

千岛湖水域生态系统研究进展：基于野外站长期观测、研究与示范*

许海¹, 连纲², 吴志旭³, 朱梦圆¹, 李慧赞¹, 施坤¹, 张运林^{1,4}, 秦伯强¹, 朱广伟^{1,4**}

(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, 千岛湖生态系统研究站, 南京211135;

(2. 浙江省生态环境监测中心, 杭州310010;

(3. 杭州市生态环境局淳安分局, 淳安311700;

(4. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 水库作为一种人工湖泊, 在我国其数量和控制水量已接近天然湖泊, 是我国地表可调控静态水资源的重要组成部分。水库的水文过程、地形地貌及管控利用方式等与天然湖泊有所不同, 在生态学上兼具流水生态系统与静水生态系统的部分特征, 湖沼学机制有其独特性, 设立科学观测站开展水库生态系统长期生态观测、原位试验研究与修复技术开发, 对科学支撑水库生态环境安全保障与资源可持续利用具有重要意义。本文以中国科学院南京地理与湖泊研究所千岛湖生态系统研究站(简称“千岛湖生态站”)20年来对千岛湖水环境与水生态系统科学观测、试验研究与技术示范成果分析为例, 探讨了大型深水水库生态研究的成就、热点与难点。千岛湖生态站近5年的水质与生态指标监测表明, 千岛湖水质总体稳定在贫-中营养状态, 但关键水质断面仍面临水质不稳定、局部水域存在藻类异常增殖等生态环境风险; 热分层等水体生态环境指标的分层现象明显, 且存在显著的季节变化和年际波动; 研究表明, 增温、强降水事件、高温干旱等气象水文事件对千岛湖水质和生态影响甚大; 流域土地利用变化及水库渔业经营模式等人类活动对千岛湖水质与水生态影响深远; 此外, 基于千岛湖生态站开发的水库监测、水质与水华预警及库体生态修复等技术对我国类似水源水库的生态环境保护具有较高的示范价值。水源水库的成套水质安全保障技术、光热及水文水动力等水库物理环境变化机制及其生态学效应、大型水库的食物网结构及其生态调控技术、深水水库碳循环与温室气体排放机制, 以及水库水环境的数字孪生与AI智慧管控技术等是当前千岛湖水域生态系统的研究重点。

关键词: 人工湖泊, 热分层, 极端天气, 蓝藻水华, 生态渔业

Research progress on ecosystem of Lake Qiandao (Xin'anjiang Reservoir): Based on long-term observation, research and demonstration at Lake Qiandao Ecosystem Research Station

Xu Hai¹, Lian Gang², Wu Zhixu³, Zhu Mengyuan¹, Li Huiyun¹, Shi Kun¹, Zhang Yunlin¹, Qin Boqiang¹ & Zhu Guangwei^{1,4**}

(1: Lake Qiandao Ecosystem Research Station, State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

(2: Ecological and Environmental Monitoring Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310010, China)

(3: Chunan Branch, Hangzhou Municipal Ecology and Environment Bureau, Chunan 311700, China)

(4: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 211135, China.)

Abstract: Abstract: As artificial lakes, reservoirs in China have reached a scale comparable to natural lakes in both number and

*2026-02-28 收稿, 2026-04-10 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (U2340209, 42220104010) 资助。

**通讯作者: gwzhu@niglas.ac.cn

impounded water volume, constituting a crucial component of the country's manageable surface water resources. Their hydrological processes, topography, and management regimes differ from those of natural lakes. Ecologically, reservoirs exhibit hybrid characteristics of riverine and lacustrine ecosystems, resulting in unique limnological mechanisms. Establishing scientific observation stations to conduct long-term ecological monitoring, in-situ experiments, and restoration technology development is therefore essential for supporting the ecological security and sustainable resource use of reservoirs. Taking the Lake Qiandao Ecosystem Research Station of the Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences as a case study, this paper synthesizes achievements, research hotspots, and challenges in large deep-water reservoir ecology, based on two decades of scientific monitoring, experimental research, and technology demonstration related to the water environment and aquatic ecosystem of Lake Qiandao (Xin'anjiang Reservoir). Monitoring data from the station over the past five years indicate that the overall water quality of Lake Qiandao Reservoir remains stable within an oligotrophic to mesotrophic state, though key monitoring sections still face risks such as water quality instability and localized abnormal algal proliferation. Stratification of environmental indicators, particularly thermal stratification, is distinct, showing significant seasonal variation and interannual fluctuation. Research demonstrates that meteorological and hydrological events—including warming, heavy precipitation, and high-temperature droughts—significantly impact the reservoir's water quality and ecology. Human activities, such as changes in watershed land use and fisheries management, also profoundly influence its aquatic environment. Furthermore, technologies developed at the station, including reservoir monitoring, water quality and algal bloom early-warning systems, and ecological restoration methods, hold significant demonstrative value for protecting similar source-water reservoirs across China. Current research priorities for the Lake Qiandao aquatic ecosystem encompass: integrated technologies for safeguarding water quality in source-water reservoirs; mechanisms and ecological effects of physical environmental changes (e.g., light, thermal, and hydrodynamic processes); food web structures and ecological regulation technologies in large reservoirs; carbon cycling and greenhouse gas emission mechanisms in deep-water reservoirs; and digital twin and AI-based intelligent management systems for reservoir water environments.

Keywords: Artificial lake, thermal stratification, extreme weather event, cyanobacterial bloom, ecological fishery.

千岛湖, 也即新安江水库, 水深、库容大、水面开阔、水质良, 是我国大型深水水库生态系统中的典型代表^[1]。千岛湖地处我国东南丘陵山区钱塘江水系北支——新安江上, 大坝位于杭州建德的铜关峡, 是 1956 年 6 月 20 日国务院批准实施的我国第一个五年计划大型水利工程, 工程大坝于 1959 年 9 月 21 日截留蓄水形成水库^[2]。千岛湖水域主体位于杭州市淳安县, 达到设计水位 108 m 时, 水面面积 573.33 km², 库容 178.6×10⁸ m³, 平均水深 31.13 m, 最大水深 100 m, 设计死水位为 86 m^[3], 千岛湖深水区热分层现象明显, 存在冬季混合、其余季节稳定的热分层特征^[4]。

