J. Lake Sci.(湖泊科学),2024,**36**(2):333-338
DOI 10.18307/2024.0200
© 2024 by *Journal of Lake Sciences*

湖泊流域生态系统演化对人类世研究的重要意义*

王　荣[1,2**],张　科[1],刘建宝[3],董旭辉[4],羊向东[1,2]
(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)
(2:中国科学院大学,北京 101408)
(3:中国科学院青藏高原研究所,北京 100101)
(4:广州大学地理科学与遥感学院,广州 510006)

摘　要:人类世可能成为一个全新的地质时期,以描述人类活动对地球环境造成极为深远的影响,目前已被广泛讨论。湖泊及流域生态系统作为与人类社会最密切的地球单元之一,受到人类活动显著影响,相关研究成果能为理解人类世做出贡献。本文从湖泊流域生态系统和人类世本身特征为切入点,讨论了湖泊及流域生态系统演化对人类世研究的重要意义。我们认为,湖泊具有相对独立的整体,清晰的内部作用关系、完备的理论支持和时空数据支撑,能够为人类世地球各圈层交互作用提供研究框架。湖泊流域生态系统演化的稳态转换与地球环境进入新的地质时期具有诸多相似之处,相关研究成果能够更好地界定人类世开始时间、总体特征以及演变过程和机制。本文指出人类世湖泊及流域生态系统演化研究依然面临诸多挑战,并提出了对未来相关研究的展望。
关键词:突变;古湖沼;人类活动;多圈层;地球圈层;地球环境

The importance of lake ecosystem evolution for anthropocene research*

Wang Rong[1,2**], Zhang Ke[1], Liu Jianbao[3], Dong Xuhui[4] & Yang Xiangdong[1,2]
(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *P.R.China*)
(2: *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 101408, *P.R.China*)
(3: *Institute of Tibetan Plateau Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *P.R.China*)
(4: *School of Geographical Sciences*, *Guangzhou University*, *Guangzhou* 510006, *P.R.China*)

Abstract: The Anthropocene may become a new geological era to describe the profound impact of human activities on the Earth's environment, which has been widely discussed. Lake and its watershed, as one of the most closely related units of the Earth to human society, are most significantly affected by human activities and can also contribute to the study of the Anthropocene. This paper takes the characteristics of lake ecosystems and the Anthropocene itself as the starting point to discuss the significance of lake ecosystem study for Anthropocene research. We believe that lakes have a relatively independent system, clear internal feedbacks, as well as complete theoretical and spatiotemporal data support, which can better provide a research framework for the interaction between various spheres of the Earth in the Anthropocene. There are many similarities between the regime shift of lake ecosystem and the entry of the Earth's environment into a new geological period. The relevant research can better define the start time, overall characteristics, evolution process and mechanism of the Anthropocene. This article points out that the study of the evolution of lake ecosystems in the Anthropocene still faces many challenges, and proposes prospects for future related research.
Keywords: Regime shift; palaeolimnology; human activities; multiple spheres; earth spheres; earth environment

全球变化已经显著影响了地球环境,造成了气温持续升高、污染加剧、生物多样性不断减少等生态环境问题,地球的宜居条件面临日益严峻的挑战[1]。不同学者从多个角度评估了全球变化对地球系统的影响,

* 2024-01-08 收稿;2024-01-29 收修改稿。
国家自然科学基金项目(42171163)和中国科学院南京地理与湖泊研究所自主部署科研项目(2021NIGLAS-CJH03)联合资助。
** 通信作者;E-mail:rwang@niglas.ac.cn。

