《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

观 点

气候变化加剧了湖泊生态系统的突变风险

王荣[1,2,3]，张恩楼[1,2*]

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 211135
2. 中国科学院大学，南京 211135
3. 抚仙湖高原深水湖泊云南省野外科学观测研究站，玉溪 652500
* 通讯作者，E-mail：elzhang@niglas.ac.cn

2025-10-16收稿，2025-12-21修回，2026-01-14接受，2026-02-06网络版发表
国家自然科学基金项目(42025707、42171163)资助

湖泊生态系统被视为区域气候和环境变化的“哨兵”(Loewen，2023)。过去数十年间，学界已充分揭示气候变化如何通过升温、极端气候事件等途径，广泛影响湖泊水质、生物多样性及生态功能(Woolway等，2020；Jane等，2021)。随着观测记录的持续积累和理论模型的深入研究，一个更为严峻的现实逐渐清晰：长期的气候变化(如气温升高和降水减少)叠加短期的极端气候事件(如热浪、极端干旱和特大暴雨)，显著增加了湖泊生态系统发生突变的概率(Woolway等，2020，2025；Calamita等，2024)。这种突变并非线性的缓慢变化，而是系统在跨越某个临界点后，其状态、结构和功能在相对短的时间内发生根本性的质变，往往具有滞后性和不可逆性(Scheffer等，2012)。因此，认识并防范这类突变风险，已成为地球科学，特别是湖泊科学与全球变化科学领域面临的最紧迫的挑战之一。

气候变化之所以能够驱动湖泊响应从渐变转为突变，关键在于生态系统内部多要素交互作用形成的反馈机制，促使系统状态对气候要素变化呈现非线性的响应特征(Scheffer等，2012)。图1A展示了湖泊流域各圈层中受气候变化影响的关键要素，其中多个要素构成的正反馈过程在气候变化驱动下可能不断自我强化，最终导致生态系统从渐进式变化转为突变。例如，持续升温降低水体溶氧浓度(Jane等，2021)，进而促进沉积物中磷的再释放，使得水体中磷浓度发生突变(图1B)。这表明，即使外源污染得到有效控制，长期气候变化也可能削弱湖泊生态系统的弹性，诱发临界转换。此外，在生态系统弹性持续减弱的背景下，如寒冷天气或热浪等极端气候事件的出现可能使突变点提前，降低生态系统发生稳态转换的临界阈值(图1C)。

当前研究表明，气候要素的持续变化已显著改变了许多湖泊的生态系统结构，使其突变风险升高。气候变化可引发鱼类和浮游动植物群落的显著变化，改变浅水湖泊的食物网结构，导致湖泊面临突变风险。例如，在丹麦菲尔斯湖，气候变化引发长期高温干旱与暴雨极端天气，大量易分解有机碳汇入湖泊致全湖缺氧、鱼类大规模死亡，鱼类群落重组，湖泊生态群落失衡、稳定性降低(Kragh等，2020)。在全球尺度上，持续的气候变化正快速改变湖泊的溶氧状态、水文节律以及分层结构(Jane等，2021)，预计气候变暖将导致中纬度湖泊的冰封期显著缩短，甚至出现湖面冬季无冰的现象，彻底改变冬季的光照条件、物质循环和湖水混合模式，对浮游生物群落结构和生态系统的季节性变化产生一系列连锁反应，其深远影响尚难以完全预测。这些关键要素的改变均可能加强湖泊内部的正反馈过程，推动湖泊系统由渐变转为突变(图1)。不仅如此，以持续变暖、降水模式改变及极端事件频发为特征的气候变化，会使湖泊生态系统发生突变的时间显著提前(Willcock等，2023；Woolway等，2025)。在抚仙湖，长期的外源输入使得沉积物中储存了大量的磷，长期气候变化和富营养化共同导致沉积物中营养盐的释放持续增多，2018年冬季的一次极端寒冷事件促使深水区大量营养盐被释放至上层水体，极大缓解了表层水体的磷限制，最终导致春季的蓝藻(水华束丝藻)暴发(Zhu等，2024)。在太湖，厄尔尼诺事件耦合北大西洋年代际振荡和太平洋十年涛动造成的强降水和暖冬，导致了2017年浮游藻类的暴发，增强了“营养盐累积-水华暴发-内源释放-富营养化加剧”这一正反馈过程，使得太湖持续维持在水华暴发状态(Qin等，2021)。持续气候变化下不断增强的正反馈过程犹如不断收紧的“弹簧”，使湖泊系统逐渐逼近临界阈值，而极端事件则可能成为“压垮骆驼的最后一根稻草”，最终触发突变。

