

人为强迫驱动下降水的动力响应可能被低估

尹家波¹, 刘攀¹, 夏军¹, 顾磊^{1,2*}

1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072

2. Atmospheric, Oceanic, and Planetary Physics, University of Oxford, Oxford OX1 3PU, UK

* 联系人, E-mail: lei.gu@physics.ox.ac.uk

Dynamic response of precipitation to human emissions might be underestimated

Jiabo Yin¹, Pan Liu¹, Jun Xia¹ & Lei Gu^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China

² Atmospheric, Oceanic, and Planetary Physics, University of Oxford, Oxford OX1 3PU, UK

* Corresponding author, E-mail: lei.gu@physics.ox.ac.uk

doi: [10.1360/CSB-2026-0723](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0723)

降水是水循环过程的关键变量, 对维护河湖生态健康、保障水资源安全、促进农业、能源及社会经济可持续发展具有重要影响. 降水的时空变化机制不仅是环境地球科学领域的基础科学问题, 还关系到地球系统模式研发、防灾减灾以及联合国可持续发展目标的实现. 长期以来是水文气候学界的研究重点和难点问题之一. 工业革命以来, 人为强迫(主要为温室气体排放等人类活动)通过升温效应增强大气蒸散需求、加快水循环速率等途径, 改变了全球降水的时空分布格局. 近年来, 世界各地不断发生超标准洪水、特大干旱、旱涝急转等极端水文事件, 对人类社会和生态系统构成了严峻挑战^[1,2].

随着计算机科学的快速发展, 气候模式逐渐成为人类模拟和预测降水格局的重要工具, 但是大量研究发现气候模式通常难以准确再现降水变化趋势^[3,4]. 降水变率受人为强迫、自然外强迫(如太阳活动、火山喷发)和气候系统内部变率(如厄尔尼诺-南方涛动)共同影响, 以往研究通常认为气候系统的内部变率是气候模式与观测降水趋势存在偏差的关键因素. 例如, 地中海地区冬季降水自1950年以来呈现持续减少趋势, 学者们发现该“干化”现象主要受控于罕见内部变率, 而气候模式未能有效捕捉这一信号^[5]. 然而, 近年来部分学者通过气候检测归因技术研究发现, 气候模式对人为强迫下降水响应的刻画不足, 这可能是造成降水趋势偏差的主要因

素^[6]. 近几十年来, 国际上对气候模式估计降水趋势与观测资料存在偏差这一现象展开了大量讨论, 长期存在争议、悬而未决.

针对这一重要基础科学议题, Gu等人^[7]聚焦北半球中高纬度地区(北纬30°以上)1950~2022年期间冬季降水的变化趋势, 设计了弹性网络回归模型和CESM2集合模拟试验nudged winds(环流约束)这两套相对独立的技术路径, 将降水趋势拆解为热力项和动力项, 并进一步分离出人为强迫下的热力项、动力项以及气候内部变率信号. 基于再分析数据集(含欧洲中期天气预报中心ERA5、日本气象厅JRA-3Q、英国国际大气科学中心CRU TS v4以及MSWEP等)和气候模式大样本模拟, 系统解构了气候模式估计冬季降水趋势存在偏差的物理成因. 首先, 采用不同再分析数据集推求了北半球冬季(12月至次年2月)的降水趋势, 发现北美东部和欧洲北部地区呈现显著增加趋势(分别为每10年0.033和0.047 mm/d), 欧洲南部地区则呈现显著下降趋势(每10年-0.058 mm/d), 如图1(a, b)所示. 随后, 采用29个CMIP6气候模式和100个CESM2成员集合的模拟资料估算了冬季降水的变化趋势, 发现模式估计值一般与观测结果存在差异. 例如, 欧洲南部地区的多模式集合平均趋势值为每10年-0.006 mm/d, 仅占ERA5趋势信号的10%(图1(c, d)). 气候模式估计的降水趋势为何与观测资料存在差异呢? 这种差异可能源于气候内部变率, 也有可能是

引用格式: 尹家波, 刘攀, 夏军, 等. 人为强迫驱动下降水的动力响应可能被低估. 科学通报, 2026, 71: 4083–4086

Yin J, Liu P, Xia J, et al. Dynamic response of precipitation to human emissions might be underestimated (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 4083–4086, doi: [10.1360/CSB-2026-0723](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0723)