千岛湖在水库资源多功能开发与水环境保护方面开展了大量的引领性工作, 是水库生态资源开发与保护、生态修复理论与技术应用典范。作为“绿水青山就是金山银山”理念实践地, 千岛湖开创了全国首个跨省流域生态补偿机制, 是大库生态渔业养殖技术创新策源地。千岛湖是我国第一批开展水库渔业生产的水库, 1960 年水库建成之处, 就收获鱼产品 21 万斤, 以野杂鱼为主, 其中乌鳢占 60%, 同年投放青草鲢鳙鲤等 210 万尾, 发现鲢、鳙生长最好, 确定以鲢、鳙养殖为主开展渔业生产; 1964~1969 年共捕捞鲢鳙 1624 万斤, 野杂鱼 149 万斤, 鲢鳙占总产量的 90%^[5]。1998~1999 年千岛湖连续 2 年出现大面积蓝藻水华, 引起饮水异味, 研究认为与银鱼生产等有关, 自此千岛湖渔业模式转向“保水渔业”, 在高质量、可持续水库渔业生产方面开先河^[6], 2012 年全面取缔了投饵性的网箱养鱼, 保留更为生态的大库渔业养殖模式。千岛湖也是我国最早开发水库旅游的水库之一。1982 年千岛湖所在的富春江-新安江风景名胜区入选首批国家级风景名胜区, 1984 年正式更名“千岛湖”, 2001 年建成 4A 级景区^[7], 2010 年入选 5A 级景区。千岛湖在建库之初就是淳安县的饮用水源地, 也是最早开发饮用水产品的水库之一^[8], 因其库容接近太湖的 4 倍, 是长三角地区水量最大的湖库型战略水源地, 并于 2019 年 9 月正式向杭州市、嘉兴市供水, 供给人口超过一千万^[9]。在水生态综合保护方面, 2022 年 1 月 1 日杭州市人民政府发布实施《杭州市淳安特别生态功能区条例》, 开创了水源水库法制化保护新范式^[10]。

千岛湖的水质与水生态监测起步早, 数据积累丰富, 为千岛湖湖泊生态系统研究打下了良好基础。

千岛湖从 1985 年开始进行高锰酸盐指数(COD_{Mn})监测,1988 年开始进行总氮(TN)、生化需氧量(BOD₅)监测,1992 年开始系统开展总磷(TP)、浮游植物叶绿素 a(Chla)等富营养化指标监测^[11]。2001 年千岛湖入选我国首批 10 大流域 100 个重要断面自动监测站建设^[12],2002 年 12 月在千岛湖皖浙交汇处建成坞坑口水质自动监测站,成为我国最早开展水质断面自动化监测的大型水库。千岛湖也是国内最早探索水质与藻类在线监测浮标的大型深水水库。基于本文作者 2013 年提出的高频自动监测方案^[13],千岛湖 2016 年建成了以美国黄泉仪器公司(Yellow Springs Instrument Co., YSI)水质浮标为主的高频自动监测系统,基于自主研发于 2019 年投放了多套德国 BBE(bbeMoldaenke GmbH)藻类监测仪剖面自动监测系统^[4]。水生态系统监测方面,浙江大学、杭州市环境保护科学研究所等从 1998 年开展了连续 2 年的千岛湖浮游植物周年监测^[14],杭州市生态环境局淳安分局从 2002 年开始对千岛湖浮游植物、浮游动物开展逐月监测^[15];杭州市环境保护科学研究所虞左明等从 1999 年开始对千岛湖浮游动物开展周年监测^[16];2007~2008 年,上海海洋大学胡忠军等对千岛湖底栖动物开展了周年监测与分析^[17];千岛湖鱼类群落结构调查自 1960 年水库建成之后就持续开展,出版了相关专著^[18]。这些系统的水质与水生态监测与研究使得千岛湖成为我国水库生态系统研究基础最扎实水库之一。

中国科学院南京地理与湖泊研究所秦伯强等从 2004 年起就开始对千岛湖及其所在的钱塘江干流水质、藻类、生态渔业、自动水质与生态监测、水质预警等开展研究,并在千岛湖水环境保护实践中发挥了重要科技支撑。2020 年,在淳安特别生态功能区建设及“绿水青山就是金山银山”实践创新基地建设背景下,中国科学院南京地理与湖泊研究所与淳安县人民政府签署“千岛湖生态系统研究站”共建协议,在千岛湖西北库湾与中心湖区交汇的小金山大桥北侧设立千岛湖生态系统研究站(Lake Qiandao Ecosystem Research Station, QERS)(以下简称“千岛湖生态站”),参照中国科学院生态系统研究网络(CERN)中湖泊型野外站的观测方案对千岛湖开展规范的生态系统科学观测与研究^[19]。

千岛湖生态站的建站目标是立足千岛湖大型深水水库的生态学特点,面向国家湖泊-流域水安全战略,开展流域与湖体关键生态要素及其关键物质循环和能量流动过程长期定位观测与科学研究,建设国际一流的深水水库生态系统数据积累、科学研究、技术示范及学术交流平台。研究站特色学科包括湖泊物理过程与环境效应、生态系统过程与生物调控、污染物过程与水质安全及流域污染过程与调控等。本文基于生态站建站 5 周年的工作积累,对千岛湖近 5 年的生态系统监测成果以及近 20 年的研究进行综述分析,为千岛湖及类似湖库型水源地的生态系统保护提供科技支撑。

1 千岛湖生态环境现状与挑战

1.1 千岛湖生态站观测方案

参照 CERN 的湖泊生态调查观测与分析技术规范^[19],千岛湖生态站的常规观测方案按照水、土、气、生 4 类生态要素设置。其中,“水”的观测包括水文与水质。水文观测方面,在千岛湖生态站站区(靠近图 1 中的 QDL03 号点),设置自动气象观测站(芬兰 Vaisala WXT530 型)、太阳辐射计(Kipp & Zonen CMP3 型)、雷达水位计(VEGA PS61 型)、湖体温度链浮标(坎贝尔 CS212 型),分别获得逐时降水量(RF)、水位(WL)及水温(WT)剖面变化等水文信息。

水质方面,在千岛湖布设 9 个逐月采样点(图 1 中 QDL01~QDL09),每月月初开展调查,现场测定水深(WD)、水体透明度(SD)、水下辐射剖面变化(获得光衰减系数 K_d),用多参数水质仪及野外藻类分析仪测定 WT、电导率(EC)、Chla、溶解氧(DO)、浊度(Turb)、蓝藻密度、绿藻密度、隐藻密度及硅/甲藻密度等指标的剖面变化。在每个点位设置 4 层进行水样采集,分别为表层(L1,水下 0.5 m)、叶绿素 a 最大层(L2,一般 2~5m)、温跃层下(L3,一般 15~30 m)及底层(L4,泥上 2 m),采集水样带回实验室测定悬浮颗粒物(SS)、溶解性总有机碳(DOC)、COD_{Mn}、TN、溶解性总氮(DTN)、氨氮(NH₃-N)、硝态氮(NO₃-N)、亚硝态氮(NO₂-N)、TP、溶解性总磷(DTP)、磷酸根(PO₄-P)、Chla 等水质指标。

