



全球变化加剧水循环失衡与水资源危机

汤秋鸿^{1,3*}, 陈德亮²

1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

2. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084

3. 中国科学院大学, 北京 100094

* 通讯作者, E-mail: tangqh@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2025-04-07; 收修改稿日期: 2025-07-26; 接受日期: 2025-08-13; 网络版发表日期: 2025-08-19

国家自然科学基金项目(U2243226)、第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0800)和清华大学项目(100008001)资助

1 引言

全球变化正以前所未有的速度重塑全球水系统, 使得水循环变化偏离自然波动范围, 威胁水资源安全。水循环作为连接大气、陆地和海洋的纽带, 其稳定性取决于降水、蒸发、径流与地下水补给的动态平衡。随着全球变化影响加剧, 当前水循环不再在过去人类所熟知并已经较好适应了范围内波动, 而是进入失衡的新常态。水循环失衡不仅造成水资源时空分布改变、极端事件频发及生态服务功能退化, 更引发一系列深远的社会经济连锁反应, 相关影响已从区域性危机升级为全球性挑战。一方面, 极端水文事件直接冲击基础设施与生产活动; 另一方面, 冰冻圈消融和地下水超采引发的水资源危机带来社会经济衍生影响。水循环失衡不仅重塑了自然水文过程, 其引发的水资源和水灾害等问题更是深度嵌入社会经济系统, 加剧了水治理的复杂性。因此, 揭示水循环失衡机理并制定适应性策略, 已成为应对全球水资源危机的迫切需求。

2 全球水循环失衡现象凸显

全球水循环正呈现通量动态与状态结构双重失衡

的特征。从通量维度看, 气候变暖驱动全球水循环加速, 大气湿度和降水强度均整体性增加, 湿润季节更湿、强降水事件更强。大量观测数据表明全球降水格局已经发生了变化, 蒸散发则响应降水和升温变化, 导致全球土壤湿度格局出现变化。全球大部分地区极端降水的频率和强度显著上升, 旱涝急转现象愈发频繁, 自20世纪中叶起, 全球平均亚季节尺度和年际旱涝急转指标分别提升了31%~66%和8%~31%(Swain等, 2025)。极端降水事件的强度和频率增加导致全球暴雨洪水增加, 但与此同时气候变暖导致融雪洪水减少(Zhang等, 2022)。气候变化引起蒸散发异常和降水短缺, 使得次季节尺度上干旱发展速率有所加快, 全球易旱地区正经历由缓旱向骤旱的转变(Yuan等, 2023)。

从状态结构维度看, 全球水循环结构性失衡凸显, 具体表现为陆地和海洋水储量的趋势性变化及陆地水储量各组成部分(积雪、冰川、土壤水、地下水、河流和湖库等)之间的重新分配。2000~2023年, 全球冰川正以每年约2730亿吨的速度消融, 喜马拉雅山脉的冰川退缩速度已达20世纪的2倍, 部分南极冰川和格陵兰冰盖也正逼近不可逆转的临界点。1981年以来北半球春季雪水当量总体呈下降趋势, 人为气候变暖导致北半球3月积雪减少(Gottlieb和Mankin, 2024)。降水增

中文引用格式: 汤秋鸿, 陈德亮. 2025. 全球变化加剧水循环失衡与水资源危机. 中国科学: 地球科学, 55(9): 3209–3212, doi: 10.1360/SSTe-2025-0078

英文引用格式: Tang Q, Chen D. 2025. Global change exacerbates water cycle imbalances and intensifies water resource crises. Science China Earth Sciences, 68(9): 3077–3080, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1661-5>

加和冰雪加速融化推动了局部湖库面积不断扩张, 例如青藏高原湖泊面积在近30年扩张了24%。然而, 北极冻土融化引发了地表沉降和排水通道的形成, 导致过去20年间约3.5万个湖泊因之消失。在过去40年间, 全球主要含水层的地下水水位普遍呈现快速下降态势, 其中30%的含水层地下水水位下降速度不断加快, 在灌溉农业发达的干旱地区这一现象尤为突出(Jasechko等, 2024)。2002~2016年期间, 全球土壤水储量下降了约2623km³。2000~2002年, 全球土壤水储量急剧下降, 减少量约1614km³, 该损失幅度几乎达到同期格陵兰冰盖质量损失的2倍, 相应使得全球海平面额外上升了4.4mm(Seo等, 2025)。

3 全球变化驱动水循环失衡

在气候变化、土地利用/覆盖变化和人类用水活动等多重胁迫下, 全球变化重塑了水循环的能量与物质输移路径, 改变了水循环过程中的通量与状态变量, 导致极端水文事件激增、陆地水储量出现趋势性变化及其各组成部分之间的重新分配(汤秋鸿, 2020)。