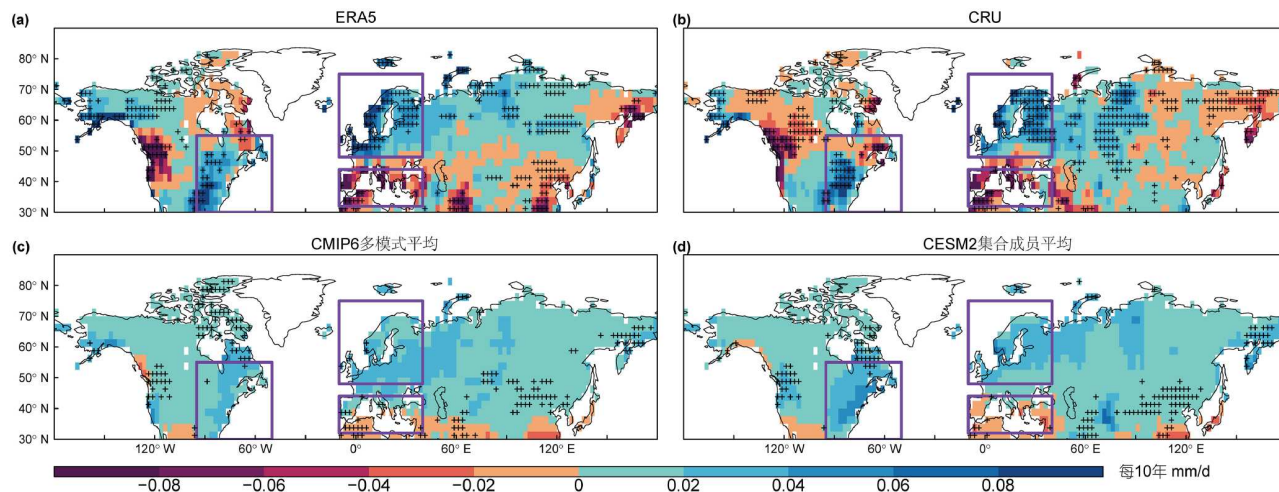


图1 (网络版彩色)再分析数据集和气候模式估算的冬季降水趋势(1950~2022年). ERA5(a)、CRU(b)、CMIP6框架下29个模式平均(c)、CESM2框架下100个成员平均(d)等数据资料估算的趋势. (a, b) 中点据表示趋势显著($P < 0.05$), (c, d) 中点据表示ERA5估算的趋势超出气候模式的估算范围. 根据文献[7]重绘

Figure 1 (Color online) Observed and simulated trends in winter precipitation (1950–2022) by reanalysis and climate models. Winter precipitation trends from ERA5 (a), CRU (b), multimodel ensemble from CMIP6 (c), and multimember ensemble from CESM2 (d). Stippling in (a, b) indicates regions in which the trend is significant ($P < 0.05$), while stippling in (c, d) indicates regions in which ERA5 trends lie outside the ensemble range of climate models. Reproduced from Ref. [7]

气候模式低估了降水的热力或动力响应.

为了系统地解构气候模式估算降水趋势演变的内在机制, 分别采用弹性网络回归模型和环流约束试验分离了降水趋势的热力项和动力项. 在弹性网络回归模型中, 通过CMIP6框架下29个全球气候模式开展工业化前控制试验获得300年模拟数据, 进而训练陆地降水与 $20^\circ \times 20^\circ$ 空间域内海平面气压的关联函数. 率定得到关联函数的参数后, 将该关联函数映射至多套再分析数据集, 然后再将这套参数扩展至气候模式输出(包含CMIP6的29个模式和CESM2的100个成员), 模式的覆盖时间范围包括历史时期(1850~2014年)和SSP370情景(2015~2100年). 弹性网络回归模型估算的降水趋势主要表征大气环流影响(包含内部变率和人为强迫的环流效应, 统称动力项), 而残余趋势项(原始再分析数据集或模型估算的降水趋势减去动力项)被称为热力项[8]. 为了比较不同热力/动力拆解方法对主要结论的影响, 还设计了两组基于CESM2大样本模拟的环流约束试验, 该试验的核心在于将气候模式的水平风场nudge(约束)到目标场, 运行两组对比模拟试验: 一组施加历史和未来人为强迫, 另一组则保持前工业化条件. 这两组对比试验设置了相同的环流条件和不同的人为强迫情景, 故将两组试验估算的降水趋势差值表征为热力项, 这部分主要受人为气候强迫影响[9]. 在环流约束试验中, 采用CESM2中100个成员估算的总趋势分别减去热力项, 从可获得各模式成员估算的降水趋势动力项. 在CESM2大样本模拟的环流约束试验中, 共设置了三对自由运行nudge模拟和一对ERA5风场约束试验, 为验证大样本约束试验的可靠