“土”的观测方面,则每 5 年开展一次底泥调查,在湖体 9 个采样点,采集底泥柱状样,自表层向下按照 1 cm、2 cm、2 cm、5 cm、5 cm、5 cm 等分层,将底泥冷冻干燥后测定有机质(OC_s)、总氮(TN_s)、总磷(TP_s)、活性磷(NaOH-P)及常见重金属含量。“气”的观测方面,在站区设置自动气象站(芬兰

Vaisala WXT530 型), 逐时采集风速 (WS)、风向 (WD)、气温 (AT)、气压 (AP)、湿度 (HD)、光合有效辐射 (PAR) 等气象信息。

“生”的方面, 与水样采集同步, 每月获得 36 个样品的浮游植物、浮游动物样品, 通过显微镜鉴定获得其群落结构数据; 每个季度获得 36 个样品的微生物样品, 测定细菌丰度; 每个季度开展 9 个样点的大型底栖动物样品, 解剖镜观察等获得底栖动物群落结构信息。

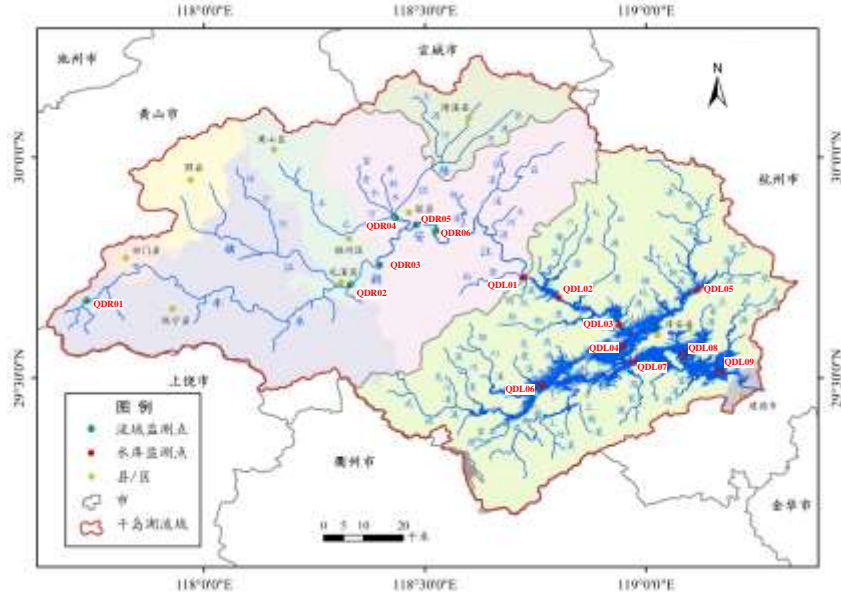


图 1. 千岛湖生态站流域水系及湖体采样点位图

Fig.1 Sampling sites in Lake Qiandao and major inflow river of Lake Qiandao Ecosystem Research Station.

常规监测之外, 千岛湖生态站还开展了流域土地利用变化的逐年遥感监测, 并在入流河道新安江干流从上而下设置大源河、屯溪、王村、南源口、淪潭村、街口 6 个断面及歙县太平桥共 7 个逐日采样点 (图 1 中 QDL01 及 QDR01~QDR06), 测定河水中各形态氮、磷及 COD_{Mn} 等水质参数。

1.2 千岛湖水生态现状与挑战

1.2.1 气候变化特征与挑战

1965~2025 年千岛湖流域淳安气象站年均气温、降水量和近 20 年汛期降水量变化如图 2。

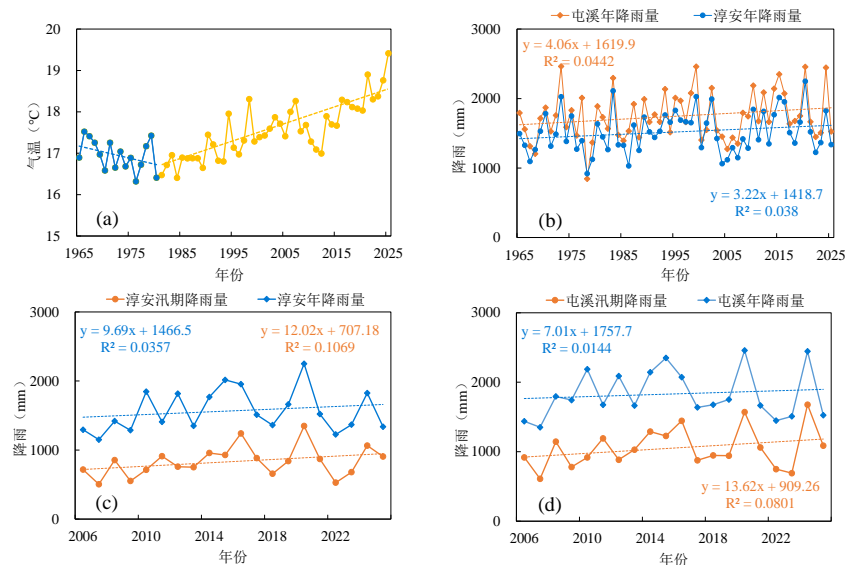


图 2. 千岛湖地区 1965~2025 年气温与降水量变化特征

Fig.2 Changes in air temperature and precipitation at Chun'an and Tun'xi meteorological stations (1965-2025)

2021~2025 年的年均气温处于过去 61 年中最高阶段（图 2（a）），特别是 2025 年的年均气温达到了 19.4℃，较气候变暖的拐点年 1981 年高 2.9℃。从 1981 年以来的 45 年中，年均气温的平均增幅达到 0.06℃/a。气温增高有利于蓝藻等水库有害藻类的滋生^[20,21]，对千岛湖的水生态安全带来挑战。

1965~2025 年千岛湖流域的降水量总体呈增加趋势，但这种增加的稳定性较弱，年际波动性很大（图 2（b））。进一步分析千岛湖流域屯溪、淳安两个站点近 20 年的汛期降雨量发现（图 2（c）（d）），千岛湖流域汛期降水量的增长斜率较年均值增长斜率相对更大表明近期降水在汛期的增加更明显，降雨的极端性增高。对于千岛湖这一山区水库而言，汛期降水量增加会加大流域径流汇集及泥沙、营养盐等外源物质入库风险，从而对水库水质与生态系统产生较强冲击^[22-23]，特别是在高温热浪等多重极端气候事件叠加背景下，湖库生态系统会受到更为深刻的影响^[24]，并给千岛湖水质与生态系统变化带来更多不确定性。