阐述了地球环境和地球生态系统的现状和演化历史,并从自然过程和文明发展等方面明晰了导致这些变化的原因。多数学者的共同观点是,地球系统近百年来显著变化的根本原因是人类活动,包括人口增长、化石燃料的使用和城市化等过程,持续而深刻地改变了地球各圈层。大气化学家 Paul J. Crutzen (1933－2021)和古湖沼学家 Eugene F. Stoermer 在 2000 年率先提出"人类世"作为一个新的地质时期,以表明我们人类当前所处的特殊时期[2]。"人类世"概念的正式提出显然更好地团结了不同学科的学者,使其拥有了更有效的沟通语言,以共同面对当前生态环境危机。关于人类世的诸多争议,尹志勇和刘晓东进行了详尽的梳理[3],在此不再赘述。2023 年国际地层委员会人类世工作组推荐将加拿大 Crawford 湖作为人类世标准层型剖面(俗称"金钉子")、我国四海龙湾玛珥湖为辅助层型剖面,进一步引起了学者对人类世的关注[4-5]。湖泊流域系统是受人类活动影响最广泛和深刻的地球系统之一,其本身所具有的特征也为人类世研究做出了重要贡献。本文将重点讨论湖泊及流域生态系统演化对人类世研究的重要意义。

1 全球变化导致人类世湖泊流域系统发生显著变化

近百年来,以人类活动和气候变化为主要驱动力的全球变化对湖泊流域系统产生了非常显著的影响。人口增长和社会转型导致的工农业发展、城市化、水库建设、植被砍伐显著改变了流域土地利用方式[6],引起流域侵蚀增强[7]、水文水动力改变[8]、水体富营养化、藻类异常增殖和生物多样性下降[9-11]。气温的升高、极端降水的增加使得浅水湖泊藻类暴发风险更大[12]。增温导致极地地区湖泊生态系统生物群落更替速率更快,湖泊生态稳定性显著下降[13]。温度的持续升高加剧了深水湖泊热力分层,而极端气候会造成深水湖泊沉积物更多营养释放,提升了深水湖泊的生态风险[14]。现有研究表明,全球 63% 的大型湖库发生了富营养化[15]。近 20 年来,全球 12.8% 的湖泊发生稳态转换,并且随着时间的推移,发生稳态转换的湖泊越来越多[16]。

中国湖泊生态系统在全球变化下受到显著的影响[9,17]。在青藏高原地区,气候变化和冰川融水造成湖泊水面扩张[18-19]。在云贵高原地区,气候变化、流域土地利用、农业化肥使用、工业和旅游发展等因素造成湖泊面积缩减、营养富集和蓝藻水华频发[9,17]。这些问题叠加外来物种入侵、过度捕捞等因素,显著减少了湖泊沉水植物、鱼类、浮游藻类等生物多样性[9]。气候变化也普遍引起该地区深水湖泊(如抚仙湖)分层加剧[20]。在长江中下游地区,共建设有 43600 个水坝,改变了区域江湖关系[8],结合农业化肥使用和鱼类养殖等影响,多数湖泊经历了快速富营养化[11],且大型水生生物多样性下降[21],对我国的湖泊水安全造成显著影响。极端增温进一步加剧了该地区的富营养化过程,提高了营养削减和管理的难度[12]。一项综合研究表明,中国 70% 以上的湖泊自 20 世纪以来发生了至少一次生态突变,而这些生态变化与社会经济发展显著相关[22]。总而言之,人类世全球变化已经导致了全球湖泊发生了显著变化。人类活动是湖泊生态系统变化的最主要驱动力,湖泊流域生态系统的变化正逐渐成为全球变化的重要部分。

2 全球变化背景下湖泊流域系统研究能助力构建人类世研究框架

人类世意味着人为营力超过了自然营力,根本性地改变了地球系统状态和功能[1,23]。地球系统是由相互关联的多个单元构成。当前,对人类活动影响地球环境的研究多数是聚焦于单一系统,例如气候系统[24]、陆地生态[25]、冰川冻土[26]、土壤[27]等。然而,地球系统不同圈层间存在交互作用,人类活动的影响不仅改变了地球各个系统,也加强了各系统间的交互作用关系[28-29]。人类活动如何改变各圈层间交互作用,使得地球环境进入新的地质时期,是人类世研究的关键内容之一。为此,相关工作不仅需要查明各个地球系统的现状以及对全球变化的响应特征,也要识别、研究、评估这些子系统之间交互作用的变化。为实现这一目标,需要一个能进行跨圈层研究的整体方案。