性提供了较充足样本. 以往研究通常认为气候模式在模拟降水的热力项时存在显著偏差[10], 但是模拟试验结果发现气候模式能够稳健地刻画北半球中高纬度地区冬季降水趋势的热力项. 模型试验结果进一步显示: 在大气环流主导降水变化的区域, 气候模式通常难以再现再分析数据集中降水趋势的动力项. 例如, ERA5数据集估算欧洲南部地区的降水趋势动力项为每十年 -0.07 mm/d, 而CESM2大样本集合中仅有一个成员模拟的动力项与之接近, 说明气候模式在表征大气环流影响方面存在局限性. 整体来看, CMIP6和CESM2估算的热力项与再分析数据集的估算结果基本一致, 进一步说明气候模式对动力项(即大气环流影响)表征不足是造成模拟偏差的主要原因(图2(a)). 弹性网络回归模型(同时采用CMIP6和CESM2集合数据)和环流约束试验这两套相互独立的技术路径, 估算得到了相近的热力和动力拆解结果, 进一步证实了研究结果的稳健性.

大气环流变化受人为强迫和内部变率综合影响, 气候模式对降水动力项的强迫信号和非强迫信号是否存在不同的估计偏差? 为了深入探讨这一议题, 我们通过均化CMIP6和CESM2多模式/多成员集合估算的热力/动力信号, 消除了非强迫信号(统称内部变率)的影响. 然后, 将降水变化的总趋势项进一步分解为四个分量: 人为强迫驱动的热力项、内部变率驱动的热力项、人为强迫驱动的动力项、内部变率驱动的动力项. 弹性网络回归模型的分解结果显示: 人为强迫驱动的热力项与多模型集合平均的趋势基本吻合, 在北美东部地区的趋势信号最强(每十年 0.03 mm/d), 欧洲北部次之(每十

