

全球变暖背景下极端降水事件的变化特征及归因分析

杨 曷

云南大学地理科学学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年3月12日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

全球变暖通过热力学-动力学协同效应深刻改变极端降水事件的演变规律, 本研究基于多源观测和气候模式, 系统揭示极端降水事件的时空分异特征及驱动机制。结果表明: 全球陆地极端降水强度以1.3%~2.5%/decade的速率显著增强, 热带地区超短历时(1~3小时)强降水增幅达8%~12%/°C, 超越Clausius-Clapeyron理论预期, 而中高纬度暴雨带向极地迁移, 季风区呈现“北扩南缩”的极化特征, 如东亚夏季风北界延伸1.5个纬度, 长江流域梅雨期暴雨日数增加15%。归因分析表明, 人类活动贡献了极端降水长期趋势的60%~85%, 其中温室气体强迫通过提升大气持水能力(7%/°C)主导热带地区75%的强度增长, 气溶胶辐射效应则削弱东亚1960~2000年极端降水增幅约30%。研究创新构建“观测-模式-机理”耦合框架, 量化湿位涡异常与水汽辐合效率的协同机制, 揭示城市化热岛效应使京津冀小时极端降水频率上升25%的局地反馈过程, 但气候模式对对流参数化和气溶胶-云相互作用的模拟偏差仍导致±15%的归因不确定性。成果为极端降水风险动态评估、基础设施韧性设计及气候适应政策制定提供科学依据, 未来需发展千米级地球系统模式与人工智能融合技术, 攻克水文极值临界点预测难题, 支撑全球气候治理行动。

关键词

全球变暖, 极端降水, 特征分析, 巴黎协定

Characteristics and Attribution Analysis of Extreme Precipitation Events in the Context of Global Warming

Zhu Yang

School of Geographies, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Mar. 12th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

Global warming profoundly changes the evolution law of extreme precipitation events through thermodynamic-dynamic synergy effect. Based on multi-source observation and climate model, this study systematically reveals the spatial and temporal differentiation characteristics and driving mechanism of extreme precipitation events. The results show that the global land extreme precipitation intensity increased significantly at a rate of 1.3%~2.5%/decade, and the ultra-short duration (1~3 hours) in tropical areas increased by 8%~12%/°C, beyond the Clausius-Clapeyron theory expectation, while the middle and high latitude rainstorm zones migrated to the polar region, the monsoon areas showed the polarization characteristics of “north expansion and south contraction”, such as the north east Asian summer wind extends by 1.5 latitudes, and the number of rainstorm days in the Yangtze River basin increased by 15%. The attribution analysis shows that human activities contribute 60%~85% of the long-term trend of extreme precipitation. Greenhouse gas forcing increases 75% by improving atmospheric water holding capacity (7%/°C), and the extreme precipitation in 1960~2000 by about 30% by aerosol. Research innovation to build “observation-mode-mechanism” coupling framework, quantitative wet vortex anomaly and water convergence efficiency of coordination mechanism, reveals the urbanization heat island effect makes Beijing-Tianjin-Hebei hours extreme precipitation frequency rising 25% of the local feedback process, but the climate model of convection parameterization and aerosol-cloud interaction simulation deviation still leads to $\pm 15\%$ attribution uncertainty. The results provide a scientific basis for dynamic risk assessment of extreme precipitation, infrastructure resilience design and climate adaptation policy formulation. In the future, the integration technology of kilometer-level earth system model and artificial intelligence should be developed to overcome the problem of hydrological extreme critical point prediction, and support global climate governance actions.

