

湖泊生态系统长期定位观测与试验研究：历程、使命与未来*

张运林^{1,2,3**}, 朱广伟^{1,2,3}, 秦伯强^{1,2,3}, 肖曼^{1,2,3}, 任泽^{1,2,3}

(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学院, 南京 211135)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 湖沼学和湖泊科学发展历程深刻印证了长期野外定位观测与试验研究的重要性和必要性。全球范围内, 科研机构通过建立长期定位观测野外站, 系统开展了数十年至上百年的湖泊生态系统演化过程、影响机制与可持续管理研究, 如 Flathead 湖, Trout 湖和 Michigan 湖等。在中国生态系统研究网络和国家科技基础条件平台中心支持下, 我国科学家陆续在武汉东湖、太湖、鄱阳湖、洞庭湖、梁子湖等建设野外观测试验站, 开展湖泊生态系统长期试验观测和联网综合研究。本文系统梳理了全球和中国湖泊科学长期定位观测与试验研究进展, 通过跨国别、跨区域、跨湖泊类型的案例对比, 彰显了长期定位观测在揭示湖泊生态系统动态变化规律中的不可替代性。研究强调, 唯有通过跨区域联网观测, 观测信息化和智能化提升以及观测与模拟模型结合, 才能深入解析湖泊生态系统对气候变暖、人类活动干扰的响应过程与弹性机制, 进而为全球湖泊保护、生态修复与可持续利用提供关键科学支撑, 推动湖泊科学从“现象描述”向“机制揭示”与“预测预警”的跨越式发展, 最终服务于联合国可持续发展议程和美丽中国建设。

关键词: 湖泊生态系统, 全球湖泊生态观测网络、野外站, 长期定位观测

Overview of long-term observation and experimental research on lake ecosystems: journey, mission and future*

Zhang Yunlin^{1,2,3**}, Zhu Guangwei^{1,2,3}, Qin Boqiang^{1,2,3}, Xiao Man^{1,2,3} & Ren Ze^{1,2,3}

(1: *Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing (UCASNJ), Nanjing 211135, P.R.China*)

(3: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

Abstract: The advancement of limnology and lake science has compellingly demonstrated the critical importance of long-term, site-specific field observations and experimental research. Globally, scientific institutions have established long-term field observation stations—such as those at Flathead Lake, Lake Trout, and Lake Michigan in the United States—to systematically conduct research spanning decades to over a century on the evolution, impact mechanisms, and sustainable management of lake ecosystems. Supported by the Chinese Ecosystem Research Network and the National Science and Technology Infrastructure Platform Center, Chinese scientists have successively constructed field observation and experimental stations at sites including East Lake (Wuhan), Lake Taihu, Lake Poyang, Lake Dongting, and Lake Liangzi, undertaking long-term experimental monitoring and networked comprehensive studies of lake ecosystems. This study systematically reviews the progress of long-term, site-specific

* 2025-12-05 收稿;2026-02-24 收修改稿。

国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U25A20753)、江苏省生态环境科研项目成果转化与推广项目(2023003)和中国科学院智库研究员项目联合资助。

** 通信作者; E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn.

observation and experimental research in lake science, both globally and within China. Through cross-national, cross-regional, and cross-lake-type case comparisons, it highlights the irreplaceable role of such sustained, location-based observations in uncovering the dynamics of lake ecosystems. The study emphasizes that only through cross-regional networked observations, enhanced informatization and intelligence in monitoring, and the integration of observational data with simulation models can we deeply analyze the response processes and resilience mechanisms of lake ecosystems to climate warming and human disturbances. This synthesis provides crucial scientific support for global lake conservation, ecological restoration, and sustainable utilization, thereby propelling lake science forward from "phenomenon description" to "mechanism analysis" and "predictive early-warning." Ultimately, this work serves the objectives of the United Nations Sustainable Development Agenda and the Beautiful China Initiative.

Key words: Lake ecosystem, field station, long term specific observation, Global Lake Ecological Observatory Network

湖泊作为地球系统多圈层交互作用的关键节点，其物理边界清晰、生态过程耦合显著，是研究多尺度物质循环、能量流动与生态响应的理想天然实验室，诞生了生态系统能量传递效率的经典理论——林德曼定律（又称十分之一定律）^[1]，奠定了生态学定量研究基础。当前，湖泊更成为解码地球系统复杂性的关键窗口，在应对全球变化、制定生态保护策略中发挥着不可替代的模式系统作用^[2,3]。湖泊生态系统长期定位观测指在固定地点和时间频度下，对湖泊生境因子，生态系统结构、功能、演化关键参量与过程进行持续十年至数百年的系统性监测，其核心要素包括统一观测方法、固定观测样地、高频次数据采集及多参数综合分析。由于湖泊生态过程的长期性和生态系统演化的复杂性，只有通过长期观测与数据集成分析才能深入理解物质循环与能量流动、种群动态波动、生态系统演替以及生物响应与适应性变化^[4-8]。同时，湖泊生物资源高效利用、生态产品价值转化实现、生态系统有效管理以及气候变化应对、环境污染治理和生物多样性保护等政策制定和成效评估也都有赖于生态系统长期观测数据。因此，自湖沼学诞生起，湖泊野外站建设和湖泊生态系统长期定位观测与试验研究就受到国内外湖沼学家广泛关注和高度重视^[9]。

为深入理解人类活动和气候变化双重胁迫下我国湖泊生态系统演化规律，为日益突出的湖泊生态环境治理与保护修复提供数据支撑、科学依据和示范实践，近 30 年来中国也在温带、亚热带、高原寒区等全国不同气候带、不同湖区选择典型湖泊开展长期定位观测与试验研究，积累了丰富的数据资料，并在湖泊生态系统观测技术方法突破、过程机制理解和湖泊治理应用实践等方面取得积极进展。为系统总结各个湖泊野外站长期定位观测与试验研究最新研究成果和突出进展，推动湖泊科学发展和服务湖泊生态环境治理与保护修复以及美丽中国建设，《湖泊科学》编辑委员会组织了“野外站长期定位观测与试验研究”专辑。本文作为专辑的首篇文章，主要是从湖沼学与湖泊科学发展、国际与国内湖泊野外站建设等视角简要概述湖泊生态系统长期定位观测与试验研究进展，并展望未来发展方向和研究重点。