温室气体浓度升高加剧大气层顶的辐射强迫, 导致地表温度上升与能量收支重构; 气溶胶变化也将影响降水趋势空间分布的异质性(Jiang等, 2023)。气候变化背景下, 强降水和干旱等极端事件的发生概率与强度同步上升, 旱涝并发与旱涝急转现象增多。气候变暖加速冰冻圈消融, 增加陆地蒸散发和内陆水体蒸发, 导致陆地水储量各组分重新分配。在1985~2018年间, 142万个全球湖库的年均蒸发量为(1500±150)km³, 且以3.12km³ a⁻¹的速率呈上升趋势, 全球湖库水面蒸发量增加主要源于蒸发速率上升与湖冰覆盖面积缩减(Zhao等, 2022)。

土地利用/覆盖变化则通过改变地表水热通量影响水文循环。大规模森林砍伐、农业扩张与城市化不仅直接改变地表径流过程与地下水补给效率, 还通过改变大气水分输送影响下风向降水(Cui等, 2022)。植被-气候跨尺度的反馈过程也对水循环有着重要影响, 包括植被影响变化影响局地降水, 导致哈德莱环流向极地扩张和全球干旱区的扩张(Miralles等, 2025)。城市不透水面的扩张加剧了地表径流的脉冲式释放, 使得洪水峰值流量大幅提升。这些变化虽然在一定程度上增加了水资源总量, 却削弱了水资源的可利用性。

这表明水循环失衡的核心问题并非单纯的水资源量增多或减少, 而在于水资源时空分布发生了显著改变, 以及与之相关的极端事件频率、强度与影响范围均呈现出异于常态的变化。

农业灌溉、生活和工业用水、水库调节、地下水开采等人类用水活动直接改变了陆地水储量和水文循环过程。当前, 全球灌溉面积已超360万km², 年均灌溉取水量约为(2700±540)km³。从地理分布来看, 灌溉农业热点地区包括美国高地平原地区、加利福尼亚中央谷地、印度河-恒河流域和中国北部地区, 与地下水超采地区高度重合(McDermid等, 2023)。因为水资源过度利用, 全球超50%的大中型湖泊正在萎缩; 与此同时, 水库建设推动了局部湖库扩张, 近30年来全球水库水面面积增长了22%。在全球干旱区开展的研究表明, 气候变暖和人类水管理活动是驱动内陆水体长期水储量变化的主导因素, 这些人为因素正导致全球干旱区地表水储量变化与降水的关联减弱, 二者呈现脱钩态势(Zhao等, 2025)。

气候变暖背景下, 水循环变化也可能反馈气候系统进一步加剧水循环失衡。北极海冰快速消融使得北冰洋边缘海域出现更大面积的开放水面, 洋面蒸发增加导致北极水循环加速, 给高纬度地区带来更频繁的极端暴雪(Liu等, 2024)。土壤水-大气反馈对全球可更新水资源有重要影响, 研究发现土壤水对可更新水资源存在负反馈, 陆-气相互作用可以抵消在没有土壤水分反馈情况下干旱地区可更新水资源下降的约60%(Zhou等, 2021)。

4 全球水循环失衡加剧水资源危机

全球水循环失衡的显著特征之一是极端水文事件频发、旱涝急转更加频繁。洪水虽然在短时间内带来大量水资源, 但因来势迅猛难以蓄用, 还会损毁水利设施, 通过污水溢流加剧水体污染, 威胁用水安全。旱季降水减少叠加高温效应, 导致水资源短缺日益严峻。旱涝急转对区域水和粮食安全、人类健康和公共安全及基础设施构成了严峻挑战。相较于单一的干旱或洪涝灾害, 旱涝急转具有两种灾害的特征, 且在短时间内快速交替, 因此破坏力更强(Swain等, 2025)。

全球水循环失衡的另一显著特征表现为水循环通量和储量的动态变化显著偏离自然波动范围, 威胁水

资源的可持续利用. 以中国天山北坡地区为例, 该区域独特的“山地-绿洲-荒漠”系统中, 山地产流对维持绿洲与荒漠区的水分平衡至关重要. 然而, 气候持续变暖致使山地冰川储量加速减少, 绿洲面积扩张导致社会经济用水需求快速攀升. 在气候变化和人类水管理活动双重压力下, 现有山地产流已无法满足日益增长的水分消耗需求, 导致绿洲-荒漠区不得不依靠地下水超采, 因而地下水位下降严重, 河道径流显著减少, 天然湖泊和湿地面积萎缩, 生态服务功能持续退化(Liu等, 2024).