湖泊生态系统稳态转换会产生十分严重的后果。首先，生态系统突变后，修复极其困难，且存在滞后效应(Scheffer等，2012)，而气候变化可能进一步加剧这种滞后效应。全球湖泊依然面临富营养化引发的湖泊藻类异常增殖、水质恶化以及生物多样性下降等主要环境问题，而湖泊流域中的人类活动是造成这些环境问题的主因。中国在内的许多国家过去几十年持续加强的流域管理和削减的污染输入，旨在实现水质改善，但模型模拟及实际观测资料均表明气候变化会显著延缓修复目标的实

中文引用格式：王荣, 张恩楼. 2026. 气候变化加剧了湖泊生态系统的突变风险. 中国科学: 地球科学, 56(3): 1197–1199, doi: 10.1360/SSTe-2025-0356
英文引用格式：Wang R, Zhang E. 2026. Climate change increases the risk of regime shifts in lake ecosystems. Science China Earth Sciences, 69(3): 1161–1163, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1838-0

© 2026《中国科学》杂志社

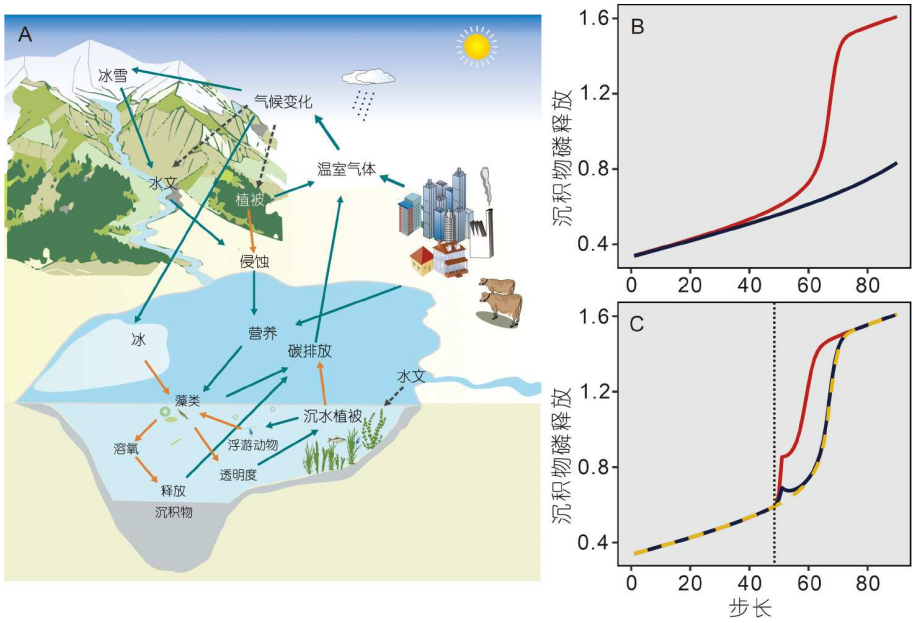

图 1　湖泊流域系统互馈过程示意图及气候变化影响下湖泊生态系统的渐变-突变临界风险模拟。(A) 湖泊流域系统关键要素构成的反馈过程，气候变化不仅是这些反馈过程的主要驱动力，也参与系统反馈过程。(B)和(C)为考虑了沉积物中营养盐的释放模型，该简单模型为无量纲模型。其中，(B)和(C)分别为模拟持续气候变化和极端气候变化的影响。模型的公式为$dP=\left[a-sP+r\frac{P^n}{P^n+1^n}\right]dt$。其中，$a$为外源输入，从0.3线性上升到0.7，$P$为水体磷浓度，$s$为$P$的埋藏系数，设$s$=1，$r$为沉积物中磷的最大释放率，$n$为磷浓度对释放响应的强度(取$n$=5)。(B)蓝线为无气候变化影响下沉积物释放较低(r=0.5)情景下的水体磷浓度，其随时间(步长)呈现渐进式变化，未出现突变点；红线为受气候变暖影响下沉积物释放增加(r=1)情景下的水体磷浓度，其随时间(步长)呈现临界转换模式，出现突变点。(C)在临界转换模式下，不同强度极端气候事件(垂直虚线表示，其强度为橘黄色<蓝色<红色)可能使得湖泊系统突变点提前出现