1 湖泊科学发展与长期定位观测研究意义

1.1 湖沼学与湖泊科学发展

湖沼学起源于 1850-1920 年的欧洲，1892 年通晓法语的瑞士学者 François-Alphonse Forel (1841-1912 年) 创造了“湖沼学”的英文名“limnology”（源自希腊语“limne”（湖泊或者沼泽）与“logos”（学问）的结合）。1892-1902 年，François-Alphonse Forel 收集了他对日内瓦湖长达 30 多年的长期观测研究成果，出版了专著《日内瓦湖：湖沼学》（Le Léman Monographie Limnologique）（共三卷），并正式将湖沼学确定为一门学科。Forel 将湖沼学局限于对湖泊的研究，认为湖沼学是湖泊的海洋学。1922 年在德国基尔举行的“国际理论与应用湖沼学”成立大会，将对湿地、溪流的研究归为湖沼学，因此湖沼学的定义从“湖泊的海洋学”扩展为“内陆水体的科学”。美国 North Carolina 大学国际著名湖沼学家 Robert G. Wetzel 教授 1978 年出版的《Limnology: Lake and River Ecosystems》（1983 年再版，2001 年第 3 版）将湖泊和河流生态系统纳入湖沼学研究范畴^[10]。加拿大麦吉尔大学（蒙特利尔）生物学教授，湖沼研究中心主任 Jacob Kalff 博士 2002 年出版的湖沼学教材《Limnology: Inland Water Ecosystems》，也将湖沼学归为内陆水体生态系统研究^[9]。

Stephen A. Forbes 在其 1887 年的经典论文“The Lake as a Microcosm”中，率先将湖泊视为一个功能整

体(“微宇宙”)来研究,这为后续的生态系统研究奠定了基础,被美国国家科学院誉为“美国生态学之父”。作为北美湖沼学的奠基人物,Chancey Juday 和 Edward A. Birge 开创了湖泊物理、化学和生物特性的系统定量测量,发明和改进了系列采样工具,他们的长期合作(1900-1940 年代)将湖沼学从描述性科学转变为定量分析科学。1957-1993 年, G. Evelyn Hutchinson 出版了四卷本《Treatise on Limnology》,系统化湖泊生态理论,使湖沼学成为现代生态学核心分支之一。

中国湖沼学研究起步较晚,随着研究的拓展和不断深入,为更好服务和满足国家需求,湖沼学在中国又逐步细分为湖泊科学与湿地科学研究,我国湖泊科学研究主要是通过湖泊野外科学考察和综合调查逐步发展起来。20 世纪 50 年代后期,中国科学院水生生物研究所等对一些中小型湖泊水生生物进行调查,之后在武汉东湖进行长期生态学观测研究并建设了中国科学院东湖湖泊生态系统试验站,是我国研究历史最悠久的湖泊生态站。1958 年,在著名气象和地理学家竺可桢先生的倡导与主持下,召开了全国首次湖泊科研工作会议,明确提出通过科学考察与调查填补中国湖泊科学研究空白。1958 年 6 月在中国科学院南京地理研究所(现中国科学院南京地理与湖泊研究所)成立了湖泊研究室,之后对江苏、长江中下游、云南横断山区、青藏高原等湖泊开展综合调查和考察。20 世纪 80 年代中后期,为加强湖泊长期、稳定、系统的野外综合观测试验研究,中国科学院南京地理研究所着手布局建设湖泊综合观测试验站,1986 年 9 月中国科学院批准在无锡建设“太湖湖泊生态系统研究站”(简称:太湖站),1988 年加入中国生态系统研究网络(CERN),之后又陆续在鄱阳湖、抚仙湖、天目湖、呼伦湖和千岛湖等建设野外观测站。20 世纪 90 年代初,中国科学院启动了基础研究领域特别支持项目中国湖沼调查专项,并于 1998 年出版了《中国湖泊志》。2006 年科技部启动了“中国湖泊水量、水质与生物资源调查”基础性工作专项,之后又先后启动了“中国湖泊沉积物调查”和“中国湖泊微生物调查”项目等。概括起来,湖泊科学是研究湖泊(含水库)系统形成与演化、结构与功能、保护与治理以及可持续利用的综合性交叉学科,是地球科学与生命科学等多学科交叉而产生的分支学科,随着地球科学对地球表层系统科学的日益重视和生物学对生态系统研究的不断深化,湖泊科学研究内涵和外延不断丰富发展。

1.2 长期定位观测在湖泊科学研究中的意义

长期定位观测作为湖泊科学研究的基石与核心范式,其重要性贯穿学科发展始终,并在全球及中国实践中展现出不可替代的科学价值与实践意义。由于湖泊生态系统的复杂性,气候变化和人类活动影响下湖泊物理、化学和生物因子间的相互作用以及生态系统演变均与时间尺度有关,短时间尺度的研究结果难以揭示湖泊生态系统对环境变化的响应过程和适应机制,未来演变趋势的预测也必须考虑可能的适应性变化,因此短期观测和实验结果不能全面系统认识湖泊生态系统演变的规律与机理,长期定位观测与试验在湖泊科学研究中具有不可替代性。生态系统长期定位观测研究范式的历史渊源可追溯至 19 世纪中叶,1843 年英国洛桑实验站启动的全球首个系统化长期观测项目虽聚焦作物-土壤养分循环,但为生态学研究树立了长期定位观测的典范;而湖沼学领域的专门性长期观测则始于 1888 年欧洲与美国相继成立的野外研究站^[9],通过持续监测单个湖泊的理化因子(如 pH 值、溶解氧、碳氮磷生源要素)与生物物种(如浮游植物、底栖生物、微生物)的动态变化,逐步从单湖研究拓展至多湖系统对比研究^[11-13],构建起理解湖泊生态系统结构、功能与动态演变的核心科学基础设施,奠定了湖沼学作为“基于野外观测与科学试验的学科”的本质属性。如 1941 年,美国生态学家林德曼通过对赛达伯格湖生态系统长期野外观测与理论计算,提出生态系统能量传递效率的经典理论——林德曼定律^[1],深化了对湖泊生态效率的认识,更被推广至陆地、海洋等生态系统,成为生态学基础理论的重要支柱。

在中国,湖泊科学的发展同样深深植根于长期野外观测与试验研究。1970 年代,中国科学院南京地理与湖泊研究所在宜兴建立湖泊综合试验站,主要开展湖泊水分蒸发观测研究,用于估算湖泊水量平衡;1980 年代,为更好满足国家需求,解决粮食短缺问题,建立东太湖水体农业试验站,开展大水面围网养殖等水体农业技术与示范,增加渔业资源和优质蛋白质供应。1987 年太湖湖泊生态系统野外科学观测研究站正式建站,该站针对大型浅水湖泊已开展了 30 余年系统性长期观测,不仅揭示了浅水湖泊水文水动力过程及生态环境效应、生源要素(碳、氮、磷等)循环转化的内在规律、浮游植物群落演替与蓝藻水华形成关键机制、以及水生植被与生态系统退化修复原理,还开发了蓝藻水华监测与预测预警