1.2.2 千岛湖水质现状与挑战

建站以来，千岛湖生态站监测获得千岛湖主要入流区至出水大坝的主要监测点位 QDL01、QDL03、QDL05、QDL07（图 1，分别为街口、小金山、三潭岛、金竹牌）主要水质指标月变化如图 3。过去 5 年千岛湖总体水质稳定，小金山、三潭岛、金竹牌等 3 个关键水质断面营养状态指数（TLI）总体处于贫-中营养水平。其中，5 年来街口的 TLI 均值为 40，小金山为 35，三潭岛为 30，金竹牌为 28。三潭岛至大坝的杭州引水工程取水关键区总体保持了贫营养状态（TLI<30）。杭州引水工程取水口金竹牌样点 5 年 60 次的调查中，TLI 大于 30 的数据为 22 次，占比约 37%，最大值出现在 2024 年的 7~9 月，分别为 37、38、37，与 2024 年汛期的洪水事件一致（图 2（c）），凸显了水库水质在强降雨冲击性时的脆弱性。丹江口水库 2021 年 10 月的大面积磷超标也是发生在强降雨之后^[25,26]，其机制与千岛湖的情况有所类似。

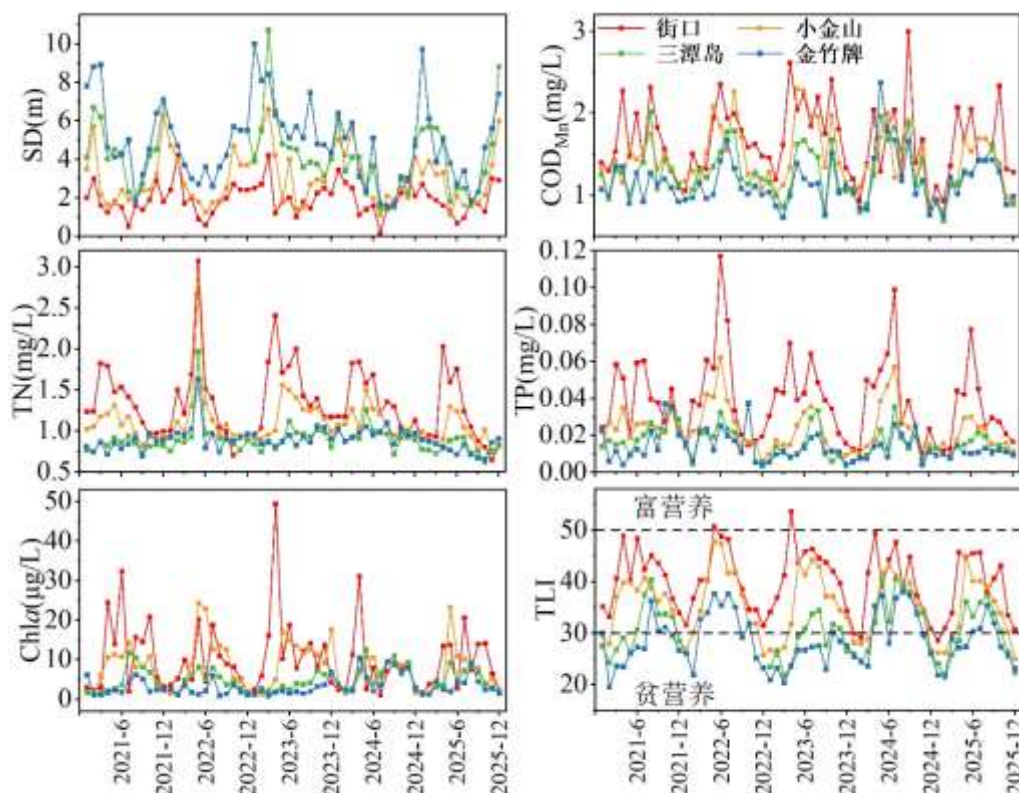


图 3 千岛湖 2021-2025 年典型监测点富营养化相关水质指标月变化

Fig.3 Monthly variation of key eutrophic parameters in major monitor sites of Lake Qiandao (2021-2025).

4 个断面的 SD 年变化巨大，其中金竹牌断面 SD 介于 1.5 ~ 10.0 m 之间，均值为 4.9 m，与其较好的水质状况一致。其最低值出现在 2024 年 8 月，与洪水事件密切相关。而三潭岛、小金山、街口的透明度 5 年均值分别为 4.2 m、3.0 m 和 1.9 m，表现出明显的自上游至大坝梯度增加、水质不断改善的趋势。

街口、小金山、三潭岛、金竹牌四个点位的 COD_{Mn} 均值分别为 1.66、1.43、1.27 和 1.16 mg/L，均

处于 I 类水范围；而 TN 的 5 年均值分别为 1.33、1.10、0.89、0.89 mg/L，三潭岛以上水域总体处于 IV 类，而三潭岛及其以下的东南库区总体处于 III 类；就 TP 而言，自上游至大坝的 4 个点 5 年均值分别为 0.038、0.023、0.016 及 0.014 mg/L，也呈现自上游至下游大坝不断改善趋势。需要说明的是，千岛湖生态站的 TP 测定在调查时的分层取水方案、样品前处理等方面与生态环境监测部门有所不同^[27]，一则包含了更深（靠近水泥界面的水层样品），二则预处理时是将包括藻颗粒、所有悬浮颗粒物在内的水样全部氧化分解测定，所以数据的绝对值上会比生态环境监测部门的数值偏高，但二者趋势基本一致，不影响长期变化规律分析。街口、小金山、三潭岛、金竹牌 4 个点位的 Chla 均值分别为 10.1、8.1、4.8 和 3.3 $\mu\text{g/L}$ ，但其季节波动性很大（图 3）。如金竹牌的最大值也达到了 10.4 $\mu\text{g/L}$ ，发生在 2024 年 4 月，反映出浮游植物异常增殖问题强烈的季节波动与突发性特征。

