



人类活动对降水变化的影响及其检测归因：研究进展与展望

张文霞^{1,2}, 周天军^{3,4*}, 陈晓龙³, 江洁³

1. 南京大学, 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 南京 210023

2. 南京大学大气科学学院, 南京 210023

3. 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

4. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

2025-11-29 收稿, 2026-03-02 修回, 2026-05-03 接受, 2026-06-17 网络版发表

国家自然科学基金(42588201, 42422502, 42275038)资助

摘要 工业化以来的人类活动已经对降水产生了广泛和多维度的影响. 本文围绕平均降水、年循环、降水谱、极端降水和降水变率的长期变化, 从观测事实、检测归因和机理认识的角度, 系统总结了当前科学界的认知. 总结指出在全球尺度上, 近几十年全球平均降水呈增加趋势, 大部分陆地呈现“湿季更湿”的季节循环增强现象. 在降水谱变化上, 大部分地区弱降水事件减少、极端强降水事件增加, 并伴随着多尺度降水变率增强. 全球尺度上的这些观测变化主要由增暖背景下大气的热力响应导致, 其中人为温室气体排放是主要驱动因子. 当前降水变化归因的信度主要基于大气热力响应的理论. 在聚焦全球降水变化的同时, 本文也指出在区域尺度上理解降水变化面临的难题, 特别是区域环流变化的复杂性. 最后探讨了本领域未来的发展方向.

关键词 降水, 气候变化, 人类活动, 内部变率, 热力作用, 动力作用

伴随工业化以来的全球增暖, 全球水循环正在增强, 直接影响到水资源、旱涝灾害等社会可持续发展问题. 降水变化是水循环变化的关键过程. 关于降水变化最根本的理论认识始于蒸汽机时代. 1834年和1850年, 法国物理学家Émile Clapeyron与德国物理学家Rudolf Clausius研究建立了“克劳修斯-克拉伯龙”(Clausius-Clapeyron)关系, 从理论上计算了大气对于增温的热力响应, 即大气每升温1℃, 饱和水汽压增加约7%^[1,2]. 全球平均而言, 大气相对湿度变化较小, 因此实际大气水汽含量会以接近这一热力学理论速率的幅度增长. 这就是水循环变化的大气热力学理论基础^[3,4].

降水形成的三个要素是水汽、抬升和凝结, 其变化同样取决于这三者. 降水变化的复杂性主要来自抬

升动力过程, 以及三者之间的非线性作用. 这涉及不同时空尺度上的环流系统、大气垂直稳定度变化、多尺度大气环流相互作用、海-陆-气-冰反馈, 以及降水系统内部的凝结潜热反馈等过程. 从微物理过程角度, 降水变化还受到云微物理、降水效率等因子的影响^[4]. 因此, 对降水变化的理解, 取决于关注的时空尺度, 在不同的时空尺度上, 影响降水变化的主导过程存在差异.

从气候变化角度, 降水变化在空间上呈现出复杂的非均匀特征, 既受到外强迫因子的作用, 也受到气候系统内部变率的影响^[5]. 外强迫包括自然强迫和人为强迫两大类. 自然强迫是指火山气溶胶和太阳辐照度的变化. 人为强迫主要指人为温室气体、气溶胶、臭氧排放、土地利用和土地覆盖变化等大尺度人类活动,

引用格式: 张文霞, 周天军, 陈晓龙, 等. 人类活动对降水变化的影响及其检测归因: 研究进展与展望. 科学通报

Zhang W, Zhou T, Chen X, et al. Anthropogenic influences on precipitation changes: research progress and prospects (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2025-5845

在检测归因领域中不包括灌溉、取水用水等直接人为干预。内部变率是气候系统内部固有的涨落和振荡,即使在外强迫不变的情况下,由于气候系统内部各组分不同的弛豫时间及相互之间的反馈过程,也能产生不同时间尺度的对平均态的偏离,比如季节内、年际、年代际振荡等。在区域尺度上,年代际到年代际振荡(如太平洋年代际振荡(IPO)、大西洋年代际振荡(AMO)等)往往对气候系统有重要调制作用。降水变化的检测与归因即是,通过分离并量化人类活动等外强迫因子和气候内部变率的贡献,明确人为影响的显著程度,并从气候变化尺度上理解降水变化的物理原因^[6]。

回顾国际科学界对人类活动如何影响降水变化这一问题的认识历程,可以发现一个有趣的认知范式,即理论研究往往领先于观测证明。例如,围绕人为温室气体排放对平均降水、极端降水、降水变率等方面的影响,科学界都是首先在气候模拟中发现现象、从理论上提出物理解释,而后才从实际观测中证实、并检测

到人类活动影响的“指纹”(图1)^[7]。这一认知规律其实反映了影响降水变化的物理约束。首先,大气对温室气体增温的热力响应是显著的、稳健的,这是我们从物理上理解和利用气候模式预测预估降水变化的理论基础。其次,降水变化受到气候系统内部变率的重要调制,这使得降水长期变化的信噪比低,要从观测中检测到人为信号的难度大。随着外强迫作用的积累,只有当气候变化信号足够强且超过内部变率时,我们才能够在实际观测中检测到降水的显著变化并对其进行归因。

理解降水变化中人类活动的影响,是理解整个气候系统水循环变化的关键,也是预估未来变化的信度基础。本文的科学目标,将围绕降水变化的多个维度,对工业化以来人类活动对降水变化的影响进行总结,包括平均降水、季节循环、降水谱、极端降水和降水变率五个方面。尽管科学界对降水变化的认识历程往往始于气候模拟和理论研究、而后才是观测证实和检测归因,在本综述中,基于知识框架的逻辑链,我们依



图1 关于人类活动对降水变化的影响及其检测归因的认识历程

Figure 1 Historical milestones in the understanding of anthropogenic influence on precipitation changes

然按照降水变化的观测事实、检测归因、到物理机制逐层递进和展开. 在此基础上, 进一步讨论了降水变化研究当前面临的挑战并展望了未来研究方向.

1 人类活动对平均降水的影响

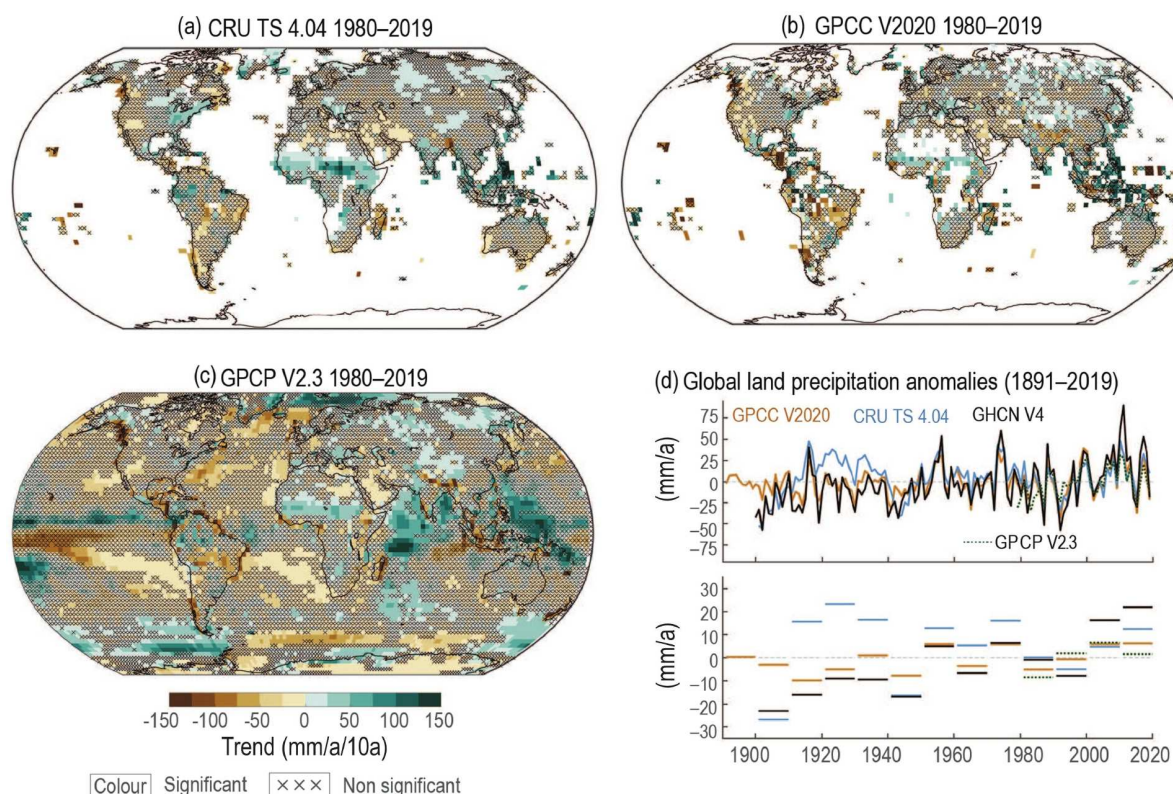
1.1 观测事实

全球大部分陆地区域的降水器测记录始于20世纪早期至中期. 在百年趋势上, 1901~2019年间全球陆地降水可能增加, 但定量趋势存在很大的资料间不确定性, 最大和最小趋势间相差5倍左右^[25]. 1950年后观测资料一致性相对较高, 其中20世纪50~70年代以及2000年以来以正距平为主, 20世纪70~21世纪初以负距平为主^[11]. 1980~2019年全球陆地年降水呈总体增加趋势, 不同观测资料揭示的年总降水量的增加趋势的范围约为5.41~11.06 mm/10年(图2)^[25]. 在海洋上, 1980~2019年间全球海洋降水以2.94 mm/10年的速率增加(GPCP

v2.3), 增加主要位于热带辐合带、印度洋和热带西太平洋. 但在更长的时间尺度上, 受海洋观测资料的时空覆盖度所限, 全球海洋降水变化趋势的不确定性很大^[26].

在区域尺度上, 1901~2019年间北美东部、欧亚北部、南美洲南部和澳大利亚西北部降水显著增加, 而热带西非、赤道非洲及南亚降水显著减少. 非洲许多地区1980年后降水增加, 部分逆转了1901年以来的长期变干趋势, 而南美南部近期普遍呈变干趋势^[27]. 20世纪后半叶全球陆地季风降水呈减少趋势, 主要源于北半球夏季风减弱^[28], 但20世纪80年代后有所恢复^[29]. 20世纪后半叶印度夏季风降水显著减少, 大尺度季风环流减弱^[30].

