



中国长江流域干旱: 从山到海的连锁影响

贾楠^{1,3}, 程杰², 李因帅³, 郑利林³, 宋雯³, 陈睿山^{3*}, Annah ZHU⁴

1. Center for Systems Integration and Sustainability, Part of College of Agriculture and Natural Resources, Michigan State University, MI 48824, USA

2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241

3. 上海交通大学设计学院, 上海 200240

4. Wageningen University, Wageningen 6706KN, Netherlands

* 通讯作者, E-mail: rschen@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2024-04-15; 收修改稿日期: 2025-01-03; 接受日期: 2025-02-06; 网络版发表日期: 2025-02-13

国家自然科学基金项目(42271127)和上海市“科技创新行动计划”自然科学基金项目(24ZR1440400)资助

1 引言

2022年, 由于创纪录的热浪和降水量偏低, 长江流域经历了自1961年以来最严重的干旱(Lyu等, 2023). 与此同时, 该地区还发生了全球范围内最严重的热浪. 当年8月的平均气温比历年同期高出1.2℃, 这加剧了蒸发作用, 减少了地表水量, 使土壤和植被干涸, 并最终导致比较冷气候条件下更为复合且持久的干旱. 自20世纪90年代末以来, 热浪和干旱的复合事件的发生频率显著增加, 2022年的长江流域干旱成为此类极端事件的典型案例(Yu和Zhai, 2020). 像长江这样的大面积流域区域内的空间复合干旱, 对可用水资源施加了更大的压力, 并从上游山区到下游河口产生了连锁影响. 这些复合极端事件风险的加速趋势, 对理解并为其对整个流域内相互关联的社会-生态系统的影响做好准备具有重要意义(Singh等, 2021).

长江全长超过6,300km, 是世界第三长河流, 也是中国最长的河流. 长江发源于青藏高原, 穿越群山, 最终注入东海. 其流域覆盖了中国大陆约五分之一的土地面积, 并养育了全国近三分之一的人口. 作为全球

人口最稠密且工业经济规模最大的经济带, 长江流域系统受到的冲击会引发广泛的社会生态连锁反应. 2022年长江流域特大干旱事件即印证了这种山地-河流-河口-海洋系统的级联效应. 应对此类系统性风险, 亟需构建基于生态安全格局的适应性治理框架, 通过韧性基础设施建设与气候风险分区分管, 实现社会-生态系统的协同演进. 然而, 现行的解决方案更多侧重于短期, 这难以有效应对气候灾难时代持续性的极端气候问题.

鉴于干旱的严重性, 其带来的影响必须得到系统性的理解. 这些负面后果通常伴随着复杂的社会生态过程, 具有一定的时间滞后性. 为了更好地理解干旱的短期和长期影响, 并制定长期解决方案, 我们收集并分析了过去几十年间长江流域的历史径流数据、时空气候变量、野火事件及社会经济数据. 研究发现, 2022年6月至9月期间长江流域的气温为过去二十年来的最高值, 而这种极端高温叠加了降水不足, 导致径流量骤降以及下游水位达到历史低点. 基于此, 我们认为, 应制定全流域范围内的前瞻性解决方案规划, 将干旱视为一种跨部门的问题, 而非一种特殊或单一维度的现象.

中文引用格式: 贾楠, 程杰, 李因帅, 郑利林, 宋雯, 陈睿山, Zhu A. 2025. 中国长江流域干旱: 从山到海的连锁影响. 中国科学: 地球科学, 55(3): 985–990, doi: 10.1360/N072024-0121

英文引用格式: Jia N, Cheng J, Li Y, Zheng L, Song W, Chen R, Zhu A. 2025. China's Yangtze River drought: A cascade of impacts from mountains to sea. Science China Earth Sciences, 68(3): 957–962, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1521-3>