深水湖库的热分层季节性形成、发展与掺混过程构成了生态系统演替的重要物理基础。基于街口、小金山、三潭岛和大坝前（靠近金竹牌）的 YSI 浮标的水温剖面数据绘制了 2021~2025 年千岛湖关键断面的热分层变化过程（图 4）。由图可见，千岛湖水体热分层状况呈现出显著季节变化，温度和降水过程是热分层变化的关键驱动因子。全库区热分层通常始于 3 月末至 4 月初，7-8 月达到顶峰，11 月中下旬随气温下降逐步失稳，并于 12 月至次年 2 月完成全水柱均匀混合。空间梯度上，自入库口至大坝方向，水体由浅水河流型向深水湖泊型过渡，热分层在形成时间、温跃层深度及稳定性方面呈现递增强化特征。鸠坑口（水深约 20 m）受径流扰动显著，分层浅（约 7 m），垂向温差小（约 10 $^{\circ}\text{C}$ ），易被强降雨破坏。中游小金山（约 40 m）与三潭岛（约 45 m）温跃层深度下移至 10~15 m，底层水温能够长期维持在 12~15 $^{\circ}\text{C}$ ，分层稳定性增强。大坝前（水深 > 60 m），分层最为稳定，温跃层深度稳定于 15~20 m，底层（> 40 m）水温能常年稳定在 10 $^{\circ}\text{C}$ 左右，表底温差超过 20 $^{\circ}\text{C}$ ，基本不受强降雨过程扰动。此外，热分层的强度、形成与消散时间也存在明显的年际差异。2022 年受持续高温干旱影响，各断面温跃层强度及纵向延伸明显增强，2024-2025 年表层高温持续时间延长约 2 周，温跃层加深约 3~5 m，表明热分层期存在延长趋势。关于热分层及其他相关因子分层的年际变化，如 DO、Chla 等，构成了深水湖库水质与水生态演变中重要的变量。

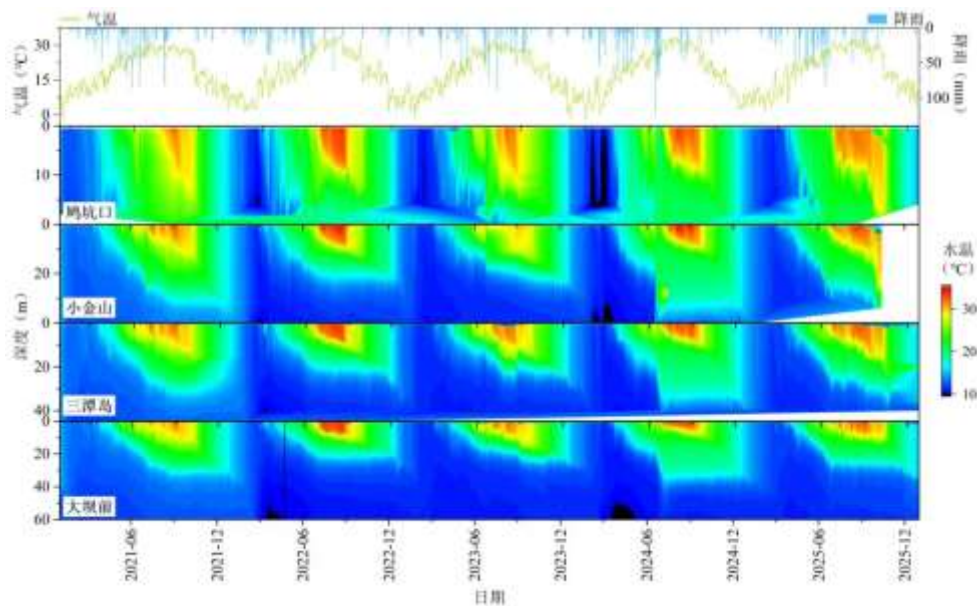


图 4 千岛湖主要监测断面 2021~2025 年的热分层变化

Fig.4 Thermal stratification changes in the main monitoring sections in Lake Qiandao Reservoir (2021 ~ 2025).

5 年的水质监测表明，尽管千岛湖主要断面的水质指标总体稳定，但是受降水过程、高温热浪等环境条件变化的影响，水质指标的时空波动较大，存在部分指标季节性超标、部分水域发生季节性藻类异常增殖的风险，仍需进一步加大保护和修复力度，保障水质安全。

1.2.3 千岛湖水生态现状与挑战

2021~2025 年街口、小金山、三潭岛及金竹牌 4 个点位 L1、L2 两层水体浮游植物细胞丰度、生物量均值月变化如图 5。由图可知，各点位细胞丰度、生物量月间变化很大，夏秋季大幅高于冬春季。其中，每年 8~11 月是局部水体浮游植物细胞丰度较高的季节，如街口断面，2021 年 8~10 月、2023 年 8~9 月、2024 年 8~11 月、2025 年 8~11 月细胞丰度均超过了 1×10^7 cell/L，出现了藻类“水华”风险（参照《水华遥感与地面监测评价技术规范（试行）》HJ-1098 2020）。而在金竹牌点位，2021 年 8 月、2023 年 11 月、2024 年 1 月、5 月、8~11 月及 2025 年 8~9 月浮游植物总细胞丰度也均超过了 1×10^7 cell/L，2024 年 8 月最高值时甚至达到 10.68×10^7 cell/L。年际之间，浮游植物的门类组成的变化大，蓝藻门细胞数变化是细胞丰度变化的主要贡献者。生物量方面，硅藻门和蓝藻门生物量的变化则共同主导了藻类总生物量变化。但在部分点位、部分月份，甲藻门、隐藻门也总藻类生物量中占据较大比重（图 5）。

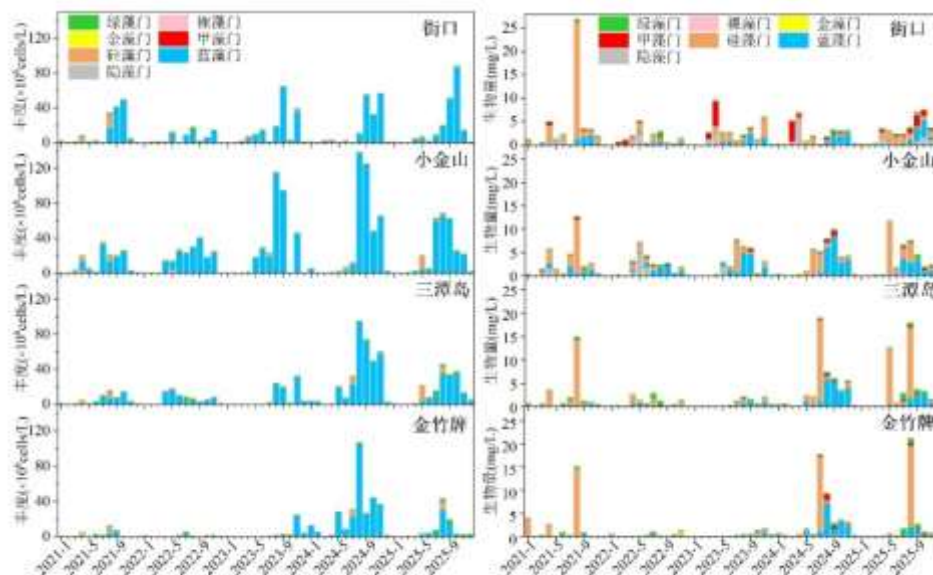


图 5. 千岛湖主要断面 2021~2025 年浮游植物各门细胞丰度（左）与体积丰度（右）的月变化

Fig.5 Monthly variation of cell and bio-volume densities of phytoplankton in main sites of Lake Qiandao (2021-2025).