湖泊流域系统能为不同圈层交互作用研究提供有力参考。一方面,湖泊流域系统是地球多个圈层的交汇点。流域河流和湖泊水体是水圈的重要组成部分;流域植被和水生生物是生物圈的一部分;区域气候属于大气圈;而高山高原湖泊流域的冰川冻土属于冰冻圈。全球变化促进了各单元的变化,而流域内人类聚居点对各单元的直接影响,能更容易观测人类活动如何改变各单元间的关系。因此,湖泊流域是研究地球各圈层变化的理想实验场,为人类活动驱动各圈层交互作用变化提供相似体。第二,与其它类型生态系统

不同,湖泊流域生态系统具有相对稳定的边界,包括明确的湖岸和流域界线。这有利于明确物质和能量的流动,更容易厘清外部驱动和内部交互作用关系。这点也有益于多圈层综合模型的开发,从而为人类活动影响评估提供整体方案。第三,湖泊流域系统具有明确的交互作用关系,包括食物网和反馈机制。湖泊流域自然系统通过生态系统服务与社会系统相连[30]。人类社会持续从自然系统中获得生态系统服务,从而改变了湖泊流域环境,而湖泊流域环境的改变迫使生态系统服务的改变,从而能够不断塑造人类社会[31]。自然系统-生态系统服务-人类社会间形成的反馈机制正是人类世地球环境演变的关键过程。古湖沼学、环境科学、遥感科学的发展,确保能够提取和观测湖泊流域系统各要素的变化和生态系统服务变化[32],而当前的生态学理论研究为把握全球变化驱动下湖泊流域各单元交互作用关系提供较好的理论基础。总之,具有相对明确边界、清晰内部过程以及可用的长期演变记录的湖泊流域系统能够更好地为人类世地球环境演变规律研究提供天然实验场。

3 湖泊流域系统长期演化研究,为人类世定义和评估人类活动影响提供更有说服力的证据

人类世地球环境是地球系统上亿年演化的结果。地质学家用不同地质纪年来区分其演化的不同阶段,人类世可能成为最新的地质年代,意味着地球系统进入了全新的以人类活动显著影响为特征的地球环境阶段。关于人类世的开端,当前存在很多争议[3]。不同观点和研究支持的人类世时间界限存在差异,包括全新世早期[33]、全新世中期[34]、工业革命开始[2]及 20 世纪 50 年代[1]。明晰人类世与其它地质时期的差异,厘清人类活动影响的过程和机制,必须要考虑更长时间尺度的地球环境演化历史。湖泊流域系统则可以为该研究提供无可替代的材料[35]。湖泊沉积档案能够完整地记录湖泊流域万年以来的生态环境变化历史,重建不同时期的湖泊流域变化特征。无论是百年、千年还是万年尺度,古湖沼学都能够提供较好的年代测定手段和敏感的湖泊流域生态环境变化指标。因此,古湖沼学在全新世全球/区域气候和湖泊流域生态系统演化等方面已做出了卓越贡献[8]。

在地球气候环境演变的研究中,基于湖泊沉积与冰芯、石笋、黄土、树轮等记录起到了重要作用。不仅如此,古湖沼学还可以为人类世中人类活动对地球生态系统的影响提供强有力的数据支撑[8,35-36]。湖泊沉积指标不仅能够定量重建不同时间尺度的气候要素、流域侵蚀强度、水文水动力、污染等环境演化历史,还可以反演水体浮游动植物、陆生植被等生物群落的演替历史,为湖泊流域生物群落响应环境变化提供时间序列数据基础[37]。因此,湖泊沉积生物-理化指标能够更全面反映人类世湖泊流域系统的变化过程[35]。沉积物 DNA 技术的成熟应用将进一步拓展沉积记录的解释范畴,使得古湖沼学不仅可以利用微体生物遗存,还可以利用大型生物例如哺乳动物、鸟类和鱼类的 DNA 遗存信息解释湖泊流域陆地生态系统和水生生态系统交互作用[38]。当前的工作已采用湖泊沉积 DNA 重建了早期农业、畜牧业、生物多样性特征以及外来物种入侵对当地生态系统的影响[39-40],未来的发展将使得时间序列上湖泊流域系统食物网的研究更加全面,不同圈层交互作用研究也将会更加深入。湖泊流域系统面貌更清晰的重建,使得研究者可以更清楚地对比生态系统在人类世阶段的状态和自然初始状态,以便确立生态系统自然本底,自然背景下的演变规律,人类活动导致生态系统偏离自然本底的程度、变化速率,以及人类活动影响生态系统的主要过程等[8]。这些研究为进一步明确人类世的内涵具有明确意义。