从百年时间尺度上看, 20世纪初以来, 中国陆地区域的年平均降水无显著的长期趋势, 年代际变化特征明显^[31,32]. 20世纪60年代以来中国陆地地区的平均降水总体呈增加趋势, 但区域差异大^[33,34]. 20世纪后半叶



审图号: GS京(2026)1634号

图 2 全球平均降水的观测变化. (a~c) 1980~2019年不同观测资料揭示的平均降水变化(单位: mm/a/10年), 填色表示趋势显著, ×号表示不显著. (d) 全球陆地平均降水时间序列(上图)和10年平均(下图)(相对于1981~2010年的异常). 引自文献^[25]

Figure 2 Changes in observed precipitation. (a~c) Observed precipitation trends over 1980–2019 based on different datasets (units: mm/a/decade). × marks denote non-significant trends. (d) Annual time series and decadal means relative to the 1981–2010 climatology. From Ref. ^[25]

东亚夏季风环流的年代际减弱使得夏季降水在中国东部表现为“南涝北旱”趋势^[35], 进入21世纪以来季风雨带呈现北抬态势, 这与东亚夏季风环流先减弱后增强的年代际变化密切相关^[31,36].

综上所述, 自20世纪中叶以来, 全球陆地平均降水量总体呈增加趋势, 1950年后趋势的信度较高. 20世纪80年代后全球陆地降水增速加快, 但区域差异显著, 且区域尺度降水存在很强的年代际变化. 全球海洋降水趋势因实测数据不足以及卫星反演、数据融合等过程的不确定性, 信度相对较低.

1.2 检测归因

在全球陆地尺度上, 20世纪降水变化呈现出显著的纬度依赖性, 即降水在北半球中高纬度增加、热带和副热带减少、在南半球副热带和深热带增加; 基于最优指纹法, 可以检测到人为强迫对这种大尺度降水变化空间型的重要贡献^[10]. 20世纪80年代以来, 热带和副热带干湿区域之间的对比加强, 主要归因于温室气体强迫, 尽管气候模式的响应在强度上要弱于观测趋势^[37].

20世纪后半叶观测到的全球陆地季风区的变干趋势可归因于人类活动影响, 特别是人为气溶胶排放^[28]. 20世纪后半叶南亚季风区显著变干, 人为气溶胶强迫和IPO位相转变均有重要贡献^[38,39]. 21世纪初以来, 在温室气体作用下陆地增温加速并超越热带印度洋的变暖趋势, 推动了南亚夏季风的恢复增强^[40]. 对于20世纪后半叶东亚季风区的“南涝北旱”型降水变化格局, 一方面人为气溶胶排放具有重要影响, 同时IPO和AMO的年代际调制也有贡献^[41,42]. 对于20世纪60年代以来中国西部和东北部的平均降水增加, 则主要归因于人为温室气体强迫^[34]. 1983~2010年间东非“长雨季”(long rain, 3~5月)降水量的减少和此后的部分恢复, 以及南部非洲年降水量的增加, 都与IPO有关^[43]. 在南美洲, 过去50年高原地区和智利中部的降水减少, 主要受到IPO影响, 同时至少有25%的下降归因于人为影响^[44]. 此外, 城市化对于城市区域降水量也有影响, 全球60%城市及其下风向的降水量高于周围乡村地区, 且暖湿气候背景下城市化造成的降水偏多更明显^[45].

综上所述, 20世纪全球陆地降水变化的大尺度空间型可归因于人类活动. 自20世纪80年代以来, 人为强迫加强了热带湿润区和副热带干旱区之间的降水梯度. 在区域尺度上, 降水变化的检测归因结果存在显著的

区域差异, 取决于温室气体和人为气溶胶作用的相对重要性, 并且受到年代际内部变率的重要调制.

1.3 物理机制

由温室气体强迫主导的全球增暖引起的大气水汽含量增加, 是造成降水增加的热力机制. 同时, 全球平均降水变化还受到大气能量平衡的约束. 在大气对辐射强迫的快速调整和海表温度的慢速响应的共同作用下, 气候模式模拟的全球平均降水以仅1%/K~3%/K的速率增加^[9], 这远低于大气水汽含量~7%/K的增速.

由于海陆增温速率差异, 全球变暖下陆地增温快于海洋, 使得陆地地区大气相对湿度降低, 即实际大气水汽含量的增速慢于饱和水汽压. CMIP6多模式显示, 陆地平均降水随全球升温的增加速率(0.1%/K~3%/K)普遍低于海洋(2.3%/K~3.3%/K)^[46]. 气候变暖引起的全球降水增加, 还部分地被气溶胶冷却效应及对温室气体强迫的快速调整效应抵消. 未来随着温室气体排放继续增加和气溶胶排放的减少, 与海表升温相关的慢响应过程对降水变化的影响将更加显著^[47].

在区域尺度上, 气候变暖驱动大气湿度增加及水汽输送增强, 总体上会放大现有的干湿空间格局, 形成全球尺度上“干更干—湿更湿”的响应^[9]. 这种响应特征在未来预估中较清晰, 而在过去几十年的观测中, 由于区域环流年代际变化的复杂性, 观测中的降水变化并未完全呈现出上述理论预测的空间型^[48].

2 人类活动对降水年循环的影响

2.1 观测事实

降水年循环(亦称季节循环)的变化反映了降水在各个季节的不均匀变化, 包括振幅和位相的变化. 降水年循环的振幅代表了干湿季节降水量的差异, 也称为年较差. 随着全球增暖, 全球及大多数区域能观测到降水年较差增强, 主要由雨季降水增加主导, 部分地区旱季降水量减少, 热带地区降水年较差增强最为显著^[17,19,49-51]. 1979~2010年间, 全球平均雨季降水增加速率为每10年 0.094 ± 0.020 mm/d, 旱季降水减少速率为每10年 0.053 ± 0.010 mm/d, 年较差增加速率为每10年 0.147 ± 0.028 mm/d^[52]. 尽管定量变化存在一定的资料间差异, 但全球平均降水年较差均表现为一致增强^[51].

降水年循环的位相可通过多种方法估算, 例如基于傅里叶分析第一谐波的位相来拟合降水年循环^[18,20],

或者直接根据雨季起止月份的降雨量相关变量进行描述^[21]。基于不同方法得到的结果定性一致^[53]。观测表明,过去近40年热带地区陆地降水年循环位相存在延迟,尤其是北半球热带地区及萨赫勒地区,1979~2019年间二者位相分别延迟 4.1 ± 1.1 及 4.2 ± 0.9 d(图3)^[21]。海洋上由于缺乏长期的观测资料,关于其降水年循环的历史变化特征目前仍不清楚。20世纪80年代以来,强热带气旋活跃时间从秋季提前至夏季,可能会引起热带海洋降水年循环位相提前^[54]。此外,1979~2014年热带外风暴轴的赤道一侧可以观测到雨季提前,尤其是南半球地区^[55]。

20世纪60年代以来,中国区域平均而言,降水的季节集中度呈减弱趋势(即年总降水在各个季节的分布倾向于更均匀),同时雨季持续时间有所延长。这种变化在我国北方地区更为显著,而在东南地区则长期趋势不明显^[56,57]。

综上,1979年以来,全球平均降水年循环增强,热带地区尤为显著。而降水年循环位相的变化存在区域差异,近40年热带陆地降水年循环位相延迟,而热带外风暴轴的赤道一侧雨季提前。

2.2 检测归因

检测归因研究表明,1982~2014年全球范围内降水年较差增大主要受到温室气体强迫的影响,人为气溶胶强迫在北非、欧洲等部分地区有利于降水年较差增强,自然强迫的影响可忽略不计^[51]。同时,在纬圈平均尺度上,年代际内部变率对1979~2014年间降水年较差的变化也有贡献,这与La Niña型海温变化有关^[55]。

除振幅变化以外,1979年以来热带陆地降水年循环位相推迟,尤其是北半球热带地区和萨赫勒地区,前者受温室气体强迫影响,后者则主要受欧美地区人为气溶胶减排影响(图3)^[21]。此外,20世纪80年代以来,强

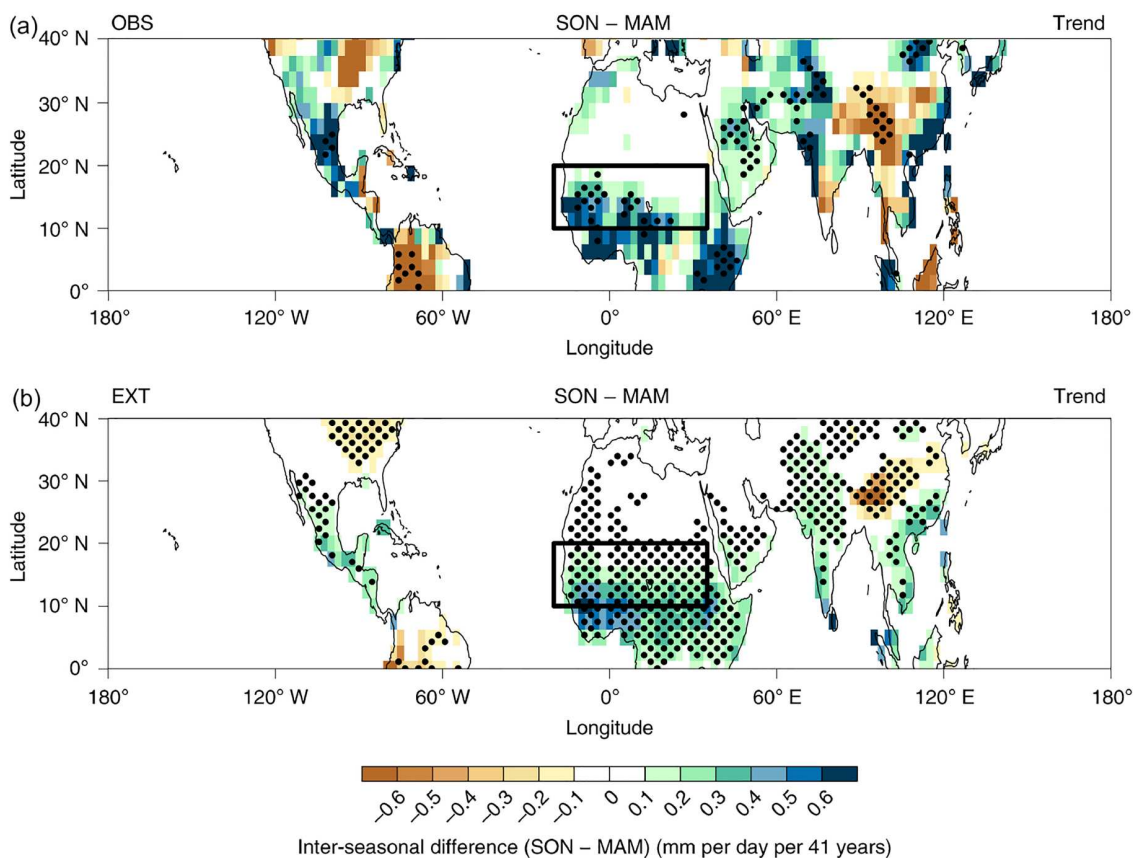


图3 1979~2019年间降水年循环位相的变化趋势(以9~11月降水与3~5月降水之差作为年循环位相指标,正值表示年循环位相延迟)。(a)为观测,(b)为多模式集合平均,代表外强迫作用。打点表示趋势通过10%显著性检验。引自文献文献^[21]