2 气候变化促使干旱频发

气候变化将导致世界许多地区干旱的强度和频率增加。例如, 由于气候变化, 北半球表层土壤湿度干旱的发生可能性已提高至少5倍(Lyu等, 2023)。同样, 气候变化使北半球在2022年发生干旱的可能性增加了20倍, 并且预计这种干旱的频率、空间范围和严重程度将在21世纪持续上升(Yu和Zhai, 2020)。最近的研究进一步表明, 人为气候变化与陆地耦合作用协同加剧了2022年长江流域干旱的风险(袁星等, 2024)。这些研究结果强调了人为气候因素与自然过程之间复杂的相互作用, 这种相互作用共同加剧了干旱条件, 使其超出自然气候变率下的预期范围(Jia等, 2024)。

2022年的长江流域干旱并非孤立事件。近年来, 此类复合型极端天气事件频繁发生(Ault, 2020)。全球范围内, 南美洲(2010~2015年)、澳大利亚(2001~2009年)、美国西部(2012~2017年)以及最近的中国都经历了特大干旱, 这些干旱对社会生态系统造成了巨大的影响。根据IPCC报告, 这些干旱随着全球变暖的持续而通过协同效应不断增加, 并将继续加剧(IPCC, 2021)。历史记录分析表明, 与中世纪气候异常(MCA)和小冰期(LIA)相比, 现代全球变暖背景下严重干旱发生的频率更高(Qin等, 2020)。根据1901~2020年的气象和水文数据分析, 在过去120年中, 长江上游流域的干旱变得更加频繁且持续时间更长(Ault, 2020)。基于未来两种排放情景(RCP4.5和RCP8.5, 均使用耦合模型比较计划第五阶段(CMIP5)的10个模型集合)的预测, 该区域的干旱强度预计在2021~2100年期间将进一步增加(Singh等, 2021)。

除了长江流域之外, 全球变暖还将导致世界许多地区热浪和干旱事件的发生频率显著增加(Bevacqua等, 2022)。大规模流域干旱将引发系统性和连锁性的影响。通过长期监测与模拟, 利用干旱数据来对干旱风险区域进行早期预警, 将有助于改进干旱风险管理以及灾后救援工作。更为重要的是, 在流域内开发缓冲区, 在降水量高的时期储存水资源, 在干旱时期缓解水资源压力, 从而调节局部小气候。

3 长江流域干旱的影响

2022年的长江流域干旱是一个极端气候事件, 对生态、社会经济和基础设施产生了显著影响, 突显了

相互关联系统在极端天气事件面前日益增加的脆弱性(图1和图2)。此次干旱伴随着创纪录的热浪和前所未有的低降水量, 加剧了原本存在的环境压力, 在整个流域内引发了一系列连锁影响(图1)。

上游山区通常对干旱具有更强的韧性, 但此次严重干旱条件也未能幸免。该地区经历了前所未有的野火数量, 这些野火由极端高温和持续干旱条件驱动, 而这些条件又受到人为气候变化和异常大气环流模式的显著放大(Wang等, 2024)。如图1a(i)所示, 这些野火摧毁了大面积的森林, 对当地的生物多样性构成了如图1a(ii)所示的严重威胁, 其破坏可能对生态系统稳定性产生长期影响。极端高温和植被的损失还加剧了土壤侵蚀, 进一步破坏了区域景观的稳定性, 并提高了未来环境退化的风险(Huang等, 2024)。

在中游地区, 生态影响同样十分严重。关键湖泊如鄱阳湖和洞庭湖的水位急剧下降(图1b), 导致显著的栖息地丧失和大规模鱼类死亡。这些湖泊的面积缩减超过75%, 严重扰乱了关键湿地生态系统, 并导致生物多样性下降。最近的研究表明, 这种情况可能使这些生态系统超越临界点, 从而引发区域水文和生态的不可逆变化(Liao等, 2024)。除了生物多样性的损失, 河流环境的自净能力也受到严重影响。水位下降削弱了河流稀释和分解污染物的能力, 加剧了水质问题。这种自净能力的下降, 加上腐败生物质的积累, 进一步恶化了水生生态系统的整体健康状况。减少的河流流量还阻碍了污染物的自然清除, 这对长江流域的水安全和淡水生态系统的完整性构成了长期风险(Song等, 2022)。