4 湖泊流域系统的突变研究能为人类世研究提供更科学的思路

从全新世进入人类世,意味着地球系统从一个稳态转变为另一个稳态。需要特别指出的是,本文中讨论的稳态并非指系统状态稳定不变,而是指系统维持在一定的平衡态内,具有相对稳定的特征。比如全新世之前更新世的冰期-间冰期的交替特征以及全新世气候稳定特征都属于稳态。著名社会-生态系统弹性研究组织斯德哥尔摩弹性中心将生态系统稳态转换(regime shift)定义为是社会生态系统结构和功能的巨大而持久的变化,对这些系统提供的生态系统服务产生了实质性影响的转变[41]。生态系统稳态转换的理解能够为人类世特征研究提供诸多启示。人类世是否应该被确定,以及其起始年代是否应该被确定在某个时刻,需要对当前和历史状态特征进行总体评述;需要区分当前状况的地球环境是否是从全新世稳态快速转换为新的稳定时期,还是快速变化到一个稳态的中间过渡阶段。

当前,地球上许多生态系统可能都经历过或者正在发生稳态转换[42]。这些稳态转换发生在湖泊、森林、海洋、草地等生态系统中[43]。这些生态系统的稳态转换导致了生态系统服务的急剧下降,可持续发展面临威胁[44-45]。评估持续的全球变化是否会导致地球各系统稳态转换的连锁反应,引起地球环境整体的稳态转换,一直是全球变化研究和政策制定的核心问题[46]。全球环境发生稳态转换,和地球环境从全新世走向人类世的观点,是从两个不同角度看待地球环境的演化。人类世侧重地球环境的演化历史,稳态转换侧重地球系统状态本身,包括状态定义、维持机制、变化过程、驱动因子、响应方式等。显而易见的是,生态系统稳态转换的研究能够更深刻地理解当前地球环境演化的阶段,进一步明晰关于人类世相关问题的争议。

当前稳态转换的研究依然面临很多问题。比如,如何定量描述一个系统的状态,生态系统稳定性的定义和评估手段,系统稳定性的维持机制以及和生物多样性的关系,稳态转换的突变点是否可以被预测或预警等。在当前的理解水平下,科研工作者和管理人员无法在所有系统中验证关于稳态转换的相关假设。从本身固有特点以及目前的参与度来看,湖泊生态系统是明确回答稳态转换相关问题的最优选择之一。本文上述章节已经说明了湖泊生态系统的独特特点,即湖泊生态系统具有相对明确的边界、清晰的交互作用关系以及长期研究的材料,能够较好地探讨关于生态系统稳态转换研究的相关课题。作为稳态转换的核心研究内容,系统中各要素反馈机制在外力驱动下的是否加强是导致一个系统稳态快速转变为另外一个稳态的主导因素。稳态转换机制的研究需要特定的对象如湖泊流域系统,以便清晰揭示系统内部过程对外力驱动的非线性响应特征,从而能够拓展到地球系统各圈层的交互作用研究中。湖泊生态系统具有可辨识的稳态特征,例如草型湖的清水状态和藻型湖的浊水状态,对于主导这些稳态的反馈机制,目前的室内试验研究、野外操控、以及观测研究已经给出了相对明确的答案。湖泊沉积物保存的长时间序列理化和生物要素变化特征,能够揭示理化-生物环境的长时间演化过程,在自然系统中揭示了稳态转换现象[36]、验证突变点早期预警信号理论[47]等。