Figure 3 Linear trends of precipitation inter-seasonal difference (September-to-November minus March-to-May) during 1979–2019. (a) observations, (b) externally forced responses. Black dots indicate the trend is significant at the 90% confidence level. From Ref. ^[21]

热带气旋活跃时间从秋季提前至夏季,这主要受到温室气体增暖的影响^[54].

2.3 物理机制

降水年较差增强,即季节尺度上的“湿更湿”,其主要由大气对增温的热力响应主导.水汽收支诊断表明,水汽辐合的热力项(即大气水汽含量增加)主导了降水年较差增强,而环流变化则部分抑制了该变化^[19,50,58].在湿季,气候态上由水汽辐合和上升运动主导,伴随全球增暖下大气水汽含量的增加,假定环流场不变,则湿季的水汽辐合增加,因而降水增加;干季则相反.这种热力作用主导了降水年较差增大^[17].需要注意的是,“湿更湿”机制更适用于全球或纬向平均尺度,陆地区域尺度降水年较差的变化更复杂,还受到水平温度梯度、湿度梯度、陆气反馈等区域过程影响^[59,60].

降水年循环位相的变化受大气水汽含量、环流场的变化等因素影响,其中后者会影响风暴轴和ITCZ的季节性摆动^[55].热带地区陆地降水和季风区降水年循环位相的推迟与全球增温背景下大气有效比容增加有关(“大气有效比容”即湿静力能变化与温度变化的比值):大气有效比容增加,大气需要更长的时间来响应太阳辐射的年循环,使得半球间能量对比转换推迟,进一步导致与ITCZ季节性摆动有关的降水年循环推迟^[20,61].在全球增温背景下,海表温度的年循环振幅增强、夏季升温更快^[62,63].这一过程与大气有效比容增加相互竞争,使得海洋上降水年循环位相的变化存在区域性差异.

3 人类活动对降水谱的影响

3.1 观测事实

除了总降水量或平均降水的变化,对人类生产生活产生更直接影响的其实是日降水特征,通常反映在降水谱上,可以用日降水的概率密度函数(PDF)来表征.降水谱(precipitation spectrum直译)反映的是总降水量在不同强度等级上的分布,涉及无降水日(简称干日),以及降水频率和强度.

气候模拟研究一致表明,随着全球增暖,降水谱总体表现为强降水事件增多、弱降水和中等降水事件减少的特征,同时伴随降水频率减少、干日增加.上述特征存在一定的区域差异^[64].

在降水谱中,对人类影响最大的就是降水谱的两

端,即干事件和湿事件,它们分别与干旱和洪涝密切相关.因此,围绕观测中降水谱的变化,大多数研究或是针对干旱、或是针对强降水(见第4节)分别来开展研究.研究观测的降水谱变化,需要有高质量的逐日资料,因此,现有研究多是在区域尺度上进行的.在热带地区,观测资料表明1979~2003年间,强降水增多而中等降水减少.在印度中部地区,20世纪50年代以来,夏季风季节强降水事件增多、中等降水事件减少^[65].在中国东部地区,20世纪60年代以来,强降水日增加,弱降水日和中等降水日减少,同时伴随着干日增加;西北地区则强、弱降水均增加(图4)^[66,67].

综上所述,在观测资料较为充足的区域,20世纪50年代以来总体呈现出降水谱结构的系统性变化,表现为弱降水事件减少、强降水事件增多、同时干日增多.由于强弱降水事件的相反变化,两者对总降水量的影响有所抵消,因此在某些区域导致总降水量的变化相对较小.

3.2 检测归因

围绕降水谱变化的检测归因,多数研究是针对其两端(即干旱或者强降水)分别开展(见第5节),针对整个降水谱变化的检测归因研究较少,部分源于其对观测资料的要求高.针对中国东部地区,CMIP5/CMIP6历史气候模拟试验能再现观测中降水谱由弱降水向强降水事件的偏移(图4)^[67].基于CMIP5模式和最优指纹法的检测归因研究表明,1956~2005年间观测中日降水谱的这种变化可以归因于人为温室气体强迫^[66].

3.3 物理机制

强对流系统能够将周围大气中的大部分可用的水汽迅速凝结形成降水,因此极端降水的增幅总体上接近于大气水汽含量的增幅^[67,68].从对流能量转化的角度看,温室气体导致的增暖会通过增加低层大气湿度使对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)增加,同时大多数陆地区域低层相对湿度减少也会增强对流抑制能(convective inhibition, CIN).对流层低层相对湿度降低有利于弱/中等强度降水事件减少,而CAPE与CIN同时增大则有利于强降水事件增强^[69,70].强降水的增强会使得在一次事件中从大气中被移除的水汽量增加(以~7%/K的速率),而下垫面蒸发的增加速率仅为2%/K~3%/K,因此通过下垫面蒸发对大气水汽的补充时间会延长,可能导致两次降水事件

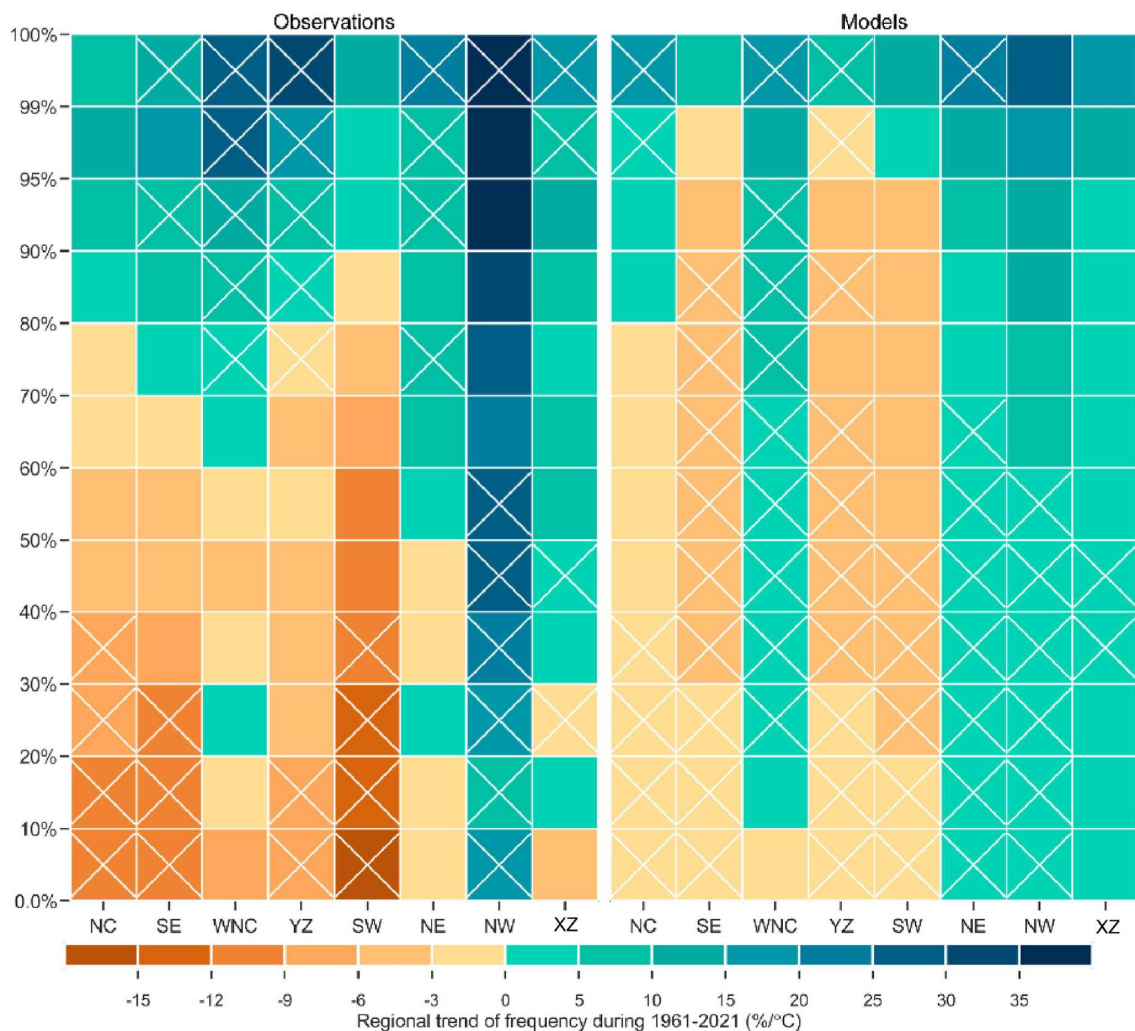


图 4 1961~2021年中国区域降水谱变化趋势,包括观测变化(左)和CMIP6多模式集合平均模拟(右)。纵坐标为不同百分位降水等级,横坐标为中国8个子区域(NC: 华北; SE: 中国东南部; WNC: 华北西部; YZ: 长江流域; SW: 西南; NE: 东北; NW: 西北; XZ: 西藏)。填色是降水频率变化趋势(单位: %/°C; 相对于全球平均地表气温变化)。观测数据来自中国区域2077个气象站,模式数据来自36个CMIP6模式的历史模拟和SSP5-8.5情景试验。白色X代表通过10%水平的Mann-Kendall显著性检验。引自文献[67]