此次干旱还对社会经济产生了深远的影响, 尤其是在能源生产和粮食安全方面。由于河流流量降至历史最低水平(图1a(iii)), 对区域能源供应至关重要的水力发电受到严重限制。这一水电产量的减少导致了广泛的电力短缺, 不仅扰乱了工业活动, 还加剧了供应链的挑战, 尤其是在汽车制造和电子产品等关键行业(Wang等, 2024)。这些影响突显了建立更加多样化且具有韧性的能源基础设施的紧迫性, 以应对极端气候事件的冲击。

农业生产因对稳定的水资源供应高度依赖, 在此次干旱中受到显著影响。极端气候条件导致粮食产量减少超过200亿公斤, 引发了对地方及全国粮食安全的严重担忧(图1a(v))。正如最近的预测所指出的那样,

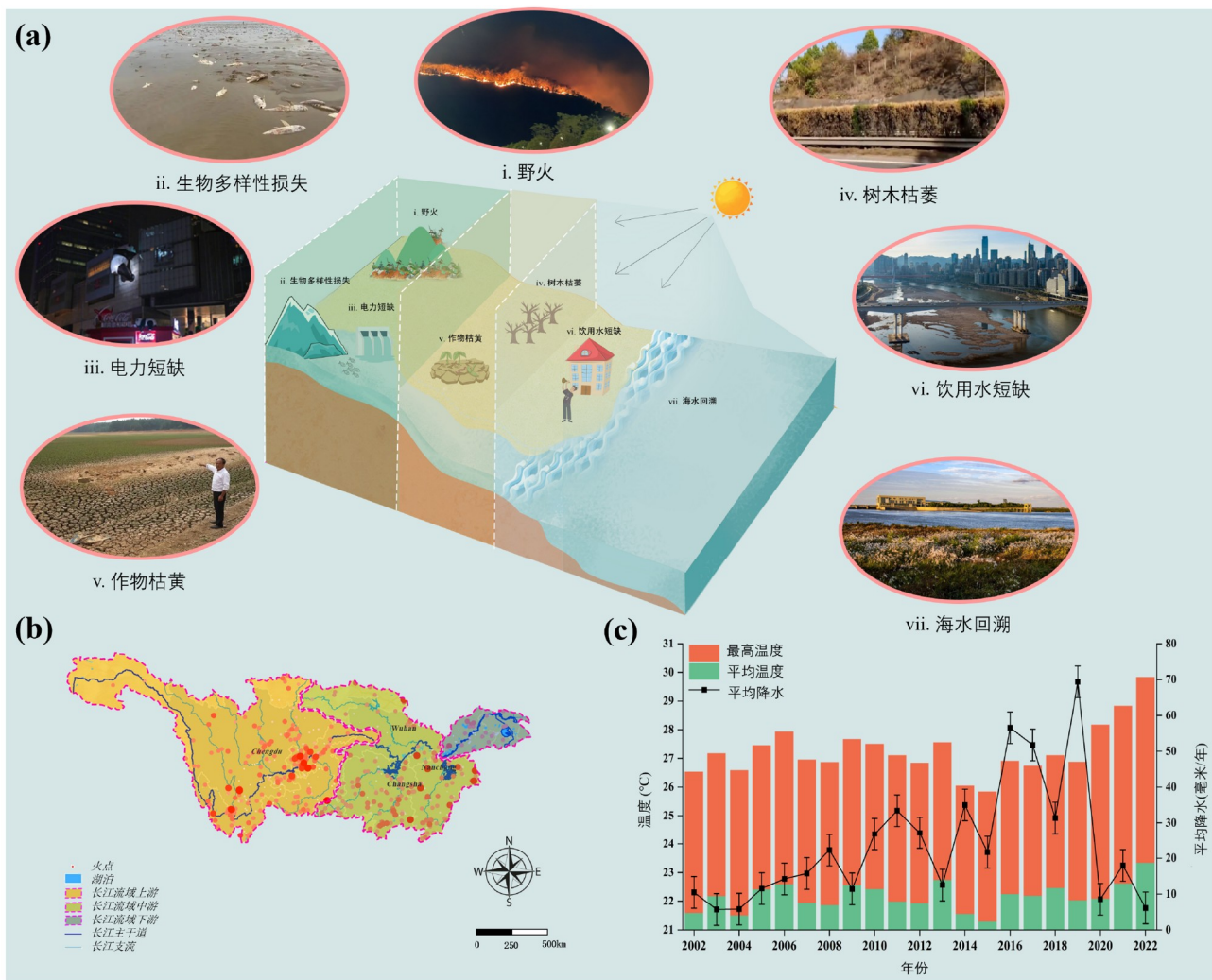


图 1 从长江流域上游到下游的干旱状况及其影响

(a) 2022年干旱的影响包括: 上游地区的野火(i)和水力发电量的显著减少(iii); 中游地区的生物多样性损失(ii)、树木枯萎(iv)以及作物枯黄(v); 下游地区的饮用水短缺(vi)和海水回潮(vii)(Wang等, 2024). (b) 长江流域及野火分布位置(数据来源于FIRMS, <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>). 