全球水循环失衡不仅对区域水资源与生态安全构成严重威胁, 还有可能引发跨境水资源争端. 以青藏高原地区为例, 该地区水循环失衡直接影响下游东亚和南亚数十亿人口的用水安全, 可能加剧印度和巴基斯坦之间本已存在的水冲突(Yao等, 2022). 地下水超采和海平面上升正加剧沿海地区水资源危机, 海水入侵导致地下水盐碱化和土壤盐渍化, 威胁三角洲地区和岛国的用水安全(Richardson等, 2024). 在极端水文气候事件下, 河流水质通常会恶化. 尽管高流量能够稀释污染物的浓度, 但暴雨和洪水会把污染物大量冲刷带入河道. 在干旱时期, 流量大幅减少, 稀释作用随之降低, 不仅导致水体中溶解氧含量降低, 还会促使藻类、盐度和污染物浓度增加(van Vliet等, 2023). 地表和地下水水质恶化将导致水处理成本升高, 水质污染已成为制约城市水资源安全的关键因素(Sun等, 2025).

5 应对水循环失衡的研究展望

全球水循环失衡问题横跨多个尺度与维度, 给人类社会带来极为复杂的挑战. 为了应对这一挑战, 需要深入全球变化水文学的机理研究、加强水科学技术创新, 通过“同一个水循环”(One Water Cycle)交叉融合研究, 构建适应全球变化的水安全韧性提升体系, 为全球水治理提供系统性解决方案.

全球水循环失衡的复杂性源于地球各圈层间的相互作用与远程耦合效应的相互交织. 尽管水循环研究领域已取得一定进展, 但对于水循环变化过程及其与气候系统、社会经济系统之间反馈机制的认识仍存在诸多空白, 尤其是在精确量化多系统之间耦合作用方面还面临巨大挑战. 下一步亟需针对水循环失衡的驱

动机制及影响机理这一关键科学问题, 深入探讨陆地水循环与气候变化的相互作用机制、人-水系统的远程耦合机制、水循环失衡的社会经济影响与水安全韧性提升协同机理.

技术创新正赋予我们前所未有的全球水循环观测、模拟和预测能力. 以遥感技术、人工智能和大模型、数字孪生技术、物联网技术等为代表的新兴技术为全球水循环失衡研究提供了技术基础. 展望未来, 亟待(1) 推动构建全球水循环通量(降水、蒸发、产流、径流等)和储量(湖库、河流、冰川、积雪、土壤水、地下水等)时空数据库, 丰富水科学大数据; (2) 结合人工智能与数值模拟技术, 构建全球陆地水循环高时空分辨率实时监测系统, 研发水循环失衡风险监测和预报技术, 提升全球水循环失衡现象、社会经济暴露度、预期损失的监测和预报能力; (3) 发展跨境、跨流域、跨区域水资源优化调度和场景推演模型, 评估水循环失衡的社会经济多维影响, 提出流域水安全韧性提升优化路径; (4) 完善陆地水循环过程综合集成模型中人类活动参数化方案, 构建强人类活动地区区域地球系统模式, 建设以水循环为核心纽带的数字孪生地球系统虚拟现实科教融合平台.

社会经济系统是水循环失衡研究的关键维度. 当前全球水循环研究多聚焦于淡水循环的自然过程, 较少深入城市、灌区、供应链等场景探究水在社会经济系统中的迁移和转化机制. 但事实上, 社会经济系统中的人类活动是导致水循环失衡的重要因素, 社会经济系统也是承受水循环失衡后果的主体.

本文拟倡导一种全新的研究范式, 扩展城市水系统研究中将饮用水、废水和雨水视作一个整体的“一水”(One Water)理念的应用范畴. 本文认为, 自然水循环与社会水循环共同构成了全球水系统不可分割的组成部分, 应当在全球“同一个水循环”的框架内开展多学科交叉融合研究, 从整个水循环的视角对全球水系统开展研究和管理, 联动全球、区域、流域和城市等多尺度水循环管理, 以最大限度地避免水循环失衡、提升水安全韧性, 并最大限度地促进水资源可持续利用和经济社会的可持续发展.

最终, 这需要协作、综合、包容和整体的治理战略, 助力全球水循环恢复至平衡、健康和可持续的状态. 这样做将加强全球水治理, 为应对不断升级的全球水资源危机提供新思路与新方法.