假鱼腥藻和束丝藻是 2021~2025 年千岛湖的主要有害蓝藻属中的优势属（图 6）。从上游至下游 4 个点有害蓝藻的细胞丰度先增后降。小金山断面有害蓝藻的种类最多、变化也大。假鱼腥藻、束丝藻、细鞘丝藻、尖头藻等交替或者同时出现。而三潭岛和金竹牌有害蓝藻的总体生物量低，但值得关注的是 2024 年金竹牌的有害蓝藻细胞丰度也出现了显著增加的现象，从细胞丰度看，已达到了“水华”级（参照《水华遥感与地面监测评价技术规范（试行）》HJ-1098 2020），并在 2025 年有害蓝藻丰度也出现了明显峰值现象。

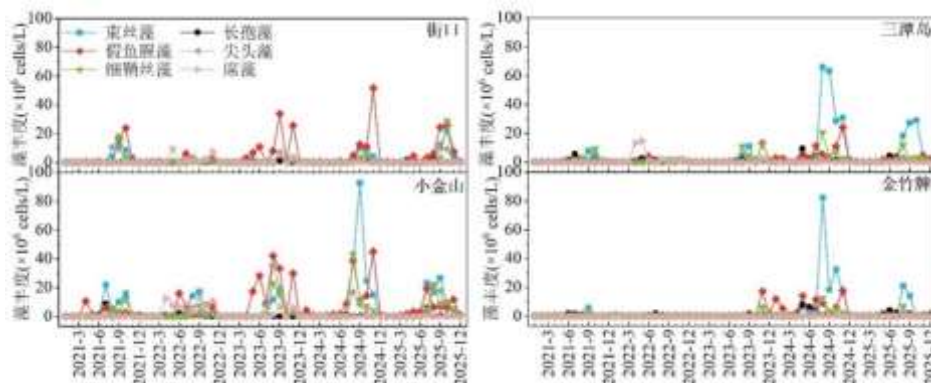


图 6. 千岛湖主要断面 2021~2025 年蓝藻门优势属细胞丰度月变化

Fig.6 Monthly variation of cell density of dominant species of cyanobacteria in main sites of Lake Qiandao (2021-2025).

2021~2025年4个点位及全湖平均的浮游动物主要类群——枝角类、桡足类及轮虫丰度的季度变化如图7。与浮游植物的情况相比，浮游动物的时空差异相对较小。总体而言，5年全湖枝角类的平均值为4.5 ind./L，而桡足类全湖5年均值为10.4 ind./L，大约是枝角类的一倍；轮虫的全湖5年均值为273 ind./L。不同点位的差别看，街口、小金山、三潭岛、大坝前枝角类的多年均值分别为10.6 ind./L、4.5 ind./L、2.5 ind./L、3.3 ind./L。街口断面的主要浮游动物丰度显著高于主湖区，推测可能与该水域的藻类生物量高、水体食物资源丰富有关。

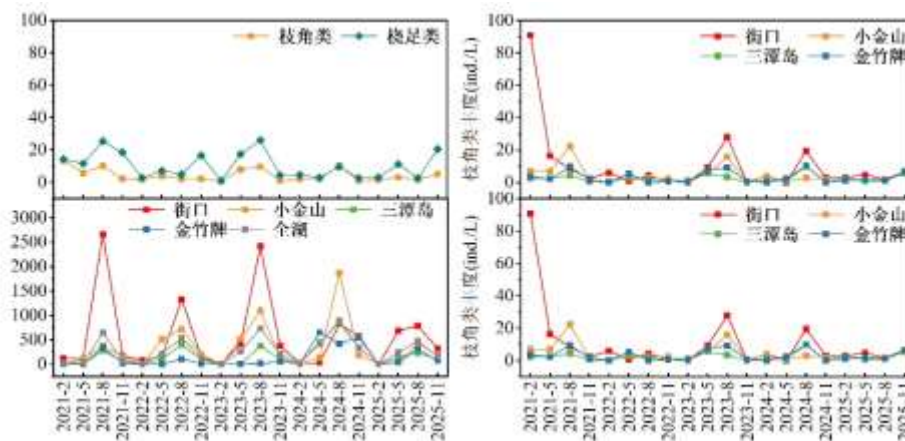


图7. 千岛湖主要点位浮游动物丰度的季度变化

Fig.7 Seasonal variation of zooplankton cell density in Lake Qiandao (2021-2025).

水深对湖库底栖动物的分布起着极其重要的影响^[28]。作为一个大型深水水库，千岛湖的底栖动物的生物量总体较低（图8）。由图8可知，从上游到大坝，随着深度增加，总体上大型底栖动物的单位面积生物量呈下降趋势，街口的5年均值为3.9 g/m²，而小金山为3.5 g/m²，三潭岛为2.2 g/m²，金竹牌则为0.5 g/m²。值得关注的是，2024年5月各个点位的底栖生物生物量都出现了个峰值。而小金山点位这在2025年5月达到最大值。与胡忠军等2007~2008年千岛湖网箱养殖上岸前的调查结果相比（平均生物量为0.54 g/m²）^[17]，近5年的生物量还是有明显增加的。长期的变化还有待进一步观测确定。

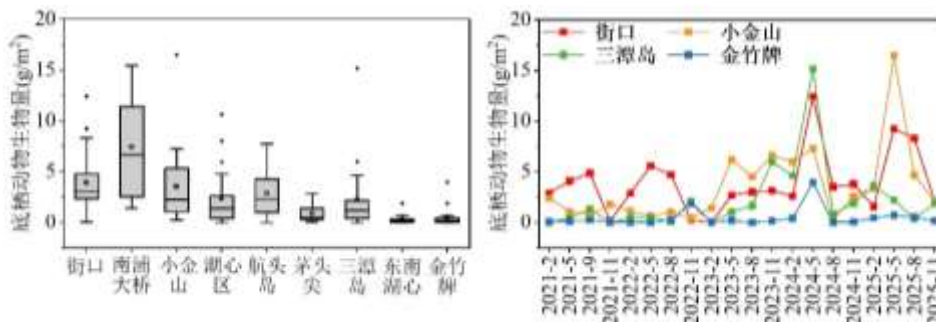


图8. 千岛湖主要点位2021~2025年大型底栖动物生物量季度变化

Fig.8 Seasonal variation of macrobenthos density in Lake Qiandao (2021-2025).