系统并实现长期稳定运行，研发了湖泊生境改善与生态修复成套技术并开展大规模示范^[14-19]。这些成果不仅直接保障了太湖集中式饮用水水源地水质安全，推动了太湖水质由劣V类提升至III类的显著改善，更是引领了我国浅水湖泊科学理论创新与技术应用^[20,21]，形成了从基础理论到实践应用的全链条创新体系。

湖泊作为“地球表层系统的连接点”，其长期观测数据是理解生物圈-大气圈-岩石圈相互作用的关键载体。通过持续性、系统性的数据采集与深度分析，长期定位观测构建了湖泊科学的核心知识体系，为预测生态阈值、评估气候变化影响、解析生物多样性丧失机制及制定可持续管理模式提供了不可替代的科学观测网络。面对气候变化加剧、生物多样性丧失与环境污染等全球共性挑战，长期观测数据更成为应对极端气候事件（如干旱、洪涝）、人为调控（如水利工程、农业面源污染）对湖泊水文过程和生态系统影响的重要依据。例如，全球大部分人口居住在季节性主导湖泊流域，其水文过程日益受到极端气候与人类活动的双重驱动，而长期观测数据正是量化这种影响、制定适应性管理策略的核心支撑。同样，在南北极及青藏高原等全球变化敏感地区，湖泊野外站的建立及长期观测与试验可以填补甚至完善湖泊生态系统响应全球变化研究^[22,23]。

因此，长期定位观测与试验研究不仅是湖泊科学发展的核心驱动力，更是守护人类赖以生存的“一湖清水”、应对全球生态挑战的战略性科学基础设施。这一研究范式将持续引领湖泊科学从基础理论探索向技术应用拓展，为全球湖泊保护与可持续管理提供坚实的科学支撑与决策依据，在气候变化适应、生物多样性保护及环境污染治理中发挥不可替代的关键作用。

2 国际湖泊科学长期定位观测与试验研究

2.1 传统的湖泊长期定位观测与试验

欧美发达国家具有历史悠久和系统完善的湖泊长期定位观测，以监测和研究湖泊生态系统、水质以及环境变化。这些观测站通常由大学、政府机构和非营利组织管理运行。如美国五大湖环境研究实验室（GLERL）隶属于美国国家海洋和大气管理局（NOAA），对五大湖和沿岸地区的生态系统和环境动态进行长期监测和创新研究；欧洲康斯坦茨湖国际管理委员会对位于瑞士、奥地利和德国三国交界处的康斯坦茨湖物理、化学和生物指标进行长期逐周或者逐月监测。此外，许多大学，如蒙大拿大学、威斯康星大学和明尼苏达大学，都在主要湖泊设有长期定位观测研究站，开展湖泊水文学、环境化学与生态学等多学科的研究。

美国蒙大拿州弗拉特黑德湖生物站（Flathead Lake Biological Station）成立于1899年，是美国历史最悠久的湖泊野外原位观测站，专注于湖泊水环境监测与生态系统保护修复，从1899年开始对弗拉特黑德湖的监测已超过100年，并于1977年制定了一项科学严谨的监测计划。弗拉特黑德湖及其流域水质和生态系统长期监测为弗拉特黑德湖-河系统水质保护提供了重要数据支撑和科学依据^[11,24-26]。例如，一项基于弗拉特黑德湖及其入湖河流38年的营养盐动态长期监测和氮磷计量学分析，发现入湖河流中的总氮总磷比值始终低于湖泊，湖泊氮磷化学计量失衡表现为初夏和盛夏期间浮游植物生长的磷限制，对湖泊食物网产生级联影响，并增加了磷限制微生物通过磷酸盐化合物代谢产生好氧甲烷的可能性^[11]。该站的相关研究工作也推动了禁止使用含磷洗涤剂、升级当地污水处理系统以及防止在弗拉特黑德河北支上游采矿的湖泊流域管理措施和政策实施（<https://flbs.umt.edu/newflbs/monitoring/lake-monitoring/>）。目前弗拉特黑德湖生物站代表性的湖沼学家有美国科学院院士 James Elser 教授，推动了湖泊营养盐动力学和化学计量学发展。

美国威斯康星大学麦迪逊分校湖沼中心特劳特湖站（Trout Lake Station）作为美国最早的湖泊研究站之一，由湖泊学先驱 Edward A. Birge 和 Chancey Juday 于1925年创立，是北方温带湖泊研究中心^[27]，2025年恰逢其建站100周年。特劳特湖站1981年加入北温带湖泊长期生态研究网络（North Temperate Lakes Long-Term Ecological Research: NTL-LTER），通过定期监测湖泊的温度、水质、鱼类种群及其栖息地等关键指标，识别湖泊生态系统的变化趋势^[13,28]，已成为全球湖泊生态研究的标杆站点。目前威斯康星大学麦迪逊分校湖沼学研究中心和特劳特湖站代表性的湖沼学家有美国科学院院士 Stephen R. Carpenter 教授，他基于野外站长期观测与模拟实验，与荷兰国际著名湖沼学家 M. Scheffer 共同开创了湖

泊生态系统稳态与临界转换理论^[29-31]，成为湖沼学和生态学研究经典理论。

20 世纪初，苏黎世湖成为湖泊沉积研究的先驱地。1920 年，瑞士工程师 Fritz Nipkow 首次使用玻璃管采样器采集深水湖泊苏黎世湖岩芯，分析沉积物特征；1952 年，Börje Kullenberg 在此取得 8.5 米岩芯，通过孢粉和化学分析揭示冰后期湖泊营养条件演变，推动了湖泊沉积和古湖沼学发展；1980 年代后，苏黎世湖逐步聚焦微生物生态学与湖泊生态系统动态研究。苏黎世大学植物生物学研究所湖泊野外站以微生物生态学、湖泊动态监测及生态修复为核心，是欧洲湖泊科学研究的重要基地，依托先进技术平台和国际合作网络，在淡水生态系统保护、气候变化响应等领域贡献突出^[12,32,33]。例如，苏黎世湖从 1972 年以来的长达四十年的长期定位观测研究发现，尽管湖泊生态系统磷含量降低了五倍，但氮输入并未显著减少，由于氮磷比的增加以及气候变暖引发的垂向混合减少，非固氮蓝藻得以受益进而成为湖泊中的优势物种并暴发有害藻华^[12]。