现(Qin等，2025)。此外，气候变化作为全球性问题，意味着世界上所有湖泊均存在气候变化影响下的突变风险，这很可能威胁其他生物类群，特别是依赖多个湖泊迁徙的鸟类和鱼类的生物多样性，从而严重阻碍可持续发展目标的实现。全球湖泊发生突变的风险并非仅是理论推测，基于遥感大数据的全球尺度分析显示，全球变化导致发生突变的湖泊日益增多(Gilarranz等，2022)。诸多学者警示(Barnosky等，2012；Richardson等，2023；Lenton等，2023；Dearing等，2025)，全球生物圈正面临系统性突变的风险，而湖泊作为地球系统各圈层交互作用的关键节点及全球变化的敏感指示器，其大范围突变可能预警着全球生物圈发生更广泛的系统性突变。

面对湖泊生态系统日益增长的突变风险，亟需依托稳态转换理论，深入研究湖泊生态系统的响应机制并制定适应性的管理政策。首先，需继续加强不同类型湖泊长时间序列气候变化和湖泊系统状态变化之间的非线性关系研究。目前的研究基于大数据分析手段，成功揭示了不同气候区湖泊生态环境的差异，并依托于空间尺度和短时间尺度(如十年际)的气候要素数据进行了未来气候变化影响的预测。然而，这类研究极有可能掩盖了造成不同类型湖泊突变的关键细节，且难以剥离气候变暖和直接人类活动的独立影响。因此，未来研究需特别关注远离人类活动影响的地区或时期，精准辨析气候变化对湖泊生态系统突变的贡献、驱动方式与具体过程。这标志着研究范式的转变：从传统古湖沼学上主要将湖泊突变视为气候突变的证据，转向在稳态转换理论框架下，着力揭示气候变化与湖泊状态变化之间的非线性关系。其次，应厘清引发湖泊突变的临界要素(tipping elements)并加强系统监测。这些临界要素可能并非只来源于湖泊内部，也可能涉及湖泊的整个流域。例如，在青藏高原地区，冻土的融化携带营养输入，叠加季节性气候变化的影响，可能显著改变湖泊系统的“苏醒”时间，从而增加其突变风险。识别气候变化驱动下不同类型湖泊系统临界要素，意味着应重点关注湖泊正反馈过程的参与者，包括关键环节和驱动因子。

我们有理由相信，不同区域及不同类型湖泊的临界要素存在差异，唯有厘清这些差异，开展有针对性的各要素系统监测，方能准确评估气候变化影响下的整体风险。应积极推动湖泊生态突变早期预警系统的建立，制定差异化的管理政策以应对湖泊系统突变并降低突变风险。开展生态系统突变早期预警信号的基础研究，优先遴选一批对气候变化高度敏感且具有代表性的关键湖泊，针对其临界要素开展高频监测，重点捕捉“闪烁”(flickering)(Wang等，2012)和临界放缓(Scheffer等，2012)现象，开展通用早期预警信号指标的验证(Dakos等，2012)；进一步利用物联网、遥感、大数据和人工智能技术，建立实时数据分析与预警平台。制定的管理政策也必须从单一的水质目标(如仅关注磷和氮浓度)转向“综合性生态健康目标”，将有效的早期预警信号纳入管理决策的参考指标体系。这些措施将最终推动实施基于韧性的适应性管理策略，将“避免跨越临界点”和