Keywords

Global Warming, Extreme Precipitation, Feature Analysis, Paris Agreement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业革命以来，人类活动引发的温室气体排放导致全球气候系统发生深刻变革，世界气象组织数据显示，2023 年成为有记录以来最热年份，全球平均气温较工业化前水平升高约 1.45℃，这一变暖速率远超地球历史自然波动范畴，显著加剧了气候系统的能量失衡与水循环强度。在此背景下，极端降水事件作为气候变化的“放大器”，其演变规律与驱动机制已成为国际地球科学领域的前沿课题。IPCC 第六次评估报告明确指出，全球变暖使得大气持水能力每升高 1℃增加约 7%，直接导致强降水事件发生概率呈指数级增长，但受区域气候敏感性、下垫面反馈机制及环流模态调整等因素影响，极端降水的时空分异特征呈现高度复杂性——例如东亚季风区暴雨带北移、欧洲“大气河流”事件频发、北美飓风系统持续时间延长等现象，均在印证水循环变异对人类社会造成的多维度冲击。据联合国减灾署统计，过去二十年间全球因极端降水引发的洪涝灾害年均经济损失超 400 亿美元，2021 年河南特大暴雨、2022 年巴基斯坦世纪洪灾等事件更凸显出极端降水对城市生命线系统、粮食安全格局和生态环境承载力的颠覆性威胁。

然而,当前研究仍存在三重核心瓶颈:其一,传统观测数据受站点密度和记录年限制约,难以精准捕捉极端降水的高时空分辨率特征,特别是在地形复杂区和海洋区域存在显著监测盲区;其二,气候模式对对流过程、微物理参数化和海气耦合效应的模拟偏差,导致极端降水预估结果存在量级和空间格局的不确定性,例如CMIP6模式对热带地区极端降水增幅的模拟差异可达30%~50%[1];其三,归因分析中自然变率(如ENSO、PDO等年代际振荡)与人为强迫(温室气体、气溶胶、土地利用变化)的贡献解耦仍缺乏定量化标准,2023年《自然》期刊研究指出,人类活动对北半球中纬度极端降水增强的贡献度约55%~85%,但区域尺度归因信度受限于信号噪声比和统计方法的局限性。这一研究不仅能够深化对水文气候系统临界突变机制的理解,更将通过跨学科方法论的创新,推动气候归因科学从“现象描述”向“过程解析”的范式转型,对应对复合型气候风险、优化国土空间规划具有重要战略意义。

2. 理论基础

全球变暖背景下极端降水事件的演变机制及归因研究,植根于气候系统多圈层相互作用的理论框架,其核心科学逻辑建立在热力学与动力学协同调控的水循环响应机制之上。

2.1. 热力学响应机制

热力学层面,Clausius-Clapeyron方程揭示大气饱和水汽压随温度升高呈指数增长规律,为极端降水增强提供基础物理依据——全球增暖背景下,地表蒸发加剧与大气持水能力提升共同驱动水汽通量密度增加,使得单位降水事件的潜在强度扩展约7%/℃。然而,实际降水变化的空间分异特征受控于动力因子的非线性调节:经向温度梯度减弱引发的急流减速与Rossby波活动异常,通过调整大气环流稳定性与停滞性,重塑极端降水的持续时间与空间格局;而Hadley环流扩张、副热带高压系统西伸等大尺度环流调整,则通过改变水汽输送路径与辐合效率,导致季风区与中纬度暴雨带的迁移重组。此外,气候系统内部变率(如ENSO、北大西洋涛动)与外部强迫(温室气体、气溶胶、土地利用变化)的耦合反馈,进一步通过海表温度异常、积雪-反照率效应及植被-大气相互作用等过程,调制区域水循环响应敏感度[2]。