20 世纪 80 年代初，在美国国家科学基金会（NSF）资助下，北美科学家发起成立北温带湖泊长期生态研究网络（NTL-LTER），旨在理解湖泊生态系统与气候、地质、景观及人类活动的关系。NTL-LTER 是美国长期生态研究计划重要组成部分，通过持续监测湖泊对人类活动和气候变化的响应，深入揭示了流域景观影响原理、湖泊物理过程变化、溶解性有机物与营养盐循环转化、鱼类种群动态演替、浮游生物适应性机制、以及外来物种入侵与生物多样性下降机理等^[13,34-37]。除此之外，围绕北美五大湖和山普伦湖，日本的琵琶湖和霞浦湖，以及欧洲的康斯坦茨湖、巴拉顿湖和月亮湖等许多湖泊^[7,38-44]，都有长期定位观测与试验研究，深化了湖沼学基础理论认知，服务于湖泊生态环境保护修复。

此外，欧美湖沼学家还在很多湖泊开展长期的野外观测与原位试验，探讨营养盐削减和气候变暖等对湖泊浮游植物及生态系统的影响过程与机制^[7,8,45-47]。如加拿大阿尔伯塔大学 David W. Schindler 领衔的湖沼学研究团队在编号为 226 和 227 的湖泊开展了一系列的全湖长期观测与试验研究，通过对比添加碳和氮以及添加碳、氮和磷湖区藻类生物量变化，结果发现加磷的湖泊出现严重的蓝藻水华，而只加碳和氮的湖泊没有出现藻类水华，由此证明磷是导致富营养化和藻类水华发生的关键因子^[46,48]，控制和削减内外源磷负荷逐步成为湖泊富营养化控制的主要措施，包括污水处理厂新增和升级除磷工艺、推广无磷洗衣粉的使用，以及农田磷肥施用限制与农业面源磷的控制等。E. Jeppesen 等对丹麦 35 个长期监测的湖泊案例分析表明，随着外源总磷负荷削减，湖体总磷和叶绿素 a 浓度降低，透明度增加，但通常需 10-15 年时间，而氮浓度在外源负荷削减后的 5 年内就会明显降低，其中浅水湖泊尤为明显，与此同时浮游植物、水生植物、浮游动物和鱼类群落结构及生物量均会有所响应，进一步强调营养负荷控制是改善水质的核心手段，但需结合多措施和长期监测以及湖泊类型以实现生态稳定性，为湖泊生态系统管理与保护提供了科学依据^[7]。

2.2 基于新兴传感技术的全球湖泊观测网络

随着传感技术和互联网等新兴技术的快速发展和应用，在美国国家科学基金会支持下，由湖沼学家 Tim Kratz、生态模型专家 David Hamilton、数学家 Peter Arzberger 及计算机科学家 Fang-Pang Lin 于 2004 年共同倡议发起成立了全球湖泊生态观测网络（Global Lake Ecological Observatory Network，简称 GLEON，<https://gleon.org>）。GLEON 是一个致力于湖泊生态研究的国际协作科研平台，由科学家、观测站点与数据资源共同构成。依托高频浮标、传感器、网络通信与信息化科研基础设施的快速发展，GLEON 通过跨学科、跨国界的团队科研模式，系统探究湖泊生态过程及其对全球环境变化的响应机制^[49-52]。如从 GLEON 湖泊浮标收集的传感器高频监测数据而创建的 Lake Analyzer，可以计算对湖泊和水库生物地球化学循环至关重要的混合和分层指标，已广泛应用于比较不同气候、水文地理和时间梯度下湖泊的混合和分层状况，进而深入理解不同空间和时间尺度下产生的生物地球化学转化^[49]。GLEON 以推动湖泊生态学的国际合作为核心使命，旨在揭示湖泊在气候、水文与社会环境快速变迁中的功能与价值。2016 年，GLEON 会员分布在全球数十个国家超 150 个湖泊观测站，至 2018 年，GLEON 的 86 个湖泊观测站可实行稳定运行并向全球开放数据共享（图 1）；截至 2020 年，GLEON 在全球 63 个国家建立了超过 170 个湖泊观测站（部分湖泊站点数据待开放）。这些站点在湖泊面积、形态、营养状态、气候背景及人类干扰强度等方面具有显著梯度差异，为开展高频监测、跨湖比较、模型验证与生态机制研究提供了理想的

全球尺度实验平台。

中国深度参与 GLEON 创建和国际合作，中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖站是 GLEON 早期成立的重要倡议单位，积极参与了 GLEON 的高频浮标监测、模型验证与国际比对研究等多项联合研究计划，是中国与 GLEON 网络合作最为密切的窗口。2010 年在国家自然科学基金委资助下在南京组织召开了第十一届 GLEON 会议，聚焦“高频自动监测技术在湖泊生态研究中的作用”。中国科学院南京地理与湖泊研究所的秦伯强、朱广伟、刘正文和肖曼等学者先后担任 GLEON 指导委员会委员，推动中西方湖泊科学研究深度融合。

GLEON 通过构建跨国界、跨学科的湖泊观测体系，建立了统一的数据采集、存储和共享标准，整合形成全球湖泊生态数据和开放数据库，汇聚生态学、气候学、水文学等领域专家开展跨学科协同创新，显著促进了全球湖泊合作研究和湖沼学发展，推动湖泊研究从单个湖泊向区域和全球湖泊拓展，从单一学科向系统科学研究转型。近年来气候变化对全球湖泊热力和溶氧分层强化及脱氧等许多创新性的研究发现都得益于 GLEON 观测数据支持以及多学科专家在项目研究和会议研讨过程中的相互启发^[53-56]。历经二十余年发展，GLEON 已从科研协作网络升级为全球湖泊观测、研究与治理的“数字基础设施”，其开放共享的数据与模型正助力湖泊气候变化适应、生物多样性保护及水资源可持续管理，服务联合国可持续发展目标实现。