致谢 感谢唐寅、冷国勇、孙思奥、赵昱、刘星才、徐锡蒙等在文字编辑方面提供的支持, 以及在讨论过程中所作出的富有建设性贡献。

参考文献

- 汤秋鸿. 2020. 全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化. 中国科学: 地球科学, 50: 436–438
- Cui J, Lian X, Huntingford C, Gimeno L, Wang T, Ding J, He M, Xu H, Chen A, Gentile P, Piao S. 2022. Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport. *Nat Geosci*, 15: 982–988
- Gottlieb A R, Mankin J S. 2024. Evidence of human influence on Northern Hemisphere snow loss. *Nature*, 625: 293–300
- Jasechko S, Seybold H, Perrone D, Fan Y, Shamsudduha M, Taylor R G, Fallatah O, Kirchner J W. 2024. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625: 715–721
- Jiang J, Zhou T, Qian Y, Li C, Song F, Li H, Chen X, Zhang W, Chen Z. 2023. Precipitation regime changes in High Mountain Asia driven by cleaner air. *Nature*, 623: 544–549
- Liu X, Tang Q, Zhao Y, Wang P. 2024. Persistent water scarcity due to high irrigation demand in arid China: A case study in the north slope of the Tianshan Mountains. *Earths Future*, 12: e2024EF005070
- Liu Y, Tang Q, Zhang C, Chen D, Francis J A, Leung L R, Chen H W. 2024. The disproportionate impact of enhanced evaporation from melting arctic sea ice on cold-season land precipitation trends. *npj Clim Atmos Sci*, 7: 126
- McDermid S, Nocco M, Lawston-Parker P, Keune J, Pokhrel Y, Jain M, Jägermeyr J, Brocca L, Massari C, Jones A D, Vahmani P, Thiery W, Yao Y, Bell A, Chen L, Dorigo W, Hanasaki N, Jasechko S, Lo M H, Mahmood R, Mishra V, Mueller N D, Niyogi D, Rabin S S, Sloat L, Wada Y, Zappa L, Chen F, Cook B I, Kim H, Lombardozzi D, Polcher J, Ryu D, Santanello J, Satoh Y, Seneviratne S, Singh D, Yokohata T. 2023. Irrigation in the Earth system. *Nat Rev Earth Environ*, 4: 435–453
- Miralles D G, Vilà-Guerau de Arellano J, McVicar T R, Mahecha M D. 2025. Vegetation-climate feedbacks across scales. *Ann New York Acad Sci*, 1544: 27–41
- Richardson C M, Davis K L, Ruiz-González C, Guimond J A, Michael H A, Paldor A, Moosdorf N, Paytan A. 2024. The impacts of climate change on coastal groundwater. *Nat Rev Earth Environ*, 5: 100–119
- Seo K W, Ryu D, Jeon T, Youm K, Kim J S, Oh E H, Chen J, Famiglietti J S, Wilson C R. 2025. Abrupt sea level rise and Earth's gradual pole shift reveal permanent hydrological regime changes in the 21st century. *Science*, 387: 1408–1413
- Sun S, Liu H, Konar M, Fu G, Fang C, Huang Z, Li G, Qi W, Tang Q. 2025. Urban groundwater supplies facing dual pressures of depletion and contamination in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 122: e2412338122
- Swain D L, Prein A F, Abatzoglou J T, Albano C M, Brunner M, Diffenbaugh N S, Singh D, Skinner C B, Touma D. 2025. Hydroclimate volatility on a warming Earth. *Nat Rev Earth Environ*, 6: 35–50
- van Vliet M T H, Thorslund J, Stokol M, Hofstra N, Flörke M, Ehalt Macedo H, Nkwasa A, Tang T, Kaushal S S, Kumar R, van Griensven A, Bouwman L, Mosley L M. 2023. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nat Rev Earth Environ*, 4: 687–702
- Yao T, Bolch T, Chen D, Gao J, Immerzeel W, Piao S, Su F, Thompson L, Wada Y, Wang L, Wang T, Wu G, Xu B, Yang W, Zhang G, Zhao P. 2022. The imbalance of the Asian water tower. *Nat Rev Earth Environ*, 3: 618–632
- Yuan X, Wang Y, Ji P, Wu P, Sheffield J, Otkin J A. 2023. A global transition to flash droughts under climate change. *Science*, 380: 187–191
- Zhang S, Zhou L, Zhang L, Yang Y, Wei Z, Zhou S, Yang D, Yang X, Wu X, Zhang Y, Li X, Dai Y. 2022. Reconciling disagreement on global river flood changes in a warming climate. *Nat Clim Chang*, 12: 1160–1167
- Zhao G, Gao H, Li Y, Tang Q, Woolway R I, Merder J, Rosa L, Michalak A M. 2025. Decoupling of surface water storage from precipitation in global drylands due to anthropogenic activity. *Nat Water*, 3: 80–88
- Zhao G, Li Y, Zhou L, Gao H. 2022. Evaporative water loss of 1.42 million global lakes. *Nat Commun*, 13: 3686
- Zhou S, Williams A P, Lintner B R, Berg A M, Zhang Y, Keenan T F, Cook B I, Hagemann S, Seneviratne S I, Gentile P. 2021. Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. *Nat Clim Chang*, 11: 38–44

(责任编辑: 李小雁)