细菌丰度是湖库水体清洁度的一项指标。但细菌的时空变化极大，季节性观测只能提供初步的认识。2021~2025年千岛湖4个点位的总细菌丰度季度调查均值为 0.91×10^6 ind./L（图9），其中活性细菌的平均占比为12%。总体而言，越靠近大坝，细菌丰度越低，意味着水体清洁度越高，同时也说明细菌观测的结果能够在一定程度上反映水质变化，长期观测具有价值。5年来街口、小金山、三潭岛和金竹牌的平均细菌丰度分别为 1.23×10^6 、 0.93×10^6 、 0.79×10^6 和 0.69×10^6 ind./L。

从近5年的主要水质与生态指标监测表明，尽管千岛湖在流域保护、水库资源利用绿色化转型等方面开展了大量引领性工作，但千岛湖目前依然面临局部有害藻类异常增殖等生态风险问题。在世界性气候变化趋于更暖、更极端的背景下^[24]，千岛湖的生态系统依然面临灾变风险，生态系统安全挑战严峻，

持续、深入的生态系统观测与研究十分必要。

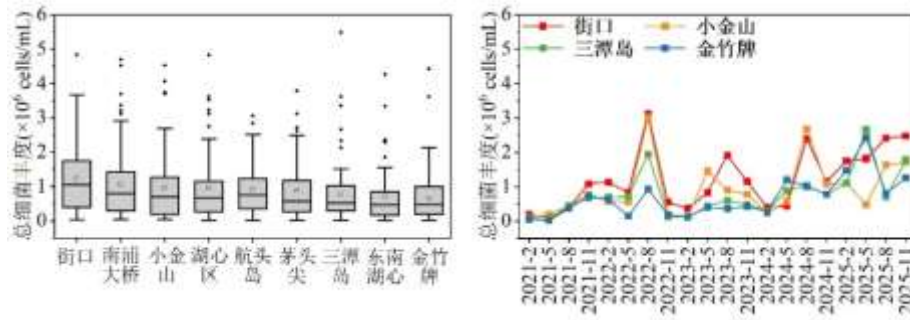


图 9. 千岛湖主要点位 2021~2025 年细菌丰度季度变化

Fig.9 Bacterial abundance in Lake Qiandao during 2021 to 2025.

2 千岛湖生态系统研究的主要认识

千岛湖生态系统研究站筹建期与正式运行已有 20 年的研究积累，在千岛湖生态系统演替驱动力、水质与藻类风险机制及保护对策等方面获得了有价值的成果。其中，主要认识包括如下 5 个方面：

2.1 气候变暖对千岛湖水环境与水生态产生了显著影响

千岛湖生态系统研究站通过对千岛湖流域气候背景和湖泊生态环境的对比分析发现，千岛湖流域过去 60 年气候变化显著（图 2），是千岛湖生态环境变化的重要驱动力之一。温度、光照、降水、换水周期、水深、热分层、水动力交换等物理条件背景是湖库生态系统结构与演替的重要条件，而气温、光照和降水等气候背景是这些水库物理背景条件变化的重要驱动力。

张运林等对千岛湖周边杭州、屯溪、衢州、玉山、金华 5 个气象站 1951~2012 年气温变化趋势分析发现，60 年来气温年均值增高了 1.2℃^[29]。通过对千岛湖 3 年周年热分层与气温构建关系发现，1.2℃ 的气温增高能够响应导致上层 0~2m 水层的水温年均值增高 0.8℃^[29]。而通过水温与透明度的关系分析发现，水温增高 0.8℃，因水体热分层引发的藻类上层聚集等因素能导致水体透明度年均值下降 0.78 m^[29]。李渊等进一步通过 Landsat 5、7、8 等数据，构建了表层水温的遥感反演模型，对千岛湖 1986~2021 年表层水温变化进行了回溯分析，发现 36 年来千岛湖表层水温平均增幅为 0.07℃/a，即 36 年的年均表层水温增加 2.52℃^[30]，较张运林等通过气温折算的水温增幅大，其中一个原因是水温的热容效应等^[31]。刘淼等基于 20 个月的 YSI 剖面浮标水温数据分析表明，千岛湖温度变化主导了热分层的季节性形成与消失过程^[32]。年际间气温等气候差异能对热分层、氧分层等过程产生明显影响^[32]，说明气候的年际差异会成为千岛湖水质与藻类等环境问题年际波动的重要驱动力。

温度升高通过改变热分层、水体垂向交换、生物生长物候等对千岛湖生态环境产生深远影响。张运林、刘淼等的研究发现，温度升高及其伴随的热分层加剧是千岛湖下层水体缺氧现象加强的重要驱动力^[30,33]，水体 DO 陡降的氧跃层深度与气温负相关，温跃层深度正相关^[33]，表明温度越高，底层缺氧层的厚度就越大。热分层与透明度等参数联合对千岛湖藻类的垂向分布影响深远。刘淼等通过对千岛湖水体 Chla 的垂向分布调查发现，千岛湖水体的 Chla 最大值均出现在次表层，也即存在次表层出现叶绿素 a 最大值的现象（Subsurface Chlorophyll Maxima, SCM），而 SCM 的深度与水体透明度和热分层深度密切相关^[34]，表明气候变暖导致的水库热分层变化对藻类生长空间会产生明显影响。

研究还揭示了极端增温事件，也即热浪事件对千岛湖等水质和生态过程的显著影响。黄群芳等分析发现 2016 年淳安的热浪是千岛湖上游蓝藻水华发生的重要条件^[35]，通过对淳安气象的分析发现，2016 年热天为 43 天，达到热浪条件的为 37 天，发生在 7 月 20 日至 8 月 26 日之间，结合叶绿素 a 的浮标高频监测和空间叶绿素 a 分布的遥感反演发现，热浪与局部水域的蓝藻水华密切相关^[35]。贺诗文等以建德气象站和桐庐气象站的气温数据为例，分析了 1980~2021 年的夏季热浪强度变化，发现总体热浪强度呈增加趋势，建德站的平均增幅是 0.374 d/a^[36]，也即在过去 41 年中，夏季热浪天数增加了 15 天，增幅显著；此外，热浪的年际差别又特别大，如 2016 年和 2022 年是典型的夏季热浪年，热浪天数分别达到了