我们使用从较小的粉红色点到较大的红色点的梯度变化来表示野火强度的变化(较大的红色表示强度较高, 较小的粉红色表示强度较低). (c) 2002年至2022年, 长江流域的最高气温、平均气温和平均降水量的变化情况. 数据来源于长江流域各省市代表站点逐日数据的加权平均值(<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/>)

极端高温和水资源短缺对作物产量的复合影响, 进一步凸显了农业在气候变化引发的极端事件面前日益增加的脆弱性(Huang等, 2024). 这一情况迫切需要采用更加具有韧性的农业实践和技术, 以减轻未来干旱的影响. 图1c展示了过去二十年间长江流域温度和降水的变化情况. 值得注意的是, 2020年至2022年期间, 温度呈现显著上升趋势, 降水则显著减少. 然而, 仍需将这一时期置于更广泛的区域气候变率背景下进行综合分析解读. 例如, 在2014年也经历了类似的极端气候

事件, 高于平均水平的气温和偏少的降水量共同导致了长江流域范围内发生了严重干旱. 同样, 2018年和2019年也记录了温度的升高和降水量的下降, 但其极端程度未达到2020~2022年所观察到的干旱水平.

这些变化突显了自然气候变率与长期气候变化趋势之间复杂的相互作用. 尽管短期波动显而易见, 但总体趋势表明, 极端天气事件的发生频率和强度正在增加, 包括干旱和洪涝. 这一趋势与更广泛的气候变化预测相一致, 表明长江流域可能正在经历向更为严重