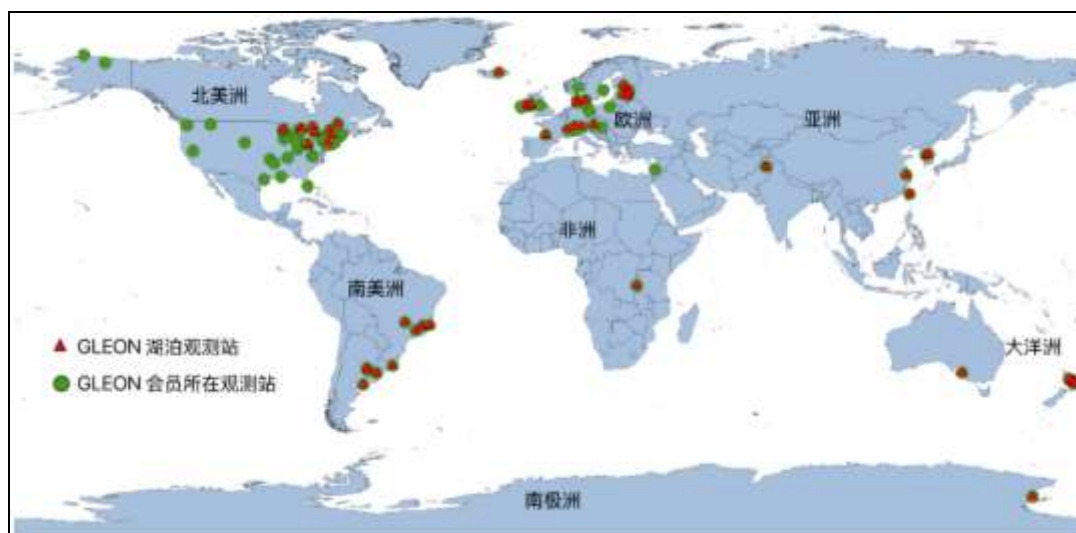


图 1 全球湖泊生态观测网络 (Global Lake Ecological Observatory Network, GLEON) 的湖泊观测站与会员所在的湖泊观测站的分布情况。其中，GLEON 会员所在湖泊观测站的数量统计截至 2016 年 (152 个)，GLEON 湖泊观测站的数量统计截至 2018 年 (86 个)。相关数据由美国 Cary Institute of Ecosystem Studies 的 Lisa Borre 提供

Fig.1 Distribution of lake observation stations under the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) and lake observation stations affiliated with GLEON members. Specifically, the number of lake observation stations affiliated with GLEON members was recorded as of 2016 (152 stations), while the total number of GLEON lake observation stations was recorded as of 2018 (86 stations). The relevant data were provided by Lisa Borre from the Cary Institute of Ecosystem Studies in the United States.

3 我国湖泊科学长期定位观测与试验研究

由中国科学院支持和领导的中国生态系统研究网络 (CERN) 于 1988 年开始建设，旨在通过对全国不同区域和不同类型典型生态系统的长期监测与试验，结合遥感与模型模拟等方法，研究我国生态系统的结构与功能、过程与格局的变化规律，开展生态系统科学评估、优化管理与示范应用，提升我国生态学及相关学科研究水平，为我国生态环境保护、资源合理利用和国家可持续发展及全球变化应对等提供长期、系统的科学数据和决策依据^[57-58]。历经 30 余年建设与发展，CERN 目前已经具备了完善的组织领导机构、较强的研究和监测队伍以及较好的观测基础设施，积累了系统的长期观测数据，并且已经开展了一系列的联网研究工作，在数据积累、过程机理、模型模拟和评估评价等方面均取得了重要进展。同时，CERN 现在已经成为我国生态学研究 and 人才培养的重要基地和全球生态研究和观测网络的一个重要

组成部分。当前，CERN 涵盖农田、森林、草地、荒漠、湿地、城市、湖泊、海湾 8 大类生态系统，建设有 44 个野外长期观测站，其中湖泊野外站有太湖站、鄱阳湖站、洞庭湖站和武汉东湖站，主要侧重于浅水湖泊水文与生物地球化学过程、富营养化与藻类水华、水生植被与湿地生态研究。

2001 年科技部启动国家重点野外科学观测研究试验建设，太湖站与武汉东湖站作为首批入选站点，率先构建起湖泊科学长期观测的国家级平台。此后，历经多年试点实践，2005 年国家在 CERN 基础上启动了国家生态系统观测研究网络(CERN) 建设任务。该网络以“整合资源、标准监测、数据共享”为核心目标，通过跨部门、跨行业的台站整合，建立起国家层面的科技基础条件平台。经多轮评估认证与遴选申报，目前纳入国家野外科学观测研究站序列的湖泊站点包括太湖站、鄱阳湖站、洞庭湖站、武汉东湖站、兴凯湖站、洱海站、梁子湖站及纳木错站（图 2），形成覆盖不同湖泊类型与地理区域的国家级观测网络。近年来，除中国科学院与科技部外，生态环境部、自然资源部、水利部、国家林草局等行业部门，以及湖北、云南、贵州等相关省份亦相继启动湖泊野外观测台站建设。同时，高校与科研院所所在不同区域代表性湖泊建立校/所级野外站，形成“国家级-部省级-校所级”三级联动的湖泊野外观测网络体系，实现从单点监测到区域网络、从基础数据到应用研究的全方位覆盖。当前湖泊野外站的蓬勃发展都得益于孙鸿烈、陈宜瑜、赵士洞等老一辈科学家倡导成立的 CERN 及其早期开创性的工作。

长期观测是基础，试验研究是支撑，各野外站围绕湖泊氮磷营养盐生物地球化学循环、蓝藻水华暴发机制、水生植被退化机理以及湖泊生态系统响应全球变化等开展了大量的试验研究，取得许多创新性发现。如武汉东湖站通过氮磷营养盐添加围隔实验，发现蓝藻水华对沉积物磷的泵吸作用，提出在富营养水体中低氮磷比往往不是蓝藻水华的原因而是结果的新观点^[59,60]；太湖站通过长期定位观测与中宇宙控制实验研究，发现亚热带大型浅水富营养化湖泊中藻类生长受到不同种类营养盐的季节性限制，在春季主要受到磷的限制，而在夏秋季节则受到氮、磷的同时限制，由此提出了控制蓝藻水华的“氮磷双控”策略和外源负荷削减目标，确定了蓝藻水华防控的氮、磷阈值分别为 TN 0.8 mg/L 和 TP 0.05 mg/L^[14,61]。