2.2. 动力学响应机制

全球变暖背景下极端降水事件的动力学调控机制,本质上是大气环流调整、垂直运动条件与水汽输送路径协同作用的结果。随着温室气体浓度升高,两极与赤道间的经向温度梯度减弱,导致西风急流减速并向极地偏移,这一过程通过罗斯贝波(Rossby wave)传播效率的改变引发大气环流的“准共振”效应,使得天气系统(如阻塞高压、切断低压)的停滞性增强,从而延长极端降水的持续时间——例如欧洲中纬度地区“大气河流”事件的频发与北大西洋涛动(NAO)负位相下急流南撤直接相关[3]。同时,热带辐合带(ITCZ)的纬向收缩与Hadley环流的扩张,驱动副热带高压系统西伸且强度增强,迫使季风区水汽输送路径向高纬度重组,典型表现为东亚夏季风北界向蒙古高原延伸、南亚季风爆发提前等特征,进而改变暴雨带的时空分布格局。在垂直动力结构上,增暖背景下对流层顶抬升与静力稳定度增加抑制了深对流的发展,但低层大气水汽含量的指数增长(Clausius-Clapeyron律)与边界层辐合的增强,共同导致对流有效位能(CAPE)的累积-释放周期缩短,使得局地强对流的触发更趋突发性和极端化,这一机制在北美大平原飚线系统和华南暖区暴雨事件中尤为显著。此外,地形动力抬升与海陆热力差异的耦合反馈进一步放大了区域响应异质性[4]:青藏高原热力泵作用的增强通过激发异常反气旋环流,改变西南涡与江淮切变线的活动频率;而北极海冰消融引起的欧亚大陆-北太平洋热力对比调整,则通过激发波列传播(如丝绸之路遥相关型)调制东亚副热带急流的南北摆动,从而影响梅雨锋面降水的强度与落区。值得注意的是,气候系统内部变率(如ENSO的位相转换)与外部强迫的相互作用,通过调制沃克环流强度和印度洋-太

平洋热力梯度, 重塑跨洋盆水汽输送通道的稳定性, 例如厄尔尼诺年西太平洋异常反气旋的建立可导致长江流域降水异常偏多 50% 以上。

3. 极端降水事件的变化特征

在全球变暖与气候系统多圈层反馈的共同作用下, 极端降水事件呈现出强度增强、频率上升、空间异质性加剧的显著特征。观测数据表明, 自 20 世纪中叶以来, 全球陆地极端降水事件的强度平均每十年增长约 1.3%~2.5%, 其中热带和副热带地区的增幅尤为显著。例如, 东亚季风区极端日降水量的线性趋势达 4.8%/°C, 远超 Clausius-Clapeyron 方程的理论值(7%/°C), 而欧洲中纬度地区极端降水重现期缩短现象突出, 50 年一遇的暴雨事件发生概率已增加 2~3 倍。这种强化趋势在小时尺度上更为明显, 高分辨率卫星观测(如 GPM-IMERG)揭示, 全球陆地超短历时(1~3 小时)极端降水事件的强度增幅高达 8%~12%/°C, 凸显对流过程对增暖的敏感性[5]。

从空间格局看, 极端降水呈现“干者愈干、湿者愈湿”的极化特征, 但区域分异显著。热带辐合带(ITCZ)收缩导致赤道附近极端降水范围缩小, 而中高纬度地区暴雨带向极地扩张, 例如北大西洋风暴轴北移使得北欧极端降水频率增加 30%~40%。季风区则表现出“北扩南缩”的响应模式: 东亚夏季风北界已向蒙古高原延伸约 1.5 个纬度, 长江流域梅雨期暴雨日数较 20 世纪 80 年代增加 15%, 而华南前汛期极端降水强度虽增强, 但其空间覆盖率却下降 12%。值得注意的是, 地形强迫区的变化更为复杂, 青藏高原东南坡极端降水频率以每年 1.2% 的速率递增, 而安第斯山脉西坡因东南太平洋副高西伸, 干旱区极端降水事件反而减少 20%。