Figure 4 Trends of frequency in different intensity intervals in 8 regions of China over 1961–2021, including observed changes (left) and simulated changes by CMIP6 ensemble simulations (historical and SSP5–8.5) (right). X-axis represents subregions (NC: North China; SE: Southeast China; WNC: Western North China; YZ: Yangtze River basin; SW: Southwest China; NE: Northeast China; NW: Northwest China; XZ: Xizang), y-axis denotes different precipitation intensity intervals. Shadings denote trends in frequency (unit: %/°C). White crosses indicate significant change at 0.1 significance level. From Ref. [67]

之间的干期延长,伴随降水频率减少^[70]。

人为气溶胶的影响比温室气体复杂得多。气溶胶对降水的影响涵盖不同的时空尺度^[71,72]。气溶胶-辐射效应和气溶胶-云相互作用通常比较局地,作用的时间尺度也相对较短(小时、天到月尺度)。例如,从气溶胶-云相互作用角度,气溶胶增加会使云凝结核增多,形成更多小云滴,延缓其碰并成雨滴的过程,从而抑制弱降水。在水汽充足且对流发展的环境下,弱降水的延缓会使水汽/云滴被抬升到更高层并释放更多潜热,从而增

强强降水^[71~73]。降水对气溶胶的响应,除了上述两大类快速调整过程,还包括慢响应,即气溶胶通过影响地表温度梯度、调整大尺度环流从而影响降水。慢响应通常发生在更大的时空尺度,多为月到年尺度^[71,74]。例如,在东亚季风区,CMIP多模式模拟研究表明人为气溶胶排放减弱了夏季强降水,这可能体现了慢响应过程的影响:通过冷却地表、减少大气水汽含量,以及减弱海陆温度梯度和季风环流,从热力和动力两方面抑制了强降水^[28,66,75]。因此,气溶胶对降水谱的净作用取

决于不同辐射效应、云微物理过程、能量约束和慢响应等过程的叠加或竞争,又受到气溶胶类型、浓度、垂直高度、水汽条件和背景动力场的调制,目前仍存在较大的不确定性^[71,72].

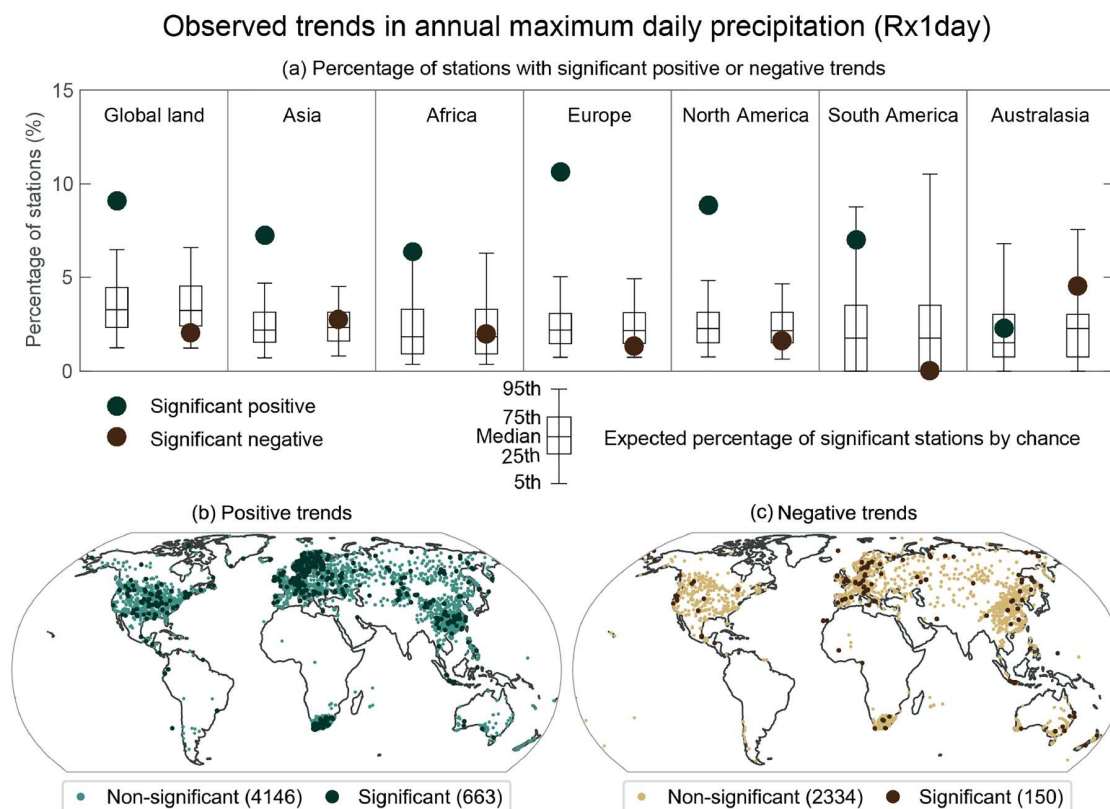
4 人类活动对极端降水的影响

4.1 观测事实

对于日尺度极端降水(如年最大日降水量 $Rx1day$ 、年最大连续5日降水量 $Rx5day$),1950年以来全球陆地上呈现增加趋势的台站数多于呈减弱趋势的台站数(图5)^[76].在区域尺度上,针对全球季风区和各大洲的

研究也揭示了极端降水增加的区域多于减弱的区域(图5)^[76,77].20世纪50年代以来全球湿润区和干旱区极端降水均呈增加趋势^[78].全球平均而言,降水量最强的前5%日数对年总降水量的贡献也已显著增加^[79].空间场显著性检验表明,在全球陆地和大洲尺度,以及全球陆地季风区,20世纪50年代以来观测中极端降水呈显著增强趋势的台站比例高于气候噪音的可能范围,而呈显著减弱趋势的台站比例位于气候噪音的可能范围之内(图5)^[76,77].这表明在全球和大洲尺度上,观测到的极端降水的系统性增强是显著的,不可能仅由气候噪音导致.

定量上,全球尺度上1950~2018年间年最大日降水



审图号: GS 京(2026)1634号

图 5 1950~2018年间年最大日降水量($Rx1day$)的观测变化趋势. 数据来自全球陆地共8345个观测时段较长且记录较完整的台站. (a) $Rx1day$ 呈显著趋势的台站比例: 绿色和棕色分别表示观测中的显著增加和减弱趋势. 盒须图表示仅在气候噪音影响下的可能变化, 自下而上分别表示零假设分布的第2.5、25、50、75、97.5百分位(由1000次bootstrap再取样估计得到). $Rx1day$ 呈增加(b)和减弱(c)趋势的台站分布. 深色和浅色圆点分别表示显著和不显著趋势. 显著性通过在5%水平上进行的双尾检验确定. 引自文献^[94]

Figure 5 Observed trends in annual maximum daily precipitation ($Rx1day$) during 1950–2018 at 8345 stations with sufficient data. (a) Percentage of stations with statistically significant trends in $Rx1day$; green dots show positive trends and brown dots negative trends. Box and ‘whisker’ plots indicate the expected percentage of stations with significant trends due to chance estimated from 1000 bootstrap realizations under a no-trend null hypothesis. The boxes mark the median, 25th percentile, and 75th percentile. The boxes mark the 2.5th, 25th, 50th, 75th, 97.5th percentiles, respectively. Maps of stations with positive (b) and negative (c) trends. The light colour indicates stations with non-significant trends, and the dark colour stations with significant trends. Significance is determined by a two-tailed test conducted at the 5% level. From Ref. ^[94]

量($R \times 1 \text{ day}$)的变化与全球平均温度相比, 响应率约为 $6.6\%/K$ ($5\% \sim 95\%$ 不确定性范围为 $5.1\%/K \sim 8.2\%/K$), 大致与Clausius-Clapeyron关系一致^[7,76]。需要注意的是, 观测中极端降水的定量变化呈现很强的区域差异和季节性差异。

围绕日内或小时尺度的极端降水长期变化研究则较为有限, 原因是小时降水观测资料有限。现有研究多针对区域尺度开展^[80,81]。过去几十年来一些区域小时极端降水呈增强趋势, 包括美国^[82]、澳大利亚^[83]、印度城市地区^[84]、意大利部分地区^[85]等。在定量上, 部分地区的小时极端降水随温度的增强速率超过了水汽增加速率, 甚至达到了两倍Clausius-Clapeyron速率^[80,81]。

20世纪60年代以来, 中国区域极端降水整体呈增强趋势, 区域平均年最大连续5日降水量($R \times 5 \text{ day}$)以 $1.2\%/10$ 年的趋势增加^[33,36,67,79,86,87]。区域上, 1961~2023年间, 我国西北、东北和东南地区日尺度极端降水显著增强, 梅雨降水呈极端化趋势, 而西南至华北(沿胡焕庸线)一带极端降水长期变化趋势不显著^[33,36,86,88]。21世纪以来伴随东亚夏季风的增强, 我国北方地区日极端降水呈恢复增强态势^[89]。在小时尺度上, 20世纪70年代以来中国东部地区整体上1 h或3 h极端降水的频率和强度呈增加趋势, 在东南部地区尤为显著^[90~92], 同时在区域尺度上还表现出明显的年代际变化^[93]。

综上所述, 20世纪50年代以来, 在全球尺度上以及有观测资料的大部分陆地区域, 日尺度极端降水已经增强(信度水平为有可能)^[94]。在大洲尺度, 对于北美洲、欧洲和亚洲的极端降水增强趋势信度相对较高, 这与这些区域的观测资料更丰富有关。而受限于小时降水观测资料的不足, 针对小时极端降水的观测变化信度相对较低^[80,81,94]。

4.2 检测归因

在全球尺度上, 20世纪50年代以来观测到的北半球陆地区域日尺度极端降水($R \times 1 \text{ day}$ 、 $R \times 5 \text{ day}$)的增强趋势可归因于人为强迫, 而自然强迫无显著影响, 这在CMIP5和CMIP6两代模式中采用最优指纹法均得以证实^[16,95,96]。除了极端降水强度, 人为强迫对极端降水的增强作用也可在其他极端降水指标中检测到, 包括强降水量对年总降水量的贡献^[78], 以及破纪录日降水事件的发生概率^[97]等。