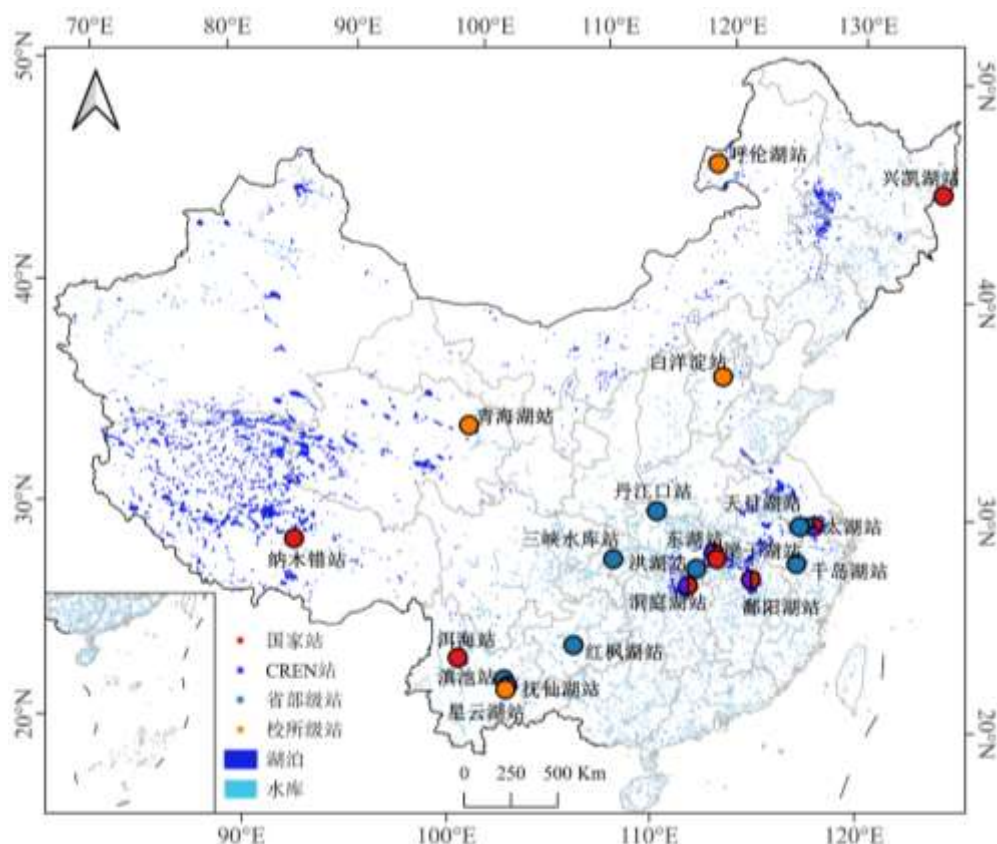


图 2 全国各类湖泊野外研究站空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of lake field stations at different levels

为促进长期监测数据与研究成果的开放共享,强化野外站在湖泊学科发展中的支撑作用,《湖泊科学》本期推出“野外站长期定位观测与试验研究”专辑。该专辑系统汇集太湖站、鄱阳湖站等野外站的综述性研究论文,集中展示各站点长期定位观测与试验研究的最新成果与突出进展。如太湖站聚焦大型浅水湖泊,揭示蓝藻水华成因机制,构建预测预警与防控管理体系,实现从“监测-预警-治理”的全流程技术突破,成为我国浅水湖泊治理的典范;鄱阳湖站立足“江湖关系”特色,解析极端水文情势(如丰水期洪水、枯水期干旱)的成因与灾害影响,提出基于水文-生态耦合的适应性管理策略,为长江中下游湖泊湿地保护提供科学支撑;武汉东湖站创新提出非经典生物操纵技术,通过调控浮游动物群落结构抑制蓝藻水华,结合生态修复技术实现城市湖泊富营养化防控,形成“监测-调控-修复”一体化技术体系,为城市湖泊生态修复与可持续管理提供实践范例。

4 展望

湖泊生态系统的长期定位观测与试验研究,已从单点描述迈向了多过程、多尺度整合的新阶段。面对全球变化加剧和人类活动深度干预的挑战,未来的工作需要在以下几个方向实现突破与融合,深化对湖泊复杂系统的认知,提升管理的科学性与预见性。

1) 推动跨区域跨流域联网观测,构建湖泊生态协同网络

当前,多数观测站点独立运行,数据的可比性和整合度较低,不利于揭示不同区域湖泊存在的普遍变化规律及不同类型湖泊的独特性。为突破传统单点观测的局限性,需围绕湖泊生态系统演化的关键过程与机制建立跨区域、跨流域的湖泊生态系统联网观测体系。这不仅是地理站点的连接,更是观测指标、方法、质控体系的深度统一。通过制定湖泊水文、水质、生物群落等核心参数的标准化观测规范,使不同区域不同类型湖泊的数据具有可比性。围绕气候变化和人类活动对湖泊生态系统影响的关键物理、化学和生态过程联网研究,为湖泊治理修复一湖一策实施、分区湖泊评价以及跨流域水生态管理提供科学依据。通过建立数据共享机制与联网分析中心,推动各区域监测数据的互联互通,实现从单点研究向全流域协同观测的跨越,提升对湖泊生态系统动态变化的整体认知能力。

2) 提升监测信息化与智能化水平:打造数字湖泊生态大脑

传统的人工采样和实验室分析方法已无法满足现代湖泊生态监测对高频率、多维度和实时性数据的需求,提升监测的自动化和智能化水平是湖泊生态系统观测必然要求。因此,未来的研究应着力提升监测的信息化和智能化水平,形成“数据收集—传输—分析—应用”的智能化系统。首先,在数据收集方面,应广泛应用高稳定性、低功耗的多参数原位传感器,如光谱法营养盐传感器、环境 DNA 生物传感器和高频气象水文传感器,实现对关键指标的分钟至小时级自动连续监测。其次,在传输与处理层,结合物联网和边缘计算技术,可以实现数据的无线实时回传和前端质控。人工智能与机器学习算法的引入将极大提高数据处理的效率,自动完成数据质控、缺失值补充、异常检测及初步模式识别,提升数据分析的精准度与可靠性。最后,通过构建数字孪生湖泊,将实时监测数据、多源卫星遥感、历史数据与社会经济数据深度融合,构建湖泊流域大数据和虚拟湖泊系统,深入理解湖泊复杂系统,实现动态模拟与预警。同时,开发智能监测平台,集成数据可视化、异常报警、决策支持等功能,使管理人员能够快速响应生态变化,提升监测效率与决策科学性,推动湖泊管理向智能化、精准化方向转型。