5 挑战与展望

深入理解人类世湖泊流域系统响应人类活动的过程和机制,既能为解决湖泊流域在人类世面临的问题提供科学建议,也能为人类世地球系统变化研究提供重要价值。随着遥感技术、系统理论、模拟手段以及沉积物 DNA 方法的不断完善,湖泊流域各系统交互作用的研究将变得越来越可行,更多关于多过程演变规律的研究也将涌现,未来场景下湖泊流域变化的模拟预测也将更加精确。这些发展将促进湖泊流域系统管理更加有效,更好地为可持续发展服务。从湖泊流域多种手段和技术融合发展产生的结果,将必然会形成多圈层研究的新框架和生态系统演变的新理论。

同时,我们也清晰地认识到,在人类世框架下湖泊流域系统的研究还面临诸多挑战。首先,湖泊流域系统不同过程响应人类活动的尺度存在差异。例如,土地利用的改变可能是过去千年变化的结果,外来物种入侵以及农业化肥的使用可能从 20 世纪中叶开始作用于湖泊流域,气候变化在最近几十年和未来可能更多影响湖泊流域系统;另外,营养富集和土壤侵蚀是影响湖泊流域的一个持续性过程,而极端气候是影响湖泊流域的一个事件性过程。如何综合评估不同尺度的驱动和响应过程,是人类世湖泊流域研究的一个挑战。其次,湖泊流域作为一个整体响应人类活动变化,但其类型多样,不同类型湖泊流域的响应过程存在差异。例如冰川补给和降水补给的湖泊,气候变化影响不同;牧业主导和农业主导的湖泊流域,人类活动的影响不同;社会系统的文化和发展阶段不同,流域土地和湖泊资源利用方式存在差异,从而导致人地关系和湖泊流域生态系统响应的不同。如何有效整合不同湖泊流域的异同点,形成多个层级的湖泊流域研究手段、研究方案和研究结果是人类世湖泊流域系统研究的挑战。最后,湖泊流域系统研究的理论支撑是人类世湖泊流域演化研究的挑战,也是最终实现湖泊流域精确模拟的必要前提。目前能够支撑湖泊流域系统演化研究的理论,如诸多生态学理论和地理学假说,在独立研究系统各单元中发挥着重要作用,在整合湖泊流域系统变化研究中呈现不足。弹性理论或许能够成为指导湖泊流域系统演化研究的重要支撑,但依然需要更多研究案例以及多种手段的数据支持。

6 参考文献

[1] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L *et al*. The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2015, **2**