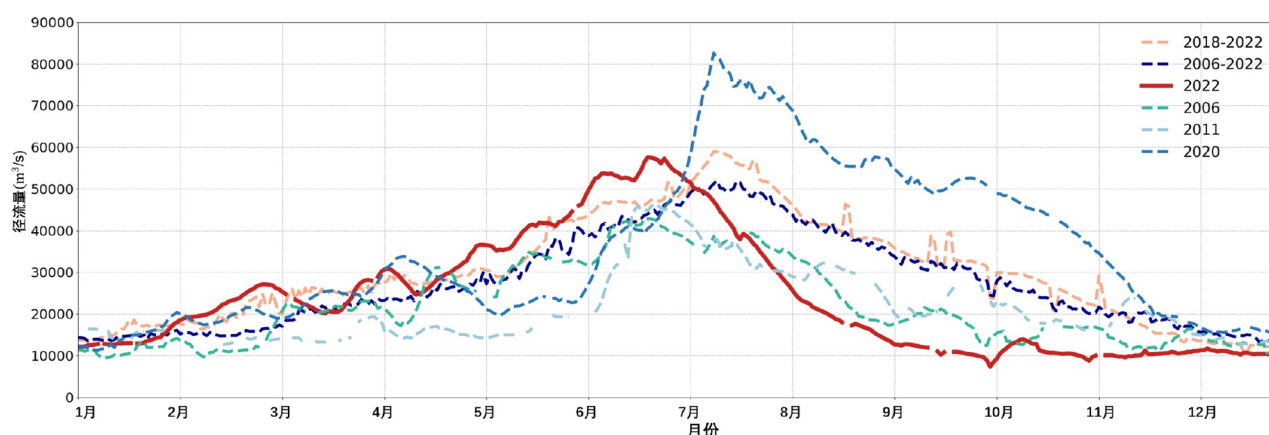


图2 长江流域按月和年度划分的径流量

红线表示2022年的径流量, 其在8月后表现出低流量, 影响了水力发电以及其他相关领域。深蓝色虚线和橙色虚线分别表示2006~2022年和2019~2023年的平均径流量(数据来源: <http://113.57.190.228:8001/web/Report/RiverReport>)

和频繁的气候极端事件的转变。因此, 尽管2022年的干旱是一个显著事件, 但它只是近年来气候不稳定性日益加剧的一部分表现。

2022年长江流域干旱的特殊之处在于多种气候驱动因素的协同作用共同放大了其严重性。极端高温与持续干旱条件的相互作用, 在人为气候变化的加剧下, 导致了远比以往干旱事件更为严峻的局面。异常的大气环流, 特别是西北太平洋副热带高压(WPSH)的西伸, 对该地区极端高温的持续起到了关键作用, 进一步加剧了干旱(图1c)。这种因素的叠加还引发了一系列重大挑战, 例如下游河口的咸潮入侵(图1a(vi), 1a(vii)), 进一步加大了确保城市人口淡水供应的难度, 尤其是在像上海这样的沿海城市。

2022年是中国自气象记录(1956~2022)以来最严重的长期干旱和最炎热的年份, 在长江流域及其周边地区(包括重庆、四川、贵州和江西等地)引发了大规模的野火。特别是在重庆, 共发生了30起野火, 影响面积达204.8公顷, 并威胁到附近缙云山国家级自然保护区的生物多样性(Cui等, 2024)。野火向大气中释放了额外的碳排放, 并对当地的陆地生态系统造成了短期影响。

广泛的干旱还阻碍了社会经济的发展。干旱在许多地区引发了饮用水危机, 而长江流域灌溉用水的短缺导致粮食产量减少超过200亿公斤, 威胁到粮食安全(国家统计局, 2022)。长江的低流量在9月初引发了河口咸潮入侵, 污染了饮用水源, 这对上海2500万居

民的饮用水安全提出了额外挑战(Zhu和Ling, 2024)。

作为中国最重要的水电来源, 长江流域的水资源短缺引发了电力短缺, 导致工业受到冲击, 并扰乱了相关基础设施项目的进程。上游的四川省拥有超过3,887座水电大坝, 年装机容量达9,000万千瓦, 占全国水电总容量的30%(Zhang和Gu, 2023)。2022年的干旱显著减少了该地区的水电发电量, 由于严重的干旱和热浪条件, 发电量下降至不足800亿千瓦时。然而, 需要注意的是, 这一发电量的减少应放在当年特定气候条件的背景下加以理解, 而不是被视为长期下降趋势的指示。

尽管此次事件突显了水力发电对极端天气的脆弱性, 但也表明在气候变率日益增加的背景下, 迫切需要制定适应性策略以维持能源安全。此外, 长江水位过低阻碍了这些产品通过成本更低的船舶运输, 从而对全球供应链产生了外部影响。更为严重的是, 干旱的加剧将威胁到中国近年来实施的许多重大基础设施项目, 如“西电东送工程”“南水北调工程”和“东数西算工程”。在消费端, 热浪增加了居民和工厂对电力的需求, 导致全国的电力、水资源和互联网基础设施均受到影响。

总而言之, 长江流域的干旱带来了广泛的生态和社会经济影响(如图1所示)。受影响的地域范围从高山生态系统延伸至沿海城市中心。上游山区受到广泛的野火和河流流量不足的影响, 导致水力发电量显著降低。与此同时, 中游地区的湖泊(如鄱阳湖和洞庭湖)干

涸,造成大规模鱼类死亡和农作物减产.最后,下游沿海城市(如上海)则面临咸潮入侵和淡水短缺的挑战.除这些对流域内的直接影响外,干旱还具有更长期的间接影响,例如威胁全球供应链的韧性,以及对生物多样性造成的长期生态效应.