在区域尺度上, 20世纪50年代以来北半球热带外区域、北美洲、欧洲、亚洲地区的日尺度极端降水增强趋势可以被检测到并归因于人为强迫, 尤其是温室气体强迫(图6)^[76,79,94~96,98]。而人为气溶胶排放对日尺度极端降水的历史变化通常起到减弱的作用, 这部分抵消了温室气体的影响^[79,95,99]。

关于小时极端降水长期变化的检测归因研究, 现有工作较为有限, 部分地区观测中过去几十年小时极端降水的增幅已经超过内部变率的范围, 表明外强迫的作用能够被检测到, 包括美国^[82]、澳大利亚^[83]、中国东部^[90]等。

城市化使得城市区域的极端降水变化更复杂^[100]。在中国区域, 研究发现城市化使得诸多城市区域及其下风向极端降水增加^[101]。超过60%中国大城市的城区小时降水强度高于郊区^[102,103]。城市化对极端降水的影响在不同城市化发展阶段也不同。相较于城市化初期, 珠三角快速城市化阶段的小时降水显著增强、短时极端降水频次显著增加, 这与城市热岛对局地对流系统的触发和增强效应有关^[104]。

除了长期变化的检测归因, 针对高影响极端事件的事件归因研究在最近十多年得到快速发展。事件归因旨在回答人类活动在多大程度上影响了某一次或某类极端事件的发生概率或强度^[105,106]。基于全球不同区域诸多极端降水事件的事件归因研究, 总体来说, 人为气候增暖已经导致全球许多高影响极端降水事件的发生概率和强度增加, 其归因信度主要来自大气增暖增湿的热力响应(例如*Bulletin of the American Meteorological Society*(《美国气象学会公报》)历年的极端事件归因特别报告“Explaining Extreme Events from a Climate Perspective”)。但是受区域环流变化和内部变率等动力作用、气溶胶等区域外强迫因子的影响, 许多极端降水事件并不能简单归因于人为气候变暖的影响^[106]。

总体而言, 区域尺度极端降水变化的归因信度较有限, 大多只有中低信度(图6)^[107]。极端降水变化的归因信度与降水的时空尺度有关。一般来说, 区域尺度越小, 则极端降水变化的检测归因信度越低。一方面, 越小的区域受到气候系统内部变率或气候噪音的影响更大, 使得降水变化的信噪比更低^[108]。另一方面, 区域尺度上不同外强迫的作用更为复杂, 尤其是人为气溶胶和土地利用/土地覆盖变化等, 其变化分布和气候效应都具有很强的区域性。极端降水的归因结果也依

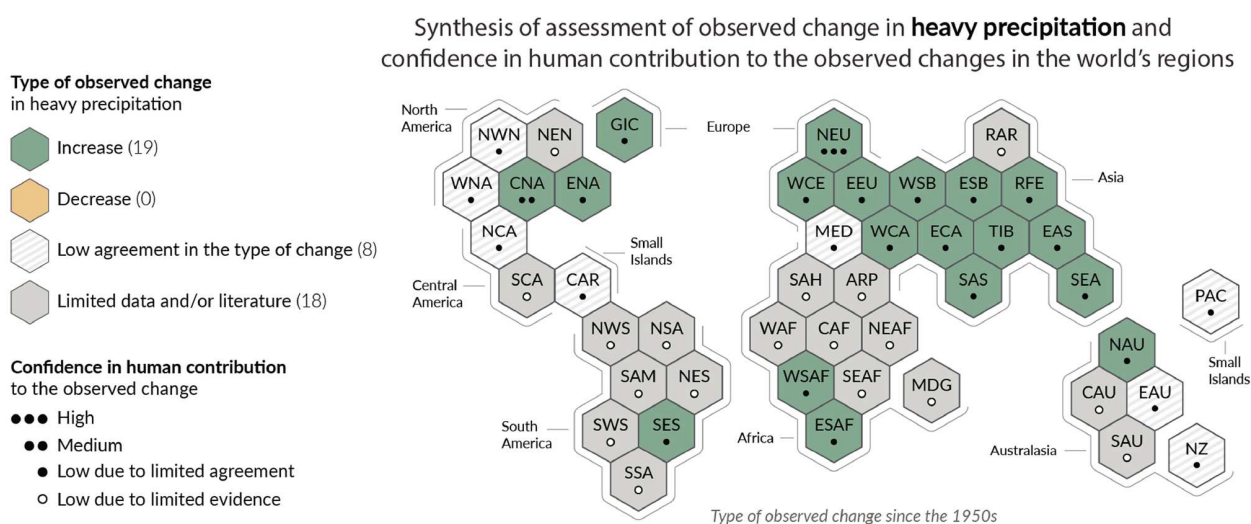


图6 20世纪50年代以来区域极端降水的观测变化及人为影响归因。填色代表观测到的降水变化类型，打点表示观测变化中人为贡献的信度。评估主要基于日尺度极端降水指标。引自文献[107]

Figure 6 Synthesis of observed and attributable regional changes in heavy precipitation since the 1950s. The colors represent observed changes. The number of dots indicates the confidence level for the human influence on these observed changes. From Ref. [107]

赖于降水事件的时间尺度，例如在东亚季风区，人为强迫增强了日尺度极端降水而削弱了月尺度持续性强降雨，这与温室气体和人为气溶胶强迫的相对贡献有关[75]。

综上所述，在全球尺度以及观测资料较充足的北美洲、欧洲和亚洲地区，20世纪50年代以来观测到的日尺度极端降水增强可以归因于人为强迫，且由人为温室气体强迫主导。在更小的区域尺度上，由于人为气溶胶等区域性强迫和内部变率的叠加影响，归因难度更大，结果的信度也有限。

4.3 物理机制

与平均降水类似，极端降水变化的物理机制也包括热力和动力过程。热力作用，即大气升温、水汽含量增加，有利于极端降水增强，这种热力作用在空间上相对较均匀。全球平均而言，1950~2018年间年最大日降水量(R_{x1day})的变化与全球平均温度相比，响应率约为6.6%/K，这与Clausius-Clapeyron关系这种热力作用大致一致[76]。

动力作用，即环流场的变化，对于区域尺度极端降水变化具有重要的影响[109]。动力作用包括大尺度背景环流的变化和对天气系统的直接影响，例如通过影响热带气旋、热带外气旋、中尺度对流系统等天气系统的发生频率、强度、持续时间、大小、位置等来影响

极端降水。例如，20世纪90年代末IPO转为负位相，伴随西北太平洋副热带高压的增强，带来的大尺度东风引导气流异常有利于西北太平洋热带气旋移动路径偏西，从而使得东亚陆地上与热带气旋有关的极端降水增加[110]。1979年以来美国大平原地区春季中尺度对流系统发生频率增加，这与海温年代际变化下低空急流发生频率的增加有关[111]。这都反映了大尺度气候变率模态可通过调节背景环流场，从而影响到天气系统及其产生的极端降水。

在对流系统内部，伴随增暖背景下大气水汽含量的增加，对流释放的凝结潜热也相应增加。这种增强的凝结潜热在大多数情形下能进一步促进风暴内部的上升运动和降水，形成极端降水和凝结潜热之间的正反馈过程[4,112]。然而，凝结潜热释放的增加也会影响更大空间尺度上的大气垂直稳定度，进而影响大尺度垂直运动，这体现了小尺度对流凝结潜热对大尺度环流的反馈作用[94,112,113]。可见，动力过程涉及多尺度环流系统的变化及其相互作用，因此动力作用对极端降水的影响极为复杂[114,115]。此外，极端降水还受到降水效率这一微物理过程的影响，但是关于气候变化对降水效率的影响，目前的认识极为有限[4,116]。

关于人类活动影响极端降水的物理过程，目前对于水汽增加这一热力响应已经形成共识，并且热力作用的全球分布相对均匀。而关于动力过程，即人为强迫

如何影响多尺度环流系统以及进一步如何影响极端降水,当前研究尚处于起步阶段。加深这方面的认识,对理解极端降水变化的区域差异非常重要。

5 人类活动对降水变率的影响

5.1 观测事实

除了平均和极端降水的变化,近年来降水不断表现出更加复杂多变的特征,如频繁的“水深火热”和旱涝转换^[117]。这反映了降水变化的新特征——即降水变率在增强。降水变率(亦称降水“多变性”或“变异性”),反映的是降水在时间上分配的均匀性,常利用方差或者标准差来衡量。降水变率越强,则干湿波动越剧烈。

20世纪初以来,在观测资料充足的地区,全球约四分之三的陆地上降水变率已增强^[24]。降水变率的增强在不同季节均可观测到,且已发生在多个时间尺度,包括天气尺度、月尺度和季节内尺度。全球陆地平均而言,1900~2020年间逐日降水变率正以1.2%/10年的速率在增强^[24]。在欧洲、澳大利亚和北美东部区域,观测资料的时空覆盖度较高、时间跨度长,因此对于降水变率的长期增加趋势具有较高的信噪比和信度^[24](图7)。在年际尺度上,20世纪70年代以来美国地区降水年际变率的趋势呈现明显的区域差异,东南部降水年际变率增强、西部减弱^[118]。在海洋上,20世纪后半叶以来,赤道东太平洋热带辐合带区域、北半球中纬度风暴轴的部分区域可观测到日尺度降水变率增强^[22,119]。中国大部分地区自20世纪60年代以来降水变

率呈增强趋势,包括天气、月和季节内尺度的变率,全国平均的逐日降水变率增速为2.3%/10年,其中西北、东北和东南部地区增速较快^[33]。

5.2 检测归因

围绕降水变率长期变化的检测,基于深度学习的研究发现20世纪80年代以来的全球逐日降水空间场的变化中能再现全球增暖的信号,这背后是由赤道东太平洋热带辐合带和北半球中纬度风暴轴部分区域的天气尺度降水变率增加主导的^[118]。针对过去百年观测变化的归因,基于多模式大样本分离强迫集合模拟试验,结合最优指纹法,研究证明了欧洲、澳大利亚和北美东部区域观测中降水变率的增强趋势由人为强迫导致,其中人为温室气体排放主导了降水变率的增强,而人为气溶胶排放总体上使降水变率减弱^[24](图7)。需要注意的是,由于区域尺度人为气溶胶排放的年代际变化,其对降水变率的影响也相应存在年代际转变^[24]。

