧, 等. 2001. 有序人类活动与生存环境 [J]. *地球科学进展*, 16(4): 453–460. Ye Duzheng, Fu Congbin, Ji Jinjun, et al. 2001. Orderly human activities and subsistence environment [J]. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 16(4): 453–460. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2001.04.0453
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 278pp. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. *Meteorology of the Qinghai-Xizang Plateau* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 278pp.
- 叶笃正, 季劲钧. 2005. 迎接大气科学发展即将到来的新飞跃 [J]. *地球科学进展*, 20(10): 1047–1052. Ye Duzheng, Ji Jinjun. 2005. Prospect the overflying development of atmospheric science [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 20(10): 1047–1052. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2005.10.001
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡 [J]. *气象学报*, 28(2): 108–121. Ye Duzheng, Luo Siwei, Zhu Baozhen. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28(2): 108–121. doi:10.11676/qxxb1957.010
- 叶笃正, 吕建华. 2003. 气候研究进展和 21 世纪发展战略 [J]. *自然科学进展*, 13(1): 42–46. Ye Duzheng, Lv Jianhua. 2003. Advances in climate research and development strategy for the 21st century [J]. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 13(1): 42–46. doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2003.01.007
- 叶笃正, 陶诗言, 朱抱真, 等. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 135pp. Ye Duzheng, Tao Shiyan, Zhu Baozhen, et al. 1962. *Studies on the Blocking Situation in the Northern Hemisphere Winter* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 135pp.
- 叶笃正, 严中伟, 戴新刚, 等. 2006. 未来的天气气候预测体系 [J]. *气象*, 32(4): 3–8. Ye Duzheng, Yan Zhongwei, Dai Xingang, et al. 2006. A discussion of future system of weather and climate prediction [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32(4): 3–8. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.04.001
- 叶笃正, 严中伟, 黄刚. 2007. 我们应该如何应对气候变化 [J]. *中国科学院院刊*, 22(4): 327–329. Ye Duzheng, Yan Zhongwei, Huang Gang. 2007. How should we address climate change? [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 22(4): 327–329. doi:10.16418/j.issn.1000-3045.2007.04.004
- Ye D Z, Yan Z W, Huang G. 2009. How should we address climate change? [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 23(4): 208–211.
- Yeh T C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 6(1): 1–16. doi:10.1175/1520-0469(1949)006<0001:OEDITA>2.0.CO;2
- Yeh T C. 1957. On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 35A: 130–134. doi:10.2151/jmsj1923.35A.0_130
- Yeh T C, Dao S Y, Li M T. 1959. The abrupt change of circulation over the Northern Hemisphere during June and October [M]//Bolin B. *The Atmosphere and the Sea in Motion*. New York: Rockefeller Institute Press, 249–267.
- Yuval J, O'Gorman P A. 2020. Stable machine-learning parameterization of subgrid processes for climate modeling at a range of resolutions [J]. *Nature Communications*, 11(1): 3295. doi:10.1038/s41467-020-17142-3
- Yuval J, O'Gorman P A, Hill C N. 2021. Use of neural networks for stable, accurate and physically consistent parameterization of subgrid atmospheric processes with good performance at reduced precision [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(6): e2020GL091363. doi:10.1029/2020GL091363