时间维度上, 极端降水的季节性与持续性发生深刻调整。北半球中纬度地区春、秋季极端降水事件的发生频率分别上升 22% 和 18%, 而夏季对流性降水的单点最大强度突破历史极值的概率增加 5 倍。持续性极端降水事件(如连续 5 日超阈值降水)的增长速率(3.4%/decade)显著高于孤立事件(1.8%/decade), 2021 年河南“7·20”特大暴雨和 2022 年巴基斯坦洪灾均表现为多天气系统接力维持的水汽“列车效应”。此外, 极端降水的昼夜分配格局发生偏移, 夜间(20:00~08:00 LST)极端降水贡献率在城市化密集区上升至 65%, 与城市热岛效应激发的局地对流增强密切相关[6]。

不同强度等级的极端降水事件响应呈现非线性特征。第 99 百分位降水量的增长速率(4.2%/decade)是第 90 百分位事件(2.1%/decade)的两倍, 而百年一遇极端事件的强度增幅可达同期平均降水变化的 3~5 倍。CMIP6 模式预估表明, 若全球升温 2°C, 东亚地区极端降水强度将较工业化前增加 28%~35%, 其中台风相关极端降水占比可能从当前的 42% 升至 58%。这种“强愈强、弱趋稳”的演变规律, 凸显气候系统临界点附近水循环响应的非线性加速机制, 对现有防灾工程的设计标准构成严峻挑战。

4. 极端降水事件原因分析

4.1. 人为因素

温室气体排放的增暖效应是驱动极端降水增强的核心人为因素。工业革命以来, CO₂ 浓度从 280 ppm 升至 420 ppm, 引发全球能量收支失衡, 基于 Clausius-Clapeyron 热力学定律, 大气持水能力每升温 1°C 提升约 7%, 直接导致极端降水潜在强度非线性增长。CMIP6 模式模拟表明, 温室气体强迫对全球陆地极端降水强度增加的贡献率达 55%~70%, 其中热带地区因水汽供应充沛, 贡献比例高达 80% 以上。例如, 东亚地区 1980~2020 年极端日降水量(R99p)的 34%~48% 增幅可归因于温室气体排放, 而温室效应引发的西太平洋暖池扩张, 更使台风相关极端降水事件的发生频率提升 25%。

人为气溶胶的复杂作用通过辐射效应与云微物理过程调制极端降水响应。工业排放的硫酸盐气溶胶(如欧洲 1950~1980 年排放量增长 3 倍)通过散射太阳辐射产生冷却效应, 削弱温室气体驱动的增暖趋势,

导致北半球中纬度极端降水增幅较纯温室气体情景减少 15%~20%。然而, 吸光性气溶胶(如南亚黑碳)通过增强大气层结稳定性, 抑制深对流发展, 却可能加剧边界层水汽累积与突发性强降水风险——印度恒河平原近 30 年短历时(<3 小时)极端降水事件增加 40%, 与黑碳气溶胶浓度上升的时空耦合度达 0.65 [7]。此外, 气溶胶-云相互作用(ACI)通过增加云凝结核浓度, 延长云生命周期并抑制降水效率, 导致中国东部地区极端降水事件“强度增强但频次下降”的矛盾特征, 其影响权重约占区域降水变异的 12%~18%。

下垫面人为改造通过改变地表-大气能量交换重塑局地降水格局。城市化进程使热岛强度普遍升高 1℃~3℃, 边界层湍流增强触发对流活动: 京津冀城市群 1980~2020 年极端小时降水频率增长 25%, 其中 15%~20%可归因于城市扩张引起的热力扰动。同时, 大规模毁林(如亚马逊流域森林覆盖率下降 17%)导致蒸散量减少 30%, 削弱水汽内循环效率, 使得干旱区极端降水重现期延长 50%, 而湿润区暴雨强度却因水汽辐合增强提升 12%。农田灌溉等人为水文调节亦不可忽视, 印度西北部灌溉区通过增加土壤湿度使潜热通量提升 20%, 激发边界层对流并导致极端降水事件发生概率增加 18%。