4 增强韧性以应对干旱风险

2022年的长江流域干旱不仅仅是一次孤立的气候事件,更是气候变化所带来更广泛挑战的预兆.最新的气候模型表明,由于气候变化与陆气相互作用的协同效应,像长江这样的大型流域将面临更加频繁和严重的干旱趋势(Wang等, 2024; 袁星等, 2024).这表明,这类干旱可能反映了气候模式的更广泛转变,而非孤立事件,从而需要持续的监测与适应性管理策略.近期研究进一步指出,如果全球温室气体排放得不到有效控制,此类规模的事件可能会成为常态(Wang等, 2024).这凸显了迫切需要制定全面的适应策略,不仅应对此类事件的直接影响,还要充分考虑其对区域和全球系统的长期后果.

像长江这样的大型流域干旱的影响是多方面的,突显了其对生物多样性、农业、能源和工业的关键后果.与分散区域发生的干旱和热浪相比,大型流域的热浪和干旱更为严重,并且在不同的时空尺度上产生作用.上游地区同时发生的热浪和干旱将通过温度与水流量的相互作用放大对下游的影响,产生协同效应,这进一步表明需要一种长期的、多尺度的应对策略.然而,大多数现有的应对措施是短期且被动的,例如区域间的水资源调配、暂时性工厂运行调控(如限电)、水库蓄水释放以及有时通过人工增雨来缓解干旱.相比之下,需要对整个流域采取系统且全面的方法,以应对极端事件及其协同效应.这要求制定更完善的长期应对策略,其中基于自然的解决方案、可再生能源以及升级的水利基础设施可以提供多样化的缓解方案.

基于自然的解决方案在这一领域代表了新的前沿方向,但其可能的多功能性需要被量化,以优化其对人类福祉的潜在益处.例如,可以优化现有的天然和人工湿地用于中游地区的水资源调节,而不是建设新的大型水利基础设施(Tang等, 2020).同时,现有的集水设施(如水坝)也可以被用于安装绿色基础设施(如绿色屋

顶)和可持续能源设施(如太阳能),以缓解干旱的多种影响(如电力短缺、生物多样性损害等),而无需建设全新的基础设施.部署此类基于自然的解决方案可以显著减轻干旱的影响,但这需要加强规划、实施和评估工作,以实现综合的长期干旱管理和分析.此外,还需要在整个流域范围内进行决策和信息共享.因此,协调和长期的治理对于在流域尺度上实施基于自然的解决方案至关重要.

除了基于自然的解决方案外,整合先进的技术措施对于增强干旱韧性同样至关重要.例如,在水资源短缺时期实施抽水蓄能发电,可以优化水资源利用的同时确保能源安全.此外,通过在整个长江流域内分布式调度水库径流,重点关注有效的防洪措施和水资源利用的最大化,为应对洪涝与干旱的双重挑战提供了一种动态管理方法.像这些技术措施及其他技术可以与基于自然的解决方案相结合,以减轻生态和生物多样性受到的影响(Xia等, 2021).

增强干旱风险韧性的另一个关键组成部分是改进早期预警系统.提升次季节到季节尺度的气候预测能力至关重要,因为这可以更准确地预测干旱状况,从而实现及时有效的应对措施.最近的研究(如Wang等, 2024)强调了改进气候模型以提高干旱预测精度的重要性.将准确的气候预测整合到水资源管理、农业规划和应急准备中,可以显著减轻干旱的负面影响,为可持续水资源管理提供了多层面、长期性的解决方案.

总之,干旱关乎数亿人的生命与生计.随着人类活动范围的逐渐扩大和排放的增加,气候变化与人类福祉之间的联系变得日益紧密.因此,开发有效的方法和工具来评估并识别可持续的解决方案,以缓解干旱相关的风险和问题至关重要.综合水资源管理、加强生态修复工作以及可持续能源解决方案的采用,将是增强未来应对极端气候事件韧性的关键.这些措施对于减轻未来极端天气事件的影响,并确保长江流域及全球类似地区的长期可持续性具有重要意义.