3) 强化观测与模拟模型耦合:深化湖泊生态过程机理认知

观测与模型是理解复杂湖泊生态系统的两大支柱,强化观测数据与模拟模型的耦合是深化湖泊生态机理研究的关键路径。首先,数据同化技术应被广泛应用,将高频、卫星遥感等多源的观测数据实时融入湖泊水动力-生态模型中,修正模型状态,提高模拟精度和短期预测的可靠性,例如藻华暴发的预测。其次,应深化对湖泊生态系统中关键生物地球化学过程的理解,发展和完善模型中碳氮磷循环、食物网交互等关键过程的参数化方案,提升模型的过程真实性和长期预测能力。通过将长期定位观测数据(如水文气象、水质、群落结构和生物量数据等)与生态过程模型(如水动力模型、营养盐循环模型)相耦合,可验证并优化模型参数,提高模拟结果的可靠性。这种耦合研究不仅能揭示湖泊生态过程的内在机制,还可为湖泊治理修复、水资源管理提供科学预测与决策支持。通过模型-观测的双向反馈,推动湖泊生态学从描述性研究向预测性、调控性研究转变,最终实现湖泊生态系统的可持续管理与保护。

4) 发挥湖泊作为模式系统的优势：推动生态系统重大基础理论突破

湖泊作为地球系统多圈层交汇点，其边界清晰、过程可追踪且易于人工操纵，使其成为孕育生态系统基础理论天然实验室和模式系统^[2,3]。历史上，湖泊长期定位观测研究已催生林德曼定律（能量传递效率）与稳态转换理论，这些理论不仅解释了湖泊生态系统的内在规律，更成为全球生态学研究基石^[1,29,30]。湖泊生态系统通过状态变化、弹性维持、韧性适应等方式响应全球变化和人类活动胁迫，因此基于长期定位观测与试验研究可以创新发展弹性（恢复力）与韧性（适应力）等生态系统退化与恢复的关键基础理论^[62,63]。未来需进一步明确湖泊生态系统弹性与韧性的多维量化指标，如生物多样性阈值、营养盐循环速率等，并揭示其内在作用机制，推动弹性理论从定性描述向定量预测跃升；构建高时空分辨率湖泊弹性、韧性与健康图谱，实现弹性状态的动态评估与预测预警；韧性提升则需探索基于自然的解决方案，创新生态工程路径，推动韧性理论从实验室走向湖泊恢复与保护实践。鉴于湖泊作为模式系统，其研究不仅关乎湖泊自身的保护与恢复，更承载着推动生态系统重大基础理论突破的使命。通过弹性与韧性等量化指标深化、时空图谱构建、生态工程创新，湖泊长期定位观测与试验研究将推动生态系统重大基础理论突破。

5 参考文献

- [1] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23(4): 399-418.
- [2] Loewen C J G. Lakes as model systems for understanding global change. *Nature Climate Change*, 2023, 13(4): 304-306.
- [3] Spears B M, Futter M N, Jeppesen E, et al. Ecological resilience in lakes and the conjunction fallacy. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(11): 1616-1624.
- [4] Graeber D, McCarthy M J, Shatwell T, et al. Consistent stoichiometric long-term relationships between nutrients and chlorophyll-a across shallow lakes. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 809.
- [5] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 2019, 574(7780): 667-670.
- [6] Zhang Y, Deng J, Zhou Y, et al. Drinking water safety improvement and future challenge of lakes and reservoirs. *Science Bulletin*, 2024, 69: 3558-3570.
- [7] Jeppesen E, Søndergaard M, Jensen J P, et al. Lake responses to reduced nutrient loading—an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwat Biol*, 2005, 50(10): 1747-1771.
- [8] Fastner J, Abella S, Litt A, et al. Combating cyanobacterial proliferation by avoiding or treating inflows with high P load-experiences from eight case studies. *Aquat Ecol*, 2016, 50(3): 367-383.
- [9] Kalff J. *Limnology: inland water ecosystems*[M]. Prentice Hall New Jersey, 2002.
- [10] Wetzel R G. *Limnology: lake and river ecosystems*[M]. Gulf professional publishing, 2001.
- [11] Elser J J, Devlin S P, Yu J L, et al. Sustained stoichiometric imbalance and its ecological consequences in a large oligotrophic lake. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, 119(30).
- [12] Posch T, Köster O, Salcher M M, et al. Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming. *Nature Climate Change*, 2012, 2(11): 809-813.
- [13] Kratz T K, Webster K E, Bowser C J, et al. The influence of landscape position on lakes in northern Wisconsin. *Freshwat Biol*, 1997, 37(1): 209-217.
- [14] Xu H, Paerl H W, Qin B, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnol Oceanogr*, 2010, 55(1): 420-432.
- [15] Qin B, Hu W, Gao G, et al. Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China. *Chin Sci Bull*, 2004, 49(1): 54-64.
- [16] Qin B, Li W, Zhu G, et al. Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China). *J Hazard Mater*, 2015, 287: 356-363.
- [17] Qin B. A large-scale biological control experiment to improve water quality in eutrophic Lake Taihu, China. *Lake Reserv Manage*, 2013, 29(1): 33-46.