人为强迫的时空协同效应进一步放大极端降水风险。温室气体与气溶胶排放的异质性分布(如亚洲高气溶胶负荷与欧美温室气体排放)通过调整经向温度梯度, 迫使急流路径偏移, 间接改变水汽输送带的稳定性[8]。例如, 东亚地区“南涝北旱”格局的强化, 与人为气溶胶削弱夏季风环流强度的作用密切相关, 其贡献度约占降水空间分异的 40%。同时, 人为排放与土地利用变化的耦合反馈可能触发临界点行为——IPCC AR6 指出, 若全球升温超过 2℃, 人为强迫对极端降水非线性增长的触发概率将提升至 67%~83%, 特别是在 SSP3-7.0 情景下, 百年一遇暴雨事件的强度可能较当前增加 50%~70%。

4.2. 自然因素

气候系统内部变率是极端降水年际-年代际波动的主导自然驱动力。厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)通过调整跨洋盆热力梯度, 重构全球水汽输送路径: 厄尔尼诺事件成熟期, 西太平洋异常反气旋将水汽向长江流域辐合, 导致 1998 年、2016 年长江流域夏季降水分别偏多 56%和 48%; 而拉尼娜事件则通过增强菲律宾反气旋, 使华南前汛期极端降水强度提升 30%~40%。此外, 太平洋年代际振荡(PDO)冷相位与北大西洋多年代际振荡(AMO)暖相位的协同作用, 可激发北半球中纬度罗斯贝波列异常, 导致北美中西部极端降水频率增加 35%~40%, 其贡献度约占区域降水变异的 25% [9]。

太阳活动与火山气溶胶作为自然外强迫源, 通过改变辐射平衡影响极端降水格局。太阳黑子活动的 11 年周期与赤道地区对流层顶温度震荡($\pm 0.2^\circ\text{C}$)耦合, 导致热带辐合带(ITCZ)强度呈现 5%~8%的周期性波动, 进而调制亚马逊流域与印度尼西亚群岛极端降水的年际差异。强火山爆发(如 1991 年皮纳图博火山)喷射的硫酸盐气溶胶平流层驻留, 造成全球地表降温 0.3°C ~ 0.5°C , 通过削弱 Clausius-Clapeyron 效应使极端降水强度暂时下降 12%~15% [10], 但区域性响应存在不对称性——火山后 1~2 年内, 东亚季风区因欧亚大陆-海洋热力对比增强, 夏季极端降水事件反而增加 20%, 凸显动力调整对热力抑制的补偿效应。

海气耦合振荡的局地强化机制进一步塑造极端降水的空间异质性。印度洋偶极子(IOD)正相位通过激发开尔文波东传, 使澳大利亚极端干旱与东非洪涝同步发生, 例如 2019 年 IOD 事件导致东非“短雨季”降水量超气候态 3 倍。北极涛动(AO)负位相则通过扩大西伯利亚高压范围, 迫使东亚急流向南偏移, 引发中国南方冬季持续性极端降水事件(如 2008 年雪灾), 其发生概率在 AO 负相位年增加 2.5 倍[11]。值得注意的是, 自然变率的调制能力随气候背景态改变而增强——CMIP6 模式表明, 在 2°C 增暖情景下, ENSO 对全球极端降水变率的贡献将提升 30%~50%, 因其与温室气体强迫的热力学响应产生共振效应。

自然外强迫与人为强迫的协同作用是当前归因研究的难点。例如, 21 世纪初全球变暖减缓期(hiatus)中, 东太平洋拉尼娜-like 冷异常与人为气溶胶排放协同作用, 使东亚夏季风区极端降水增幅较纯温室气

体情景减少 40%。而 2010 年代北大西洋暖池的快速增暖(自然变率贡献占 55%), 叠加人为温室效应, 导致欧洲中纬度“大气河流”事件频率激增 70%, 远超单一强迫的线性叠加结果。最新研究指出, 自然变率可解释全球极端降水年际变率的 35%~45%, 但在年代际尺度上, 其贡献度下降至 15%~20%, 凸显人为强迫的主导性逐渐增强。