参考文献

- 国家统计局. 2022. 中国统计年鉴2022. 北京: 中国统计出版社
- 袁星, 王钰淼, 周诗琦, 李华, 李晨远. 2024. 气候变化下2022年长江特大骤旱的多尺度成因分析. 中国科学: 地球科学, 54: 2690–2702

- Ault T R. 2020. On the essentials of drought in a changing climate. *Science*, 368: 256–260
- Bevacqua E, Zappa G, Lehner F, Zscheischler J. 2022. Precipitation trends determine future occurrences of compound hot–dry events. *Nat Clim Chang*, 12: 350–355
- Cui L, Zhong L, Meng J, An J, Zhang C, Li Y. 2024. Spatiotemporal evolution features of the 2022 compound hot and drought event over the Yangtze River Basin. *Remote Sens*, 16: 1367
- Huang Z, Tan X, Liu B. 2024. Relative contributions of large-scale atmospheric circulation dynamics and anthropogenic warming to the unprecedented 2022 Yangtze River Basin heatwave. *J Geophys Res Atmos*, 129: e2023JD039330
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In: Canadell J G, Monteiro P M S, Costa M H, Cotrim da Cunha L, Cox P M, Eliseev A V, Henson S, Ishii M, Jaccard S, Koven C, Lohila A, Patra P K, Piao S, Rogelj J, Syampungani S, Zaehle S, Zickfeld K, eds. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. Cambridge: Cambridge University Press
- Jia N, Li Y, Cheng J, Jiang Z, Ma T, Zheng L, Xia Z, Wang R, Zhang Z, Yin C, Chen R, Liu J. 2024. Polycrisis: A Framework for Understanding Multiple Crises in the Metacoupled World [Preprint]. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5003139>
- Liao Z, An N, Chen Y, Zhai P. 2024. On the possibility of the 2022-like spatio-temporally compounding event across the Yangtze River Valley. *Environ Res Lett*, 19: 014063
- Lyu Z Z, Gao H, Gao R, Ding T. 2023. Extreme characteristics and causes of the drought event in the whole Yangtze River Basin in the midsummer of 2022. *Adv Clim Change Res*, 14: 642–650
- Qin J, Shi A, Ren G, Chen Z, Yang Y, Zou X, Zhang P. 2020. Severe historical droughts carved on rock in the Yangtze. *Bull Am Meteorol Soc*, 101: E905–E916
- Singh J, Ashfaq M, Skinner C B, Anderson W B, Singh D. 2021. Amplified risk of spatially compounding droughts during co-occurrences of modes of natural ocean variability. *npj Clim Atmos Sci*, 4: 7
- Song N, Wu D, Xu H, Jiang H. 2022. Integrated evaluation of the reactive oxygen species (ROS) production characteristics in one large lake under alternating flood and drought conditions. *Water Res*, 225: 119136
- Tang Y, Leon A S, Kavvas M L. 2020. Impact of dynamic storage management of wetlands and shallow ponds on watershed-scale flood control. *Water Resour Manage*, 34: 1305–1318
- Wang D, Sun Y, Hu T, Yin H. 2024. The 2022 record-breaking heat event over the middle and lower reaches of the Yangtze River: The role of anthropogenic forcing and atmospheric circulation. *Bull Am Meteorol Soc*, 105: E200–E205
- Xia J, Li Z, Zeng S, Zou L, She D, Cheng D. 2021. Perspectives on eco-water security and sustainable development in the Yangtze River Basin. *Geosci Lett*, 8: 18
- Yu R, Zhai P. 2020. Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated eastern China. *Weather Clim Extremes*, 30: 100295
- Zhang A T, Gu V X. 2023. Global Dam Tracker: A database of more than 35,000 dams with location, catchment, and attribute information. *Sci Data*, 10: 111
- Zhu Y, Ling G H T. 2024. Spatio-temporal changes and driving forces analysis of urban open spaces in Shanghai between 1980 and 2020: An integrated geospatial approach. *Remote Sens*, 16: 1184

(责任编辑: 杨守业)