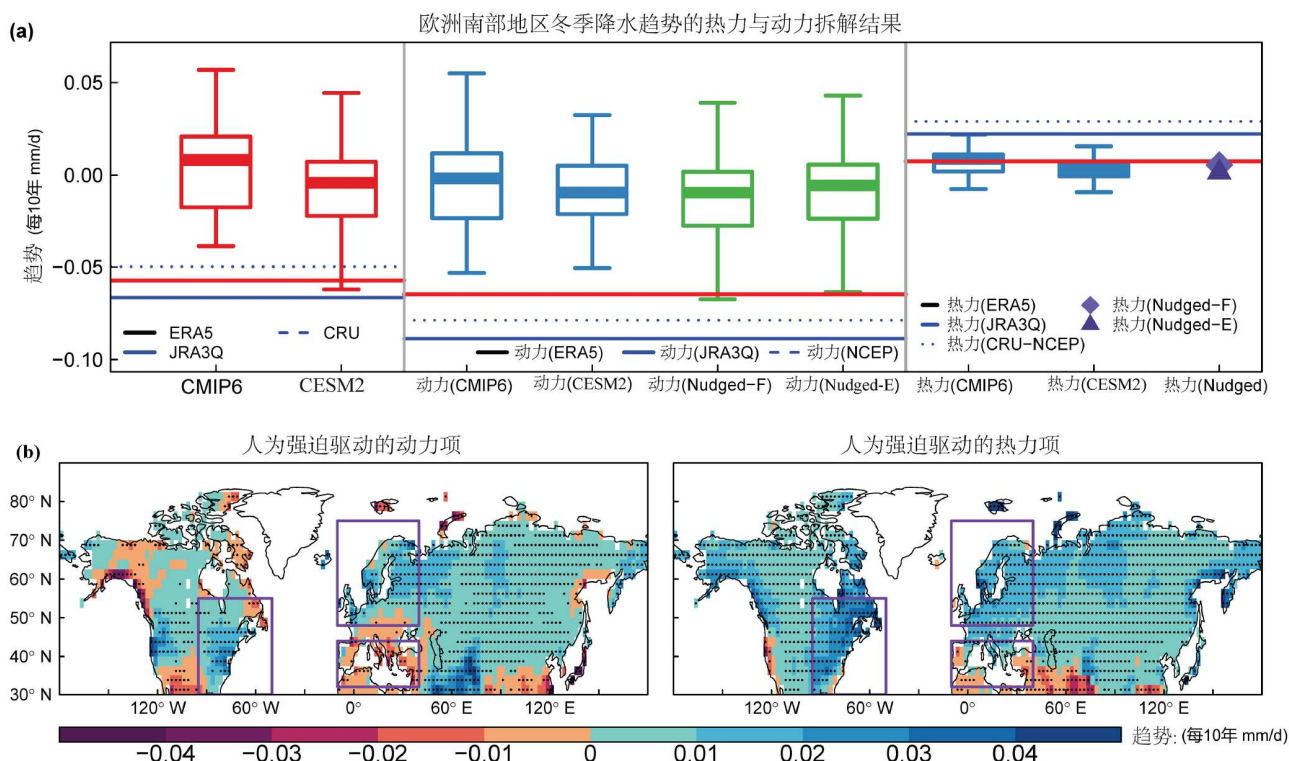


图2 (网络版彩色)冬季降水趋势(1950~2022年)的热力与动力分解结果。(a) 欧洲南部地区冬季降水趋势分解为动力项与热力项分量。Nudged-F代表三对自由运行试验获得的热力项均值, Nudged-E表示ERA5环流约束试验估算的热力项。箱型图的上、下边界分别表示第75百分位数和第25百分位数, 中央粗横线表示中位数; 上下触须则延伸至1.5倍四分位距范围内的最远数据点。(b) 基于CESM2框架下ERA5环流约束试验估算的人为强迫动力项和热力项; 点据表示降水趋势显著($P < 0.05$)。根据文献[7]重绘

Figure 2 (Color online) Decomposition of winter precipitation trends during 1950–2022. (a) Decomposition of winter precipitation trends over southern Europe during 1950–2022 into dynamic and thermodynamic components. Nudged-F denotes the mean thermodynamic trends from the three paired free-running nudged simulations, while Nudged-E denotes thermodynamic trends from the nudged experiments derived with ERA5 winds. (b) Anthropogenic forced dynamic and thermodynamic precipitation changes estimated nudged experiments driven by ERA5 horizontal winds. Dot stippling indicates regions in which trends are significant at the 0.05 level ($P < 0.05$). Reproduced from Ref. [7]

年0.02 mm/d)。再分析数据集估算的比湿和蒸散发趋势, 与人为强迫驱动的热力项较为接近, 这些结果进一步说明北半球中高纬度地区冬季降水趋势的热力项主要受人为强迫影响。基于环流约束试验的强迫/非强迫信号分离结果进一步显示: 人为强迫驱动的降水动力信号在北半球中高纬度地区普遍较为微弱, 大约仅占ERA5再分析数据集估算动力项的-23.7%~46.0%(所有格点的25~75分位数区间)。例如, 在欧洲南部地区(降水变化主要受大气环流影响的典型区域)仅占9.7%(图2(b))。这一结果与气候模式中海平面气压和纬向风的微弱强迫信号基本一致, CMIP6和CESM2显示这两个变量的变化趋势低于再分析数据集估计值的25%。为何气候模式中动力强迫信号较为微弱? 这一现象可能存在两个潜在原因。第一种假设为内部变率驱动的动力项可能对区域降水趋势起主导作用, 但是一般认为内部变率难以主导环流变化, 因此这种假设成立的可能性较低。另一种潜在因素的可能性较大: 尽管内部变率会在一定程度影响大气环流异常, 但是气