“增强生态系统韧性”作为湖泊保护与治理的核心目标。

气候变化正将全球湖泊推向稳态转换的十字路口，长期持续的压力与日益频发的极端事件相互叠加，使许多湖泊处于突变的风险边缘。这种转变并非危言耸听，而是基于坚实的生态学理论和日益增多的观测证据所揭示的严峻现实。中国的湖泊命运紧密关系国家水资源安全、生物多样性保护和经济社会可持续发展，地球科学界，特别是湖泊学家、气候学家、生态学家和水文学家，必须加强协同合作，将研究焦点转向对非线性突变过程的深入理解、准确预测和有效预防。这要求我们不仅要在基础研究上取得关键突破，更要在观测技术和治理理念层面进行一场深刻而系统的变革。

参考文献

Barnosky A D, Hadly E A, Bascompte J, et al. 2012. Approaching a state shift in Earth’s biosphere. Nature, 486: 52–58

Calamita E, Lever J J, Albergel C, et al. 2024. Detecting climate-related shifts in lakes: A review of the use of satellite Earth Observation. Limnol Oceanogr, 69: 723–741

Dakos V, Carpenter S R, Brock W A, et al. 2012. Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data. PLoS ONE, 7: e41010

Dearing J A, Thompson R, Tooke K, et al. 2025. Reconciling global tipping point theories: Insight from magnetic experiments. One Earth, 8: 101358

Gilarranz L J, Narwani A, Odermatt D, et al. 2022. Regime shifts, trends, and variability of lake productivity at a global scale. Proc Natl Acad Sci USA, 119: e2116413119

Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, et al. 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes. Nature, 594: 66–70

Kragh T, Martinsen K T, Kristensen E, et al. 2020. From drought to flood: Sudden carbon inflow causes whole-lake anoxia and massive fish kill in a large shallow lake. Sci Total Environ, 739: 140072

Lenton T M, Armstrong McKay D I, Loriani S, et al. 2023. Global Tipping Points Report 2023. Exeter: University of Exeter

Loewen C J G. 2023. Lakes as model systems for understanding global change. Nat Clim Chang, 13: 304–306

Qin B, Deng J, Shi K, et al. 2021. Extreme climate anomalies enhancing cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. Water Resour Res, 57: e2020WR029371

Qin B, Xu M, Zhu K, et al. 2025. Climate warming will significantly affect future restoration and level of ecosystem services in Lake Erhai. Ecol Model, 503: 111067

Richardson K, Steffen W, Lucht W, et al. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. Sci Adv, 9: eadh2458

Scheffer M, Carpenter S R, Lenton T M, et al. 2012. Anticipating critical transitions. Science, 338: 344–348

Wang R, Dearing J A, Langdon P G, et al. 2012. Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. Nature, 492: 419–422

Willcock S, Cooper G S, Addy J, et al. 2023. Earlier collapse of Anthropocene ecosystems driven by multiple faster and noisier drivers. Nat Sustain, 6: 1331–1342

Woolway R I, Kraemer B M, Lenters J D, et al. 2020. Global lake responses to climate change. Nat Rev Earth Environ, 1: 388–403

Woolway R I, Zhang Y, Jennings E, et al. 2025. Extreme and compound events in lakes. Nat Rev Earth Environ, 6: 593–611

Zhu K, Wang R, Qiu H, et al. 2024. Long-term climate warming and extreme cold events driving ecological shifts in a deep oligo-mesotrophic lake. Ecol Evol, 14: e70052

（责任编委：张仲石）