5.3 物理机制

影响降水变率增强的物理过程由大气热力作用主导。伴随温室气体排放导致的大气升温和水汽含量增加,即使环流场保持不变,大气水汽含量的增加会使得降水事件按水汽增加的比例增强,从而导致降水事件的振幅(即标准差)也按相应的比例增强,这就是大气热力响应导致的降水变率增强。水汽收支诊断表明,在欧洲、澳大利亚和北美东部这三个观测降水变率显著增加的区域,大气热力响应对观测变化趋势的贡献能达

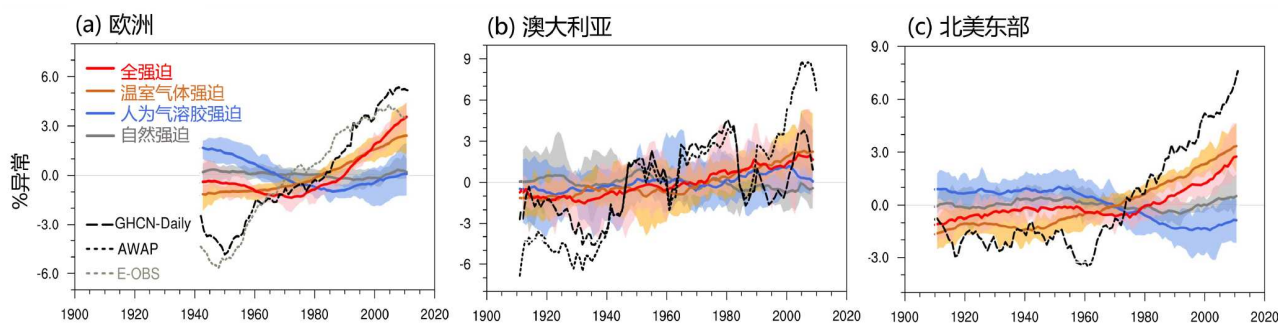


图7 1900~2020年逐日降水变率的线性趋势,分别为欧洲(a)、澳大利亚(b)和北美东部(c)地区(单位:%异常)。黑/灰色虚线表示不同的观测资料。彩色线代表对不同外强迫的响应,包括全强迫(红色)、温室气体强迫(棕色)、人为气溶胶强迫(蓝色)和自然强迫(灰色)。实线表示CMIP6多模式集合平均,阴影表示多模式离差。引自文献^[24]

Figure 7 Changes in daily precipitation variability over 1900–2020 (unit: % anomaly). Dashed curves show observed changes. Regional mean response of precipitation variability to different external forcings for Europe (a), Australia (b) and eastern North America (c). Different colors represent different external forcings, including all external forcings (red), greenhouse gas forcing (brown), anthropogenic aerosol forcing (blue), and natural forcing (gray). Solid curves and shadings denote the mean and multi-model spread. From Ref. ^[24]

到60%左右^[24]。大气热力响应主导降水变率的增强,这一结论在观测变化和基于气候模拟的预估研究中是一致的^[23,120]。

在区域尺度上,与环流变化有关动力作用对降水变率有重要的调节作用。对于降水变率而言,对流层中层大气垂直运动的变率变化是重要的动力过程^[23,24,120]。与热力作用相比,动力作用有很强的区域差异和年代际变化特征^[23,24]。针对不同区域,影响降水变率的主导环流变化也不同;关于特定环流系统的影响,目前研究还非常有限。

6 科学挑战与未来展望

工业化以来的人类活动已经对降水产生了广泛和多维度的影响。在全球尺度上,近几十年全球平均降水呈增加趋势,部分地区呈现“湿季更湿”的季节循环增强现象。在降水形式上,大部分地区呈现出弱降水事件减少、极端降水事件增加(降水谱右移),并伴随着多尺度降水变率增强(降水谱增宽)。全球尺度上的这些观测变化特征与气候模拟和理论认识总体一致,表明随着人为强迫增强和气候变化的累积,人为作用逐渐主导了观测中的降水变化。而在区域尺度上,降水变化的检测归因和物理认识仍存在许多科学难点,使得关于区域降水变化的归因信度较低^[107]。

第一,观测资料(尤其是日尺度和日内尺度降水的观测)的时空覆盖度有限,许多地区(尤其是非洲和南美)缺乏长期观测,阻碍了对这些地区降水变化的认识。

第二,影响降水变化的物理过程复杂,目前气候学界对于影响降水变化的热力过程,认识已经较为清楚,但关于区域尺度的动力过程(包括区域环流变化、多尺度环流相互作用、反馈等)和形成降水的云微物理过程如何响应全球变暖,认知上依然存在很大的不确定性^[121]。

第三,从外强迫的角度,尽管全球尺度的降水变化由温室气体强迫主导,但人为气溶胶、土地利用和土地覆盖变化等其他外强迫的作用在区域尺度上非常重要,在部分地区其作用甚至会超过温室气体强迫。由于气溶胶排放的年代际变化和区域差异、气溶胶气候效应的复杂性,以及当前气候模式对气溶胶作用的物理过程刻画能力有限,使得区域降水变化归因存在较大的不确定性(如文献^[71])。

第四,目前仍有许多地区无法检测到降水的长期变化,或者观测到的变化趋势与气候模拟和理论推断

不一致,可能原因之一就是气候内部变率的影响。从检测归因的角度,区域降水变化的信噪比较低^[108]。

第五,降水变化的归因和物理认识在很大程度上依赖气候模拟,而当前气候模式对降水的模拟能力受限于分辨率、物理过程参数化不确定性等^[122]。气候模式对降水(尤其是极端降水)的模拟偏差也是影响降水变化归因的原因之一^[123]。

针对上述科学挑战,推动降水变化的认识需要“观测网络-物理机制-模拟能力”的全链条提升。在观测变化方面,在过去几十年极端降水长期增加的基础上,需要关注极端降水的新特征,比如中国东部强降水带在近20年的北移、暴雨相关的新型复合极端事件等。随着小时尺度观测资料的积累,需提升对日内尺度极端降水变化的认识。在物理机制方面,需要加强对全球增暖下多尺度大气环流变化的研究,需要在区域尺度上理解具体的环流系统如何影响极端降水变化,从而从动力角度提升对降水变化的理解。在检测归因方面,需要加强降水变化归因的物理基础研究。在模式模拟方面,提高模式的水平分辨率能在一定程度上改善模式对降水(尤其是极端降水)的模拟偏差,特别是公里尺度的对流解析模拟(convection-permitting modeling)由于能显式模拟对流,有望为极端降水模拟带来质的提升^[80,81,124-126]。

围绕上述发展方向,目前国际气候学界已经发起和部署了针对性国际计划。“全球能量与水循环试验”(Global Energy and Water Exchanges, GEWEX)作为世界气候研究计划(WCRP)的核心项目之一,从20世纪90年代启动至今,一直致力于通过改进观测和模拟,提升对全球水循环和能量循环的理解和预测能力。于2023年启动的WCRP一个新的核心计划——“地球系统模拟与观测”(Earth System Modelling and Observations, ESMO),旨在推进气候系统观测网络、数据同化和数值模拟的协同发展。WCRP最新发起的“全球降水试验”(Global Precipitation Experiment, GPEX)灯塔计划则是专门针对降水,从完善观测网络、开展野外观测实验、结合公里尺度模拟和人工智能等新技术多个维度,旨在提升对降水变化的理解和预测水平。因此,未来降水变化的研究应面向更完备的观测、更完善的物理过程认识、更精细和准确的数值模拟方向发展,充分利用公里尺度模拟和人工智能等新技术,加强跨区域和跨学科合作,以更好的应对降水变化对水资源、旱涝灾害和社会经济的影响。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所陈泳君博士生在文献调研和整理中的贡献。

参考文献

- 1 Clapeyron E. Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur. L'école Polytech XXIIIe Cah, 1834, 14: 153–191
- 2 Clausius R. Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. Ann Phys, 1850, 155: 368–397
- 3 Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al. Water cycle changes. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., eds. 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 and New York: Cambridge University Press, 2021
- 4 O’Gorman P A. Precipitation extremes under climate change. *Curr Clim Change Rep*, 2015, 1: 49–59
- 5 Zhou T, Jiang J, Hu S, et al. Regional climate change: the contributions of anthropogenic forcing and natural variability (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, doi: [10.1360/CSB-2025-0305](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0305) [周天军, 江洁, 胡帅, 等. 区域气候变化: 人为强迫和自然变率的作用. 科学通报, 2025, doi: [10.1360/CSB-2025-0305](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0305)]
- 6 Eyring V, Gillett N P, Achuta Rao K M, et al. Human influence on the climate system. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., eds. 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 and New York: Cambridge University Press, 2021
- 7 Fischer E M, Knutti R. Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 986–991
- 8 Manabe S, Wetherald R T. The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J Atmos Sci*, 1975, 32: 3–15
- 9 Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J Clim*, 2006, 19: 5686–5699
- 10 Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 2007, 448: 461–465
- 11 Wu P, Christidis N, Stott P. Anthropogenic impact on Earth’s hydrological cycle. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 807–810
- 12 Noda A, Tokioka T. The effect of doubling the CO₂ concentration on convective and non-convective precipitation in a general circulation model coupled with a simple mixed layer ocean model. *J Meteorol Soc Jpn*, 1989, 67: 1057–1069
- 13 Trenberth K E. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Clim Change*, 1999, 42: 327–339
- 14 Emori S, Brown S J. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: 2005GL023272
- 15 Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 2008, 321: 1481–1484
- 16 Min S K, Zhang X, Zwiers F W, et al. Human contribution to more intense precipitation extremes. *Nature*, 2011, 470: 378–381
- 17 Chou C, Tu J, Tan P. Asymmetry of tropical precipitation change under global warming. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: 2007GL030327
- 18 Biasutti M, Sobel A H. Delayed Sahel rainfall and global seasonal cycle in a warmer climate. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 2009GL041303
- 19 Chou C, Lan C W. Changes in the annual range of precipitation under global warming. *J Clim*, 2012, 25: 222–235
- 20 Song F, Leung L R, Lu J, et al. Seasonally dependent responses of subtropical highs and tropical rainfall to anthropogenic warming. *Nat Clim Change*, 2018, 8: 787–792
- 21 Song F, Leung L R, Lu J, et al. Emergence of seasonal delay of tropical rainfall during 1979–2019. *Nat Clim Chang*, 2021, 11: 605–612
- 22 Pendergrass A G, Knutti R, Lehner F, et al. Precipitation variability increases in a warmer climate. *Sci Rep*, 2017, 7: 17966
- 23 Zhang W, Furtado K, Wu P, et al. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Sci Adv*, 2021, 7: eabf8021
- 24 Zhang W, Zhou T, Wu P. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century. *Science*, 2024, 385: 427–432
- 25 Gulev S K, Thorne P W, Ahn J, et al. Changing state of the climate system. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., eds. 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 and New York: Cambridge University Press, 2021
- 26 Nguyen P, Thorstensen A, Sorooshian S, et al. Global precipitation trends across spatial scales using satellite observations. *Bull Am Meteorol Soc*, 2018, 99: 689–697
- 27 Knutson T R, Zeng F. Model assessment of observed precipitation trends over land regions: detectable human influences and possible low bias in model trends. *J Clim*, 2018, 31: 4617–4637
- 28 Zhou T, Zhang W, Zhang L, et al. The dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation driven by anthropogenic aerosols emission. *Sci China Earth Sci*, 2020, 63: 919–933 [周天军, 张文霞, 张丽霞, 等. 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, 2020, 50: 1122–1137]