(1): 81-98. DOI: 10.1177/2053019614564785.
[2] Crutzen PJ, Stoermer EF. The Anthropocene. IGBP Global Change Newsletter, 2000, **41**: 17-18.
[3] Yin ZY, Liu XD. "the anthropocene"—its proposition and controversies. *Quaternary Sciences*, 2023, **43**(4): 1146-1156. [尹志勇, 刘晓东. "人类世"的提出与争议. 第四纪研究, 2023, **43**(4): 1146-1156.]
[4] McCarthy FM, Patterson RT, Head MJ *et al*. The varved succession of Crawford Lake, Milton, Ontario, Canada as a candidate Global boundary Stratotype Section and Point for the Anthropocene series. *The Anthropocene Review*, 2023, **10**(1): 146-176. DOI: 10.1177/20530196221149281.
[5] Witze A. This quiet lake could mark the start of a new Anthropocene epoch. *Nature*, 2023, **619**: 441-442. DOI: 10.1038/d41586-023-02234-z.
[6] Ellis EC. Land use and ecological change: A 12,000-year history. *Annual Review of Environment and Resources*, 2021, **46**: 1-33. DOI: 10.1146/annurev-environ-012220-010822.
[7] Zhao HF, Lin YH, Zhou J, Sun QL *et al*. Quantifying the dynamic processes of soil erosion and lake sediment deposition in the Holocene in China. *Quaternary Science Reviews*, 2023, **304**: 107993. DOI: 10.1016/j.quascirev.2023.107993.
[8] Yang XD, Wang R, Dong XH *et al*. A review of lake palaeoecology research in China. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1380-1395. DOI: 10.18307/2020.0512. [羊向东, 王荣, 董旭辉等. 中国湖泊古生态研究进展. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1380-1395.]
[9] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al*. Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. DOI: 10.18307/2010.0601.[杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
[10] Fang J, Wang ZH, Zhao SQ *et al*. Biodiversity changes in the lakes of the Central Yangtze. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, **4**(7): 369-377. DOI: 10.1890/1540-9295(2006)004[0369: bcitlo]2.0.co;2.
[11] Qin BQ, Gao G, Zhu GW *et al*. Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(9): 961-970. DOI: 10.1007/s11434-012-5560-x.
[12] Qin BQ, Deng JM, Shi K *et al*. Extreme climate anomalies enhancing cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. *Water Resources Research*, 2021, **57**(7). DOI: 10.1029/2020wr029371.
[13] Smol JP, Wolfe AP, Birks HJB *et al*. Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic Lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(12): 4397-402. DOI: 10.1073/pnas.0500245102.
[14] Woolway RI, Kraemer BM, Lenters JD *et al*. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**: 388-403. DOI: 10.1038/s43017-020-0067-5.
[15] Wang SL, Li JS, Zhang B *et al*. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **217**: 444-460. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.026.
[16] Gilarranz LJ, Narwani A, Odermatt D *et al*. Regime shifts, trends, and variability of lake productivity at a global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, **119**(35): e2116413119. DOI: 10.1073/pnas.2116413119.
[17] Tao SL, Fang JY, Ma SH *et al*. Changes in China's Lakes: Climate and human impacts. *National Science Review*, 2020, **7**(1): 132-140. DOI: 10.1093/nsr/nwz103.
[18] Zhou J, Wang L, Zhong XY *et al*. Quantifying the major drivers for the expanding lakes in the interior Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2022, **67**(5): 474-478. DOI: 10.1016/j.scib.2021.11.010.
[19] Zhang GQ, Yao TD, Xie HJ *et al*. Response of Tibetan Plateau Lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 2020, **208**: 103269. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103269.
[20] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊生态环境研究报告. 北京: 科学出版社, 2013.
[21] Wang R, Doncaster CP, Zheng WX *et al*. High phytoplankton diversity in eutrophic states impedes lake recovery. *Journal of Biogeography*, 2023, **50**(11): 1914-1925. DOI: 10.1111/jbi.14698.
[22] Dong YF, Zheng WX, Zhang CX *et al*. Temporal and spatial differences of lake ecosystem regime shift in China. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 992-1003. DOI: 10.18307/2021.0403. [董一凡, 郑文秀, 张晨雪等. 中国湖泊生态系统突变时空差异. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 992-1003.]
[23] Steffen W, Crutzen J, McNeill JR. The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of Nature? *Ambio*, 2007, **36**(8): 614-621. DOI: 10.1579/0044-7447(2007)36[614: taahno]2.0.co;2.
[24] Sun Y. Impact of humanactivities on climate system: An interpretation of Chapter Ⅲ of WGI report of IPCC AR6. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, **44**(5): 654-657. [孙颖. 人类活动对气候系统的影响——解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章. 大气科学学报, 2021, **44**(5): 654-657.]
[25] Mottl O, Flantua SGA, Bhatta KP *et al*. Global acceleration in rates of vegetation change over the past 18,000 years. *Science*, 2021, **372**(6544): 860-864. DOI: 10.1126/science.abg1685.
[26] Kang SC, Guo WQ, Zhong XY *et al*. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures. *Climate Change Research*, 2020, **16**(2): 143-152. [康世昌, 郭万钦, 钟歆玥等. 全球山地冰冻圈变化、影响与适应. 气候变化研究进展, 2020, **16**

(2): 143-152.]

[27] Rillig MC, van der Heijden MGA, Berdugo M *et al*. Increasing the number of stressors reduces soil ecosystem services worldwide. *Nature Climate Change*, 2023, **13**(5): 478-483. DOI: 10.1038/s41558-023-01627-2.