候模式对人为强迫下降降水的动力响应刻画不足。

综上, 结合统计学习方法与环流约束模拟试验, 将北半球中高纬度地区1950~2022年期间冬季降水变化趋势拆分为热力项与动力项两部分, 并进一步分离了人为强迫信号与内部变率的贡献分量。研究发现气候模式在再现热力学影响方面表现良好, 但是模式估计的动力学分量与观测值存在显著偏差。以欧洲南部地区为例, 人为强迫主导的动力项仅占再分析数据集估算动力项的10%左右。欧洲南部地区的环流响应信号可能正处于“由内部变率主导”向“由人为强迫主导”过渡的关键期, 未来数十年这一信号有望从气候混沌系统的噪声中逐步浮现。尽管内部变率对降水时空格局有一定影响, 但是不可忽略的是当前气候模式可能低估了人为强迫驱动下降降水的动力响应机制, 这是制约区域降水预估可信度的核心瓶颈。近年来, 极端气候事件愈加频繁, 学者们主要将其归因于人为强迫造成的大气热力效应, 因此大量研究探究了温室气体对极端事件的影响。尽管大气升温的热力效应通常会

增强全球陆地降水,但是环流异常可能改变降水的“落区”,进而造成干湿格局发生变化。目前的气候模式对热力效应有较好的刻画能力,但是对环流响应的模拟能力较弱。因此,未来

需要提升气候模式对大尺度环流异常的刻画能力,从而为应对气候变化和防灾减灾提供科学技术支撑。相关研究结果发表于*Nature*^[7]。

致谢 感谢国家自然科学基金(T2522026, 52225901, 52209020, 52361145864)和湖北省杰出青年科学基金(2024AFA055)资助;感谢武汉大学超算中心提供算力支持。

推荐阅读文献

- 1 Hao Z, Chen Y. Research progresses and prospects of multi-sphere compound extremes from the Earth System perspective. *Sci China Earth Sci*, 2024, 67: 343–374 [郝增超, 陈阳. 地球系统视角下的多圈层复合极端事件研究进展与展望. 中国科学: 地球科学, 2024, 54: 360–393]
- 2 Yin J, Guo S, Gu L, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4315–4325 [尹家波, 郭生练, 顾磊, 等. 中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应. 科学通报, 2021, 66: 4315–4325]
- 3 Yin J, Guo S, Wang J, et al. Thermodynamic driving mechanisms for the formation of global precipitation extremes and ecohydrological effects. *Sci China Earth Sci*, 2023, 66: 92–110 [尹家波, 郭生练, 王俊, 等. 全球极端降水的热力学驱动机理及生态水文效应. 中国科学: 地球科学, 2023, 53: 96–114]
- 4 Blackport R, Fyfe J C. Climate models fail to capture strengthening wintertime North Atlantic jet and impacts on Europe. *Sci Adv*, 2022, 8: eabn3112
- 5 Vicente-Serrano S M, Trambay Y, Reig F, et al. High temporal variability not trend dominates Mediterranean precipitation. *Nature*, 2025, 639: 658–666
- 6 Smith D M, Dunstone N J, Eade R, et al. Mitigation needed to avoid unprecedented multi-decadal North Atlantic Oscillation magnitude. *Nat Clim Chang*, 2025, 15: 403–410
- 7 Gu L, Schumacher D L, Sippel S, et al. Uncertain dynamic response of mid-latitude winter precipitation. *Nature*, 2026, 653: 110–116
- 8 Sippel S, Meinshausen N, Merrifield A, et al. Uncovering the forced climate response from a single ensemble member using statistical learning. *J Clim*, 2019, 32: 5677–5699
- 9 Pfleiderer P, Merrifield A, Dunkl I, et al. Considerable yet contrasting regional imprint of circulation change on summer temperature trends across the Northern Hemisphere mid-latitudes. *Weather Clim Dynam*, 2026, 7: 89–108
- 10 Wehrli K, Guillod B P, Hauser M, et al. Assessing the dynamic versus thermodynamic origin of climate model biases. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 8471–8479