- 29 Wang B, Liu J, Kim H J, et al. Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Niño/southern oscillation and Atlantic multidecadal oscillation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 5347–5352
- 30 Guhathakurta P, Menon P, Inkane P M, et al. Trends and variability of meteorological drought over the districts of India using standardized precipitation index. *J Earth Syst Sci*, 2017, 126: 120
- 31 China Meteorological Administration National Climate Center. Blue Book on Climate Change in China 2025 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2025 [中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2025). 北京: 科学出版社, 2025]
- 32 Yang S. Development of an *in-situ* homogenized daily and monthly precipitation dataset for China over 120 years (1900–2022) (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2025, 49: 13–22 [杨溯. 中国百年(1900-2022年)均一化降水量日值和月值数据集研制. 大气科学, 2025, 49: 13–22]
- 33 Mo X, Zhang W, Zhou T. Increased precipitation variability at multi-timescales in China since the 1960s. *Weather Clim Extremes*, 2025, 50: 100808
- 34 Wang T, Sun Y, Zhang X, et al. Detectable anthropogenic influence in mean precipitation of China. *Geophys Res Lett*, 2025, 52: e2025GL114870
- 35 Day J A, Fung I, Liu W. Changing character of rainfall in eastern China, 1951–2007. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 2016–2021
- 36 Wang Q, Zhai P, Zhang Q. Regional patterns of climate change and extreme events in China since 1961 (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2025, 83: 980–989 [王倩, 翟盘茂, 张强. 1961年以来中国区域性气候与极端事件变化格局. 气象学报, 2025, 83: 980–989]
- 37 Schurer A P, Ballinger A P, Friedman A R, et al. Human influence strengthens the contrast between tropical wet and dry regions. *Environ Res Lett*, 2020, 15: 104026
- 38 Salzmänn M, Weser H, Cherian R. Robust response of Asian summer monsoon to anthropogenic aerosols in CMIP5 models. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 11321–11337
- 39 Huang X, Zhou T, Turner A, et al. The recent decline and recovery of Indian summer monsoon rainfall: relative roles of external forcing and internal variability. *J Clim*, 2020, 33: 5035–5060
- 40 Roxy M K. Land warming revives monsoon. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 549–550
- 41 Song F, Zhou T, Qian Y. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 596–603
- 42 Yang Q, Ma Z, Fan X, et al. Decadal modulation of precipitation patterns over eastern China by sea surface temperature anomalies. *J Clim*, 2017, 30: 7017–7033
- 43 Maidment R I, Allan R P, Black E. Recent observed and simulated changes in precipitation over Africa. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 8155–8164
- 44 Garreaud R D, Boisier J P, Rondanelli R, et al. The Central Chile Mega Drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *Intl J Climatol*, 2020, 40: 421–439
- 45 Sui X, Yang Z L, Shepherd M, et al. Global scale assessment of urban precipitation anomalies. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121: e2311496121
- 46 Pendergrass A G. The global-mean precipitation response to CO₂-induced warming in CMIP6 models. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL089964
- 47 Salzmänn M. Global warming without global mean precipitation increase? *Sci Adv*, 2016, 2: e1501572
- 48 Watanabe M, Kang S M, Collins M, et al. Possible shift in controls of the tropical Pacific surface warming pattern. *Nature*, 2024, 630: 315–324
- 49 Huang P, Xie S P, Hu K, et al. Patterns of the seasonal response of tropical rainfall to global warming. *Nat Geosci*, 2013, 6: 357–361
- 50 Dwyer J G, Biasutti M, Sobel A H. The effect of greenhouse gas-induced changes in SST on the annual cycle of zonal mean tropical precipitation. *J Clim*, 2014, 27: 4544–4565
- 51 Wang X, Luo M, Song F, et al. Precipitation seasonality amplifies as Earth warms. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL109132
- 52 Chou C, Chiang J C H, Lan C W, et al. Increase in the range between wet and dry season precipitation. *Nat Geosci*, 2013, 6: 263–267
- 53 Song F, Leung L R, Lu J, et al. Advances in understanding the changes of tropical rainfall annual cycle: a review. *Environ Res-Clim*, 2023, 2: 042001
- 54 Shan K, Lin Y, Chu P S, et al. Seasonal advance of intense tropical cyclones in a warming climate. *Nature*, 2023, 623: 83–89
- 55 Marvel K, Biasutti M, Bonfils C, et al. Observed and projected changes to the precipitation annual cycle. *J Clim*, 2017, 30: 4983–4995
- 56 Mao Y, Wu G, Xu G, et al. Reduction in precipitation seasonality in China from 1960 to 2018. *J Clim*, 2022, 35: 227–248
- 57 Hu J, Dong S, Wang L, et al. Impact of human activities on seasonal changes in precipitation in China (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2024, 29: 643–655 [胡家晖, 董思言, 王磊斌, 等. 人类活动对中国降水季节性变化的影响. 气候与环境研究, 2024, 29: 643–655]
- 58 Zhang W, Zhou T, Zhang L, et al. Future intensification of the water cycle with an enhanced annual cycle over global land monsoon regions. *J Clim*, 2019, 32: 5437–5452
- 59 Byrne M P, A. The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: why the “Wet-Get-Wetter, Dry-Get-Drier” scaling does not hold over land. *J Clim*, 2015, 28: 8078–8092
- 60 Zhou S, Williams A P, Lintner B R, et al. Diminishing seasonality of subtropical water availability in a warmer world dominated by soil moisture-atmosphere feedbacks. *Nat Commun*, 2022, 13: 5756

- 61 Lv S, Song F, Dong H, et al. Phase and amplitude changes in rainfall annual cycle over global land monsoon regions under global warming. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL108496
- 62 Liu F, Song F, Luo Y. Human-induced intensified seasonal cycle of sea surface temperature. *Nat Commun*, 2024, 15: 3948
- 63 Shi J R, Santer B D, Kwon Y O, et al. The emerging human influence on the seasonal cycle of sea surface temperature. *Nat Clim Chang*, 2024, 14: 364–372
- 64 Chadwick R, Pendergrass A G, Alves L M, et al. How do regional distributions of daily precipitation change under warming? *J Clim*, 2022, 35: 3243–3260
- 65 Mishra A, Liu S C. Changes in precipitation pattern and risk of drought over India in the context of global warming. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 7833–7841
- 66 Ma S, Zhou T, Stone D A, et al. Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over eastern China. *J Clim*, 2017, 30: 1381–1396
- 67 Wang J, Zhai P, Li C. Non-uniform changes of daily precipitation in China: observations and simulations. *Weather Clim Extremes*, 2024, 44: 100665
- 68 Kendon E J, Rowell D P, Jones R G. Mechanisms and reliability of future projected changes in daily precipitation. *Clim Dyn*, 2010, 35: 489–509
- 69 Chen J, Dai A, Zhang Y, et al. Changes in convective available potential energy and convective inhibition under global warming. *J Clim*, 2020, 33: 2025–2050
- 70 Dai A, Rasmussen R M, Liu C, et al. A new mechanism for warm-season precipitation response to global warming based on convection-permitting simulations. *Clim Dyn*, 2020, 55: 343–368
- 71 Stier P, van den Heever S C, Christensen M W, et al. Multifaceted aerosol effects on precipitation. *Nat Geosci*, 2024, 17: 719–732
- 72 Zhao C, Sun Y, Yang J, et al. Observational evidence and mechanisms of aerosol effects on precipitation. *Sci Bull*, 2024, 69: 1569–1580
- 73 Abbott T H, Cronin T W. Aerosol invigoration of atmospheric convection through increases in humidity. *Science*, 2021, 371: 83–85
- 74 Bollasina M A, Wilcox L J. Chapter 13-Atmospheric and oceanic dynamical responses to changes in aerosol. In: Carslaw K S, ed. *Aerosols and Climate*. San Diego: Elsevier, 2022. 545–570
- 75 Zhang W, Li W, Zhu L, et al. Anthropogenic influence on 2018 summer persistent heavy rainfall in central western China. *Bull Am Meteorol Soc*, 2020, 101: S65–S70
- 76 Sun Q, Zhang X, Zwiers F, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *J Clim*, 2021, 34: 243–258
- 77 Zhang W, Zhou T. Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the global land monsoon regions. *J Clim*, 2019, 32: 8465–8488
- 78 Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 508–513
- 79 Dong S, Sun Y, Li C, et al. Attribution of extreme precipitation with updated observations and CMIP6 simulations. *J Clim*, 2021, 34: 871–881
- 80 Fowler H J, Lenderink G, Prein A F, et al. Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, 2: 107–122
- 81 Fowler H J, Ali H, Allan R P, et al. Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes. *Phil Trans R Soc A*, 2021, 379: 20190542
- 82 Mascaro G, Farris S, Deidda R. Evidence of emerging increasing trends in observed subdaily heavy precipitation frequency in the United States. *Geophys Res Lett*, 2025, 52: e2024GL114292
- 83 Guerreiro S B, Fowler H J, Barbero R, et al. Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes. *Nat Clim Change*, 2018, 8: 803–807
- 84 Ali H, Mishra V. Contributions of dynamic and thermodynamic scaling in subdaily precipitation extremes in India. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 2352–2361
- 85 Libertino A, Ganora D, Claps P. Evidence for increasing rainfall extremes remains elusive at large spatial scales: the case of Italy. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 7437–7446
- 86 Jiang J, Zhou T, Zhang W. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2022, 46: 707–724 [江洁, 周天军, 张文霞. 近60年来中国主要流域极端降水演变特征. *大气科学*, 2022, 46: 707–724]
- 87 Chen W, Cui H, Zwiers F W, et al. Detection and attribution of changes in precipitation extremes in China and its different climate zones. *J Clim*, 2024, 37: 5373–5385
- 88 Yin Z, Song X, Zhou B, et al. Traditional Meiyu-Baiu has been suspended by global warming. *Natl Sci Rev*, 2024, 11: nwae166
- 89 Wang Y, Wang H, Song L. Amplified precipitation extremes since 21st century in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China. *Atmos Res*, 2024, 311: 107695
- 90 Chen Y, Li W, Jiang X, et al. Detectable intensification of hourly and daily scale precipitation extremes across eastern China. *J Clim*, 2021, 34: 1185–1201