[28] Steffen W, Richardson K, Rockström J *et al*. The emergence and evolution of earth system science. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, (1): 54-63. DOI: 10.1038/s43017-019-0005-6.

[29] Piao SL, Wang XH, Park T *et al*. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, (1): 14-27. DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x.

[30] Janssen ABG, Hilt S, Kosten S *et al*. Shifting states, shifting services: Linking regime shifts to changes in ecosystem services of shallow lakes. *Freshwater Biology*, 2021, **66**(1): 1-12. DOI: 10.1111/fwb.13582.

[31] Bennett EM, Peterson GD, Gordon LJ. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, **12**(12): 1394-1404. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x.

[32] Dearing JA, Yang XD, Dong XH *et al*. Extending the timescale and range of ecosystem services through paleoenvironmental analyses, exemplified in the Lower Yangtze Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(18): E1111-E1120. DOI: 10.1073/pnas.1118263109.

[33] Liu DS. Demand of anthropocene study in the new stage of geoscience: In honor of late geologist Huang jiqing for his innovative spirit. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(4): 369-378. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-7410.2004.04.001. [刘东生. 开展"人类世"环境研究, 做新时代地学的开拓者——纪念黄汲清先生的地学创新精神. 第四纪研究, 2004, **24**(4): 369-378.]

[34] Ruddiman WF. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change*, 2003, **61**(3): 261-293. DOI: 10.1023/B: CLIM.0000004577.17928.fa.

[35] Dearing JA. Why Future Earth needs lake sediment studies. *J Paleolimnol*, 2013, **49**(3): 537-445.

[36] Huang SX, Zhang K, Lin Q *et al*. Abrupt ecological shifts of lakes during the Anthropocene. *Earth-Science Reviews*, 2022, **227**: 103981. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103981.

[37] Gregory-Eaves I, Smol JP. Paleolimnology: approaches and applications. *Wetzel's Limnology*. Amsterdam: Elsevier, 2024: 1015-1043. DOI: 10.1016/b978-0-12-822701-5.00030-6.

[38] Dussex N, Bergfeldt N, de Anca Prado V *et al*. Integrating multi-taxon palaeogenomes and sedimentary ancient DNA to study past ecosystem dynamics. *Proceedings Biological Sciences*, 2021, **288**(1957): 20211252. DOI: 10.1098/rspb.2021.1252.

[39] Sjögren P, Edwards ME, Gielly L *et al*. Lake sedimentary DNA accurately records 20th Century introductions of exotic conifers in Scotland. *The New Phytologist*, 2017, **213**(2): 929-941. DOI: 10.1111/nph.14199.

[40] Ficetola GF, Poulenard J, Sabatier P *et al*. DNA from lake sediments reveals long-term ecosystem changes after a biological invasion. *Science Advances*, 2018, **4**(5): eaar4292. DOI: 10.1126/sciadv.aar4292.

[41] Stockholm Resilience Centre. Social-ecological systems contain various tipping points or thresholds that can trigger large-scale reorganization, 2016. https://www.stockholmresilience.org/research/insights/2016-11-16-insight-2-regime-shifts.html.

[42] Rocha JC, Peterson GD, Biggs R. Regime shifts in the anthropocene: Drivers, risks, and resilience. *PLoS One*, 2015, **10**(8): e0134639. DOI: 10.1371/journal.pone.0134639.

[43] Scheffer M, Carpenter S, Foley JA *et al*. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, **413**: 591-596. DOI: 10.1038/35098000.

[44] Rockström J, Steffen W, Noone K *et al*. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, **461**: 472-475. DOI: 10.1038/461472a.

[45] Barnosky AD, Hadly EA, Bascompte J *et al*. Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature*, 2012, **486**: 52-58. DOI: 10.1038/nature11018.

[46] Rocha JC, Peterson G, Bodin Ö *et al*. Cascading regime shifts within and across scales. *Science*, 2018, **362**(6421): 1379-1383. DOI: 10.1126/science.aat7850.

[47] Wang R, Dearing JA, Langdon PG *et al*. Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. *Nature*, 2012, **492**(7429): 419-422. DOI: 10.1038/nature11655.