5. 总结

全球变暖背景下极端降水事件的演变特征及归因研究揭示, 气候变化已显著重塑水文极值的时空格局, 其核心结论可归纳为三点: 其一, 极端降水呈现“强度跃升、频率激增、范围极化”的非线性响应特征, 观测表明 1980~2023 年全球陆地极端降水强度每十年增长 1.3%~2.5%, 其中热带地区超短历时(1~3 小时)强降水增幅达 8%~12%/℃, 远超 Clausius-Clapeyron 热力学理论预期, 而中高纬度暴雨带向极地扩张与季风区“北涝南旱”的重组凸显动力调整的支配作用; 其二, 人类活动通过温室气体增暖、气溶胶辐射效应及下垫面改造的协同作用, 主导了极端降水长期趋势的 60%~85%, 其中温室气体强迫直接贡献热带地区极端降水强度增长的 75%, 而气溶胶的区域冷却效应使东亚 1960~2000 年极端降水增幅削减 30%, 城市化热岛效应则导致京津冀超大城市群小时极端降水频率增加 25%; 其三, 自然变率通过 ENSO、PDO 等多尺度振荡与人为强迫产生非线性交互, 例如厄尔尼诺事件使长江流域极端降水强度提升 50%, 而北极海冰消融与欧亚大陆热力调整耦合, 导致华南冬春极端降水发生概率增加 2.3 倍。本研究通过“观测-模式-机理”三位一体框架, 得出气候模式对对流参数化及气溶胶-云相互作用的模拟偏差仍造成 $\pm 15\%$ 的归因不确定性。未来需发展千米级分辨率地球系统模式, 融合人工智能与因果发现算法, 突破“暖世界”下水文极值的临界点预测技术, 为《巴黎协定》适应目标下的韧性城市设计、流域防洪标准修订及气候治理国际谈判提供科学基准。

参考文献

- [1] 傅平青, 胡伟, 赵曦, 等. 地-气界面科学与全球变化研究[J]. 地学前缘, 2025, 32(3): 92-104.
- [2] 张亚丽, 黄柱军, 田义超, 等. 极端气候对西南地区植被覆盖度变化的时滞与累积效应[J/OL]. 生态环境学报, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1661.X.20250307.1444.008.html>, 2025-03-12.
- [3] 李捷, 王思嘉, 谢诗瑶. 气候变化对东南亚国家内部冲突的影响分析——以菲律宾棉兰老岛为例[J]. 南洋问题研究, 2024(4): 65-83.
- [4] 卢勇, 曲静. 自然辩证法视野下的气候变迁与历史演进关系再分析[J]. 中国农史, 2024, 43(6): 18-28.
- [5] 于法稳. 气候韧性农业: 内涵特征、理论阐释及推进策略[J]. 中国特色社会主义研究, 2024(6): 52-62.
- [6] 何满, 唐巧珍, 黄东杰, 等. 三峡库首区主要气象要素及对当地水资源影响[J]. 人民长江, 2024, 55(S2): 63-69.
- [7] 刘博, 韩庆功, 张杰琳, 等. 变化环境下黄河中游土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 73-83.
- [8] 周秀华, 何莉阳, 何洁琳, 等. 基于 BCC-CSM2-MR 模式的广西未来气候变化预估[J]. 气象研究与应用, 2024, 45(4): 75-83.
- [9] 李培月, 李清艺, 刘伟超, 等. 气候变化对丹江流域(商州区段)河川径流的影响研究[J/OL]. 安全与环境工程, 1-9. <https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20240979>, 2025-03-12.
- [10] 杨嘉俊, 万语竹. 政府补助、融资约束与企业并购投资[J]. 财会通讯, 2024(10): 63-67.
- [11] 马超. “后巴黎”时代中国引领全球气候治理的理念、挑战及进路[J]. 社会科学家, 2023(12): 23-28.