- 91 Xiao C, Wu P, Zhang L, et al. Robust increase in extreme summer rainfall intensity during the past four decades observed in China. *Sci Rep*, 2016, 6: 38506
- 92 Li X, Zhang K, Bao H, et al. Climatology and changes in hourly precipitation extremes over China during 1970–2018. *Sci Total Environ*, 2022, 839: 156297
- 93 Zhao Y, Zhang Q, Ju X, et al. Analysis of the characteristics of short-term extreme precipitation in China in the last 30 years (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2024, 48: 1144–1156 [赵煜飞, 张强, 鞠晓慧, 等. 中国近30年短时极端降水特征分析. *大气科学*, 2024, 48: 1144–1156]
- 94 Seneviratne S I, Zhang X, Adnan M, et al. Weather and climate extreme events in a changing climate. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., eds. *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 and New York: Cambridge University Press, 2021
- 95 Paik S, Min S, Zhang X, et al. Determining the anthropogenic greenhouse gas contribution to the observed intensification of extreme precipitation. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL086875
- 96 Zhang X, Wan H, Zwiers F W, et al. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 5252–5257
- 97 Shiogama H, Imada Y, Mori M, et al. Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. *SOLA*, 2016, 12: 225–231
- 98 Kirchmeier-Young M C, Zhang X. Human influence has intensified extreme precipitation in North America. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 13308–13313
- 99 Risser M D, Collins W D, Wehner M F, et al. Anthropogenic aerosols mask increases in US rainfall by greenhouse gases. *Nat Commun*, 2024, 15: 1318
- 100 Qian Y, Chakraborty T C, Li J, et al. Urbanization impact on regional climate and extreme weather: current understanding, uncertainties, and future research directions. *Adv Atmos Sci*, 2022, 39: 819–860
- 101 Yuan Y, Zhai P. Latest understanding of extreme weather and climate events under global warming and urbanization influences (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2022, 45: 161–166 [袁宇锋, 翟盘茂. 全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知. *大气科学学报*, 2022, 45: 161–166]
- 102 Huang X, Wang D, Ziegler A D, et al. Influence of urbanization on hourly extreme precipitation over China. *Environ Res Lett*, 2022, 17: 044010
- 103 Fu X, Yang X, Sun X. Spatial and diurnal variations of summer hourly rainfall over three super city clusters in eastern China and their possible link to the urbanization. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124: 5445–5462
- 104 Wu M, Luo Y, Chen F, et al. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China. *J Appl Meteor Climatol*, 2019, 58: 1799–1819
- 105 Otto F E L. Attribution of weather and climate events. *Annu Rev Environ Resour*, 2017, 42: 627–646
- 106 Sun Y, Zhang X, Ding Y, et al. Understanding human influence on climate change in China. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab113
- 107 Intergovernmental Panel On Climate Change (PCC). *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 and New York: Cambridge University Press, 2021
- 108 Kirchmeier-Young M C, Wan H, Zhang X, et al. Importance of framing for extreme event attribution: the role of spatial and temporal scales. *Earth's Future*, 2019, 7: 1192–1204
- 109 Pfahl S, O’gorman P A, Fischer E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 423–427
- 110 Wu J, Kawamura R, Mochizuki T, et al. Increasing WNP tropical cyclone-related extreme precipitation over East Asia during boreal summer associated with PDO shift. *Weather Clim Extremes*, 2024, 45: 100714
- 111 Song F, Leung L R, Feng Z, et al. Observed and projected changes of large-scale environments conducive to spring MCS initiation over the US Great Plains. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2022GL098799
- 112 Nie J, Sobel A H, Shaevitz D A, et al. Dynamic amplification of extreme precipitation sensitivity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 9467–9472
- 113 Tandon N F, Zhang X, Sobel A H. Understanding the dynamics of future changes in extreme precipitation intensity. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 2870–2878
- 114 Shaw T A, Baldwin M, Barnes E A, et al. Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nat Geosci*, 2016, 9: 656–664
- 115 Allan R P, Barlow M, Byrne M P, et al. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Ann New York Acad Sci*, 2020, 1472: 49–75
- 116 Sui C H, Satoh M, Suzuki K. Precipitation efficiency and its role in cloud-radiative feedbacks to climate variability. *J Meteorol Soc Jpn*, 2020, 98: 261–282
- 117 Zhang W, Clark R, Zhou T, et al. 2023: weather and climate extremes hitting the globe with emerging features. *Adv Atmos Sci*, 2024, 41: 1001–

1016

- 118 Harp R D, Horton D E. Observed changes in interannual precipitation variability in the United States. *Geophys Res Lett*, 2023, 50: E2023GL104533
- 119 Ham Y G, Kim J H, Min S K, et al. Anthropogenic fingerprints in daily precipitation revealed by deep learning. *Nature*, 2023, 622: 301–307
- 120 He C, Li T. Does global warming amplify interannual climate variability? *Clim Dyn*, 2019, 52: 2667–2684
- 121 Shepherd T G. Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. *Nat Geosci*, 2014, 7: 703–708
- 122 Dunbar O R A, Garbuno-Inigo A, Schneider T, et al. Calibration and uncertainty quantification of convective parameters in an idealized GCM. *J Adv Model Earth Syst*, 2021, 13: e2020MS002454
- 123 Zhang W, Furtado K, Zhou T, et al. Constraining extreme precipitation projections using past precipitation variability. *Nat Commun*, 2022, 13: 6319
- 124 Prein A F, Langhans W, Fosser G, et al. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. *Rev Geophys*, 2015, 53: 323–361
- 125 Stevens B, Acquistapace C, Hansen A, et al. The added value of large-eddy and storm-resolving models for simulating clouds and precipitation. *J Meteorol Soc Jpn*, 2020, 98: 395–435
- 126 Zou L, Zhou T, Zhao Y. How does regional convection-permitting modeling improve the simulation of the atmospheric water cycle in spring over the Tibetan Plateau? *J Geophys Res Atmos*, 2024, 129: e2024JD040964

Summary for “人类活动对降水变化的影响及其检测归因: 研究进展与展望”

Anthropogenic influences on precipitation changes: research progress and prospects

Wenxia Zhang^{1,2}, Tianjun Zhou^{3,4*}, Xiaolong Chen³ & Jie Jiang³

¹ State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

³ State Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁴ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

Human activities since the pre-industrial era have exerted extensive impacts on precipitation – a fundamental component of the hydrological cycle. This review synthesizes the current scientific understanding of anthropogenic influences on long-term changes in precipitation in multiple aspects, including mean precipitation, seasonal cycle, precipitation spectrum, extreme precipitation, and precipitation variability. For each aspect, the observed change, detection and attribution, and underlying physical mechanisms are assessed.

At the global scale, land mean precipitation has shown an increasing trend in recent decades, especially after the 1980s. Large-scale patterns of mean precipitation change, including the zonal structure and the strengthened contrast between tropical wet and dry regions, can be attributed to anthropogenic influences. In terms of seasonal cycle, precipitation seasonal cycle has enhanced globally since the 1980s, leading to enhanced wet-dry season contrast, which is dominated by large precipitation increases in the wet season. Over northern hemispheric tropical land, the precipitation seasonal cycle has also delayed in phase since the 1980s. The observed enhanced and delayed precipitation seasonal cycle at large spatial scales is primarily attributed to anthropogenic influence, especially greenhouse gas emissions, while aerosol forcing is also important in some regions.

At the daily scale, most land regions have experienced decreases in weak and moderate precipitation while increases in heavy precipitation. The increasing rate of daily extreme precipitation at the global scale since the 1950s corresponds roughly to the Clausius-Clapeyron relation, while hourly extreme precipitation can increase at super Clausius-Clapeyron rates at the regional scale. In addition, precipitation variability has amplified globally over the past century, leading to amplified swings between wet and dry episodes, which is evident over ~75% of land areas with sufficient observations.

Overall, the observed increases in mean precipitation, seasonality, extreme precipitation and precipitation variability at the global scale are consistent with theoretical understanding and model simulations. Many of these observed changes have already emerged from internal variability and can be attributed to anthropogenic greenhouse gas emissions to first order. Physically, the thermodynamic responses to anthropogenic greenhouse gas emissions, i.e., atmospheric warming and moistening, are the main driver of the aforementioned precipitation changes. The thermodynamic response, which is clearly established in theory and well represented by climate models, is also the main basis of confidence in attribution results. It should also be noted that regional precipitation changes are more complicated, where regional external forcings such as time-evolving aerosol emissions and internal decadal variability have played an important role in modulating observed precipitation trends, which can even outweigh the greenhouse gas effect.

Finally, future research priorities are discussed to improve the attribution and understanding of regional precipitation changes. Multiple lines of effort are needed across the “observations—process understanding—modeling” nexus. First is to strengthen the observational network especially over data sparse regions. Second is to better understand the dynamic responses in precipitation, including atmospheric circulation, feedbacks between multi-scale processes, and cloud microphysics, etc. Third is to better understand the effects of regional forcings (e.g., aerosols, land use and land cover change, urbanization) and internal climate variability on precipitation. Fourth is to improve climate model capability in simulating precipitation and related processes, such as kilometer-scale convection permitting modeling.

precipitation, climate change, anthropogenic influence, internal variability, thermodynamic effect, dynamic effect

doi: [10.1360/CSB-2025-5845](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5845)