- [18] Zhang Y, Qin B, Zhu G, et al. Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss. *Water Resour Res*, 2018, 54(7): 4319-4311.
- [19] Chen Y, Qin B, Teubner K, et al. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: Microcystis-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *J Plankton Res*, 2003, 25(4): 445-453.
- [20] Qin B, Zhang Y, Zhu G, et al. Eutrophication control of large shallow lakes in China. *Sci Total Environ*, 2023, 881: 163494.
- [21] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1229-1243.
- [22] Strötz L, Leppäranta M, Weckström K, et al. Ice phenology and thickness in small Arctic lakes: Field observations and mechanistic controls. *Water Resour Res*, 2026, 62(1): e2025WR041332.
- [23] Wang J B, Huang L, Ju J T, et al. Seasonal stratification of a deep, high-altitude, dimictic lake: Nam Co, Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2020, 584.
- [24] Ellis B K, Stanford J A, Goodman D, et al. Long-term effects of a trophic cascade in a large lake ecosystem. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(3): 1070-1075.
- [25] Xiong X, Tappenbeck T H, Wu C X, et al. Microplastics in Flathead Lake, a large oligotrophic mountain lake in the USA*. *Environ Pollut*, 2022, 306.
- [26] Devlin S P, Tappenbeck S K, Craft J A, et al. Spatial and Temporal Dynamics of Invasive Freshwater Shrimp (*Mysis diluviana*): Long-Term Effects on Ecosystem Properties in a Large Oligotrophic Lake. *Ecosystems*, 2017, 20(1): 183-197.
- [27] Magnuson J, Frost T. Trout Lake Station, a center for north temperate lake studies. *J Bull. Ecol. Soc. Am*, 1982, 63(3): 223-225.
- [28] Hanson P C, Carpenter S R, Armstrong D E, et al. Lake dissolved inorganic carbon and dissolved oxygen: Changing drivers from days to decades. *Ecol Monogr*, 2006, 76(3): 343-363.
- [29] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413(6856): 591-596.
- [30] Carpenter S R, Cole J J, Pace M L, et al. Early warnings of regime shifts: a whole-ecosystem experiment. *Science*, 2011, 332(6033): 1079-1082.
- [31] Scheffer M, Carpenter S R. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends Ecol Evol*, 2003, 18(12): 648-656.
- [32] Salcher M M, Neuenschwander S M, Posch T, et al. The ecology of pelagic freshwater methylotrophs assessed by a high-resolution monitoring and isolation campaign. *Isme Journal*, 2015, 9(11): 2442-2453.
- [33] Ostermaier V, Schanz F, Köster O, et al. Stability of toxin gene proportion in red-pigmented populations of the cyanobacterium *Planktothrix* during 29 years of re-oligotrophication of Lake Zurich. *BMC Biol*, 2012, 10.
- [34] Destasio B T, Hill D K, Kleinhans J M, et al. Potential effects of global climate change on small north-temperate lakes: Physics, fish, and plankton. *Limnol Oceanogr*, 1996, 41(5): 1136-1149.
- [35] Zanden M J V, Gorsky A, Hansen G J A, et al. Nine Lessons about Aquatic Invasive Species from the North Temperate Lakes Long-Term Ecological Research (NTL-LTER) Program. *Bioscience*, 2024, 74(8): 509-523.
- [36] Woodman S G, Khoury S, Fournier R E, et al. Forest defoliator outbreaks alter nutrient cycling in northern waters. *Nature Communications*, 2021, 12(1).
- [37] Maizel A C, Li J, Remucal C K. Relationships Between Dissolved Organic Matter Composition and Photochemistry in Lakes of Diverse Trophic Status. *Environ Sci Technol*, 2017, 51(17): 9624-9632.
- [38] Hsieh C H, Sakai Y, Ban S, et al. Eutrophication and warming effects on long-term variation of zooplankton in Lake Biwa. *Biogeosciences*, 2011, 8(5): 1383-1399.
- [39] Matsuzaki S S, Suzuki K, Kadoya T, et al. Bottom-up linkages between primary production, zooplankton, and fish in a shallow, hypereutrophic lake. *Ecology*, 2018, 99(9): 2025-2036.
- [40] Mills E L, Casselman J M, Dermott R, et al. Lake Ontario: food web dynamics in a changing ecosystem (1970-2000). *Can J Fish Aquat Sci*, 2003, 60(4): 471-490.
- [41] Michalak A M, Anderson E J, Beletsky D, et al. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(16): 6448-6452.

- [42] Hajnal E, Padisák J. Analysis of long-term ecological status of Lake Balaton based on the ALMOBAL phytoplankton database. *Hydrobiologia*, 2008, 599: 227-237.
- [43] Rhodes J, Hetzenauer H, Frassl M A, et al. Long-term development of hypolimnetic oxygen depletion rates in the large Lake Constance. *Ambio*, 2017, 46(5): 554-565.
- [44] Smeltzer E, Shambaugh A D, Stangel P. Environmental change in Lake Champlain revealed by long-term monitoring. *J Great Lakes Res*, 2012, 38: 6-18.
- [45] Anneville O, Gammeter S, Straile D. Phosphorus decrease and climate variability: mediators of synchrony in phytoplankton changes among European peri-alpine lakes. *Freshwat Biol*, 2005, 50(10): 1731-1746.
- [46] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(32): 11254-1258.
- [47] Edmondson W. Sixty years of Lake Washington: a curriculum vitae. *Lake Reservoir Management*, 1994, 10(2): 75-84.
- [48] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, 1977, 195(4275): 260-262.
- [49] Read J S, Hamilton D P, Jones I D, et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environ Model Software*, 2011, 26(11): 1325-1336.
- [50] Hamilton D P, Carey C C, Arvola L, et al. A Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) for synthesising high-frequency sensor data for validation of deterministic ecological models. *Inland Waters*, 2015, 5(1): 49-56.
- [51] Leach T H, Beisner B E, Carey C C, et al. Patterns and drivers of deep chlorophyll maxima structure in 100 lakes: The relative importance of light and thermal stratification. *Limnol Oceanogr*, 2018, 63(2): 628-646.
- [52] Weyhenmeyer G A, Obertegger U, Rudebeck H, et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nature communications*, 2022, 13(1): 4974.
- [53] Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 2021, 594(7861): 66-70.
- [54] Kraemer B M, Pilla R M, Woolway R I, et al. Climate change drives widespread shifts in lake thermal habitat. *Nature Climate Change*, 2021, 11(6): 521-529.
- [55] Woolway R I, Merchant C J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, 2019, 12(4): 271-276.
- [56] Woolway R I, Kraemer B M, Lenters J D, et al. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth Environment*, 2020, 1(8): 388-403.
- [57] 杨萍, 于秀波, 庄绪亮, et al. 中国科学院中国生态系统研究网络 (CERN) 的现状与未来发展思路. *中国科学院院刊*, 2008, 23(6): 555-561.
- [58] 孙鸿烈. 中国生态系统研究网络为生态系统评估提供科技支撑. *资源科学*, 2006, 28(4): 2-3.
- [59] Xie L Q, Xie P, Li S X, et al. The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms?. *Water Res*, 2003, 37(9): 2073-2080.
- [60] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms--an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake. *Environ Pollut*, 2003, 122(3): 391-399.
- [61] Xu H, Paerl H W, Qin B, et al. Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(2): 1051-1059.
- [62] Ibelings B W, Portielje R, Lammens E, et al. Resilience of alternative stable states during the recovery of shallow lakes from eutrophication: Lake Veluwe as a case study. *Ecosystems*, 2007, 10(1): 4-16.
- [63] Han Y Y, Lin Q, Huang S X, et al. Human impacts dominate global loss of lake ecosystem resilience. *Geophys Res Lett*, 2024, 51(11).