43天和63天,成为给水库的水质和藻情年际波动重要变数。

2.2 强降雨过程能够通过多路径机制威胁水环境

千岛湖的水质安全高度依赖于其水文与生态过程的稳定性。近年来,在全球变暖与区域气候格局变化背景下,流域内短时强降雨事件频发,其角色已从传统认知中的背景扰动逐步演变为影响水质安全的关键致险因子。相较于长期营养盐负荷累积所引发的渐进式效应,极端气候事件通过瞬时物理强迫(如热分层强化、异重流形成)和脉冲式物质输入(如颗粒态悬浮物与磷的集中输送),可在短期内显著扰动湖库系统稳态,诱发蓝藻水华暴发、高浊度羽流扩散及中层低氧等多重风险。值得注意的是,此类影响常表现出滞后性与累积性特征,即事件发生后数日乃至数周内,生态系统仍持续承受压力,凸显了强降雨过程诱发水质风险机制的复杂性。

张毅博等聚焦于水文脉冲引发的悬浮颗粒输入及其所形成的浑浊羽流动态过程,提出可用于快速识别的遥感指标^[22],通过对2009~2014年间10次强降雨事件的浊度影响遥感反演发现,降雨后1日内形成浑浊羽流,并于2~3日内达到最大规模;其中2010年3月11日事件羽流面积达148.12 km²,为观测期内最大值,羽流区内平均总悬浮物(TSS)浓度为 6.61 ± 1.03 mg/L,显著高于背景水平(3.67 ± 1.34 mg/L);羽流面积与累积降雨量呈显著正相关($R^2 = 0.75, p < 0.001$),单位降雨量对应的羽流扩展速率约为 0.95 ± 0.54 km²/mm;多数事件中TSS浓度随距河口距离增大呈衰减趋势,但在洪峰极值条件下该规律弱化。

李慧赟等对2024年极端降雨事件的回溯分析进一步验证并拓展了上述结论(李慧赟,未发表数据):洪水期间,街口断面日均流量达3464 m³/s,峰值达8378 m³/s,16天累计入湖水量达47.9亿m³,占全年总量的43.2%;高频剖面数据显示,街口与小金山断面浊度峰值分别为382.2与214.5 NTU,且峰值出现的水深差异显著(分别为16 m与34 m),体现异重流前锋的空间推进特征;颗粒态磷占总磷比值在上述断面分别升至61.7%与55.5%,表明输入的磷以颗粒态为主,易随异重流存在于水体中层,使之具备对上层藻类生长层营养盐扩散补给的风险。

综上,强降雨通过高流量输入、强输沙效应、异重流传输等连续过程,不仅造成短期浊度骤升,更可能导致污染物垂向再分配与时间滞留,进而引发跨季节水质波动。强降雨事件与热浪事件叠加,更可能产生非线性放大效应,在风险预警与管理中应协同考量。

2.3 流域土地利用与人类活动对水库生态环境影响巨大

流域作为水库的“源”,其土地利用格局与人类活动强度深刻影响着入库水质的形成与演变。千岛湖流域地处浙皖交界山区,土地利用类型多样,农业活动与城镇发展交错分布,面源与点源污染复合叠加,使得氮磷输入具有显著的时空异质性和动态变化特征。厘清不同污染来源的贡献及其驱动机制,是实现千岛湖水水质精准管控的科学基础。

李渊等利用千岛湖1988~2016年1511个透明度人工观测数据率定了Landsat序列产品的透明度反演模型^[7],获得了千岛湖1986~2016年的透明度变化特征,并反演获得了千岛湖流域的土地利用结构年变化,归因分析表明,千岛湖透明度的下降与气温增高、降雨增强、建设用地面积增加、农田用地面积变化及城市污水排放量增加均有关系,其中建设用地的增加是对透明度下降贡献最大的一类土地类型,凸显了快速城镇化进程对水库水质的显著影响。

赵星辰等通过对千岛湖入流新安江不同河段氮磷浓度的周年监测进一步证明了城镇排污对千岛湖氮磷的显著贡献^[38]。通过2020~2021年对新安江水系及千岛湖水体氮磷浓度的季度调查,发现新安江TN浓度表现为冬季枯水期(1.96 ± 1.24 mg/L)>主汛期(1.63 ± 0.71 mg/L)>春汛期(1.42 ± 0.49 mg/L),而TP浓度表现为主汛期(0.101 ± 0.049 mg/L)>冬季枯水期(0.067 ± 0.068 mg/L)>春汛期(0.06 ± 0.033 mg/L),流经人口集中、城镇化程度高的屯溪区后,新安江TN、TP、NH₃-N浓度平均增幅分别为86.1%、77.7%和164.4%,纳入歙县城镇三大支流来水后,TN、TP浓度再次增高,平均增幅为47.6%、70.3%;统计分析表明,沿岸5 km缓冲区耕地和建筑用地面积占比与氮磷营养盐各形态浓度之间均存在显著正相关,其中建筑用地占比对NH₃-N浓度影响较大,耕地占比对NO₃-N影响较大^[38]。进一步结合¹⁵N同位素溯源技术^[39],揭示了千岛湖氮来源的季节变化,发现洪水期土壤侵蚀、化肥来源等非点源来源对千岛湖NO₃-N的贡献

可达 74%，而在非汛期时，城镇污水、畜禽粪便等动物排泄的氮来源则能达到 41%。因此，面源与点源污染协同控制，特别是城镇污水的深度处理对千岛湖氮污染控制具有重要的价值。

在流域尺度研究基础上，更为精细的山区河流硝酸盐来源解析进一步揭示了污染来源的空间异质性与季节性规律^[40]。通过氮氧双同位素（ $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ ）示踪结合 SIAR 模型，对千岛湖流域 4 条典型山区入湖河流（清平源、鸠坑溪、梓桐源、燕源）的研究表明，硝酸盐占 TN 的 63%~95%，其浓度呈现春季>冬季>夏季>秋季的季节变化，春季可达秋季的 3.2 倍^[40]。春夏季化肥和土壤氮贡献率较大（分别约 25%~51%和 23%~39%），与农业施肥周期高度吻合；秋冬季生活污水贡献率显著升高（约 26%~67%），但此时因降雨减少、径流量降低，实际氮浓度反而处于全年最低水平，揭示农业面源污染是千岛湖流域水体污染的最主要来源^[40]。不同流域因面积和土地利用差异，污染来源稳定性不同：面积较大的梓桐源（130.54 km²）和清平源（105.46 km²）各季节贡献相对稳定，而面积较小的鸠坑溪（44.34 km²）和燕源（19.14 km²）则波动明显，表明流域面积对污染来源具有重要的缓冲调节能力^[40]。

上述研究揭示了流域土地利用与人类活动对千岛湖水质的多尺度影响机制，为面源与点源协同控制、差异化精准治污提供了坚实的科学依据。

2.3 阐明了千岛湖碳氮磷多界面循环过程与埋藏机制

氮、磷、碳等营养盐对水库生态系统至关重要，摸清水库营养盐地球化学循环过程是水质保护和环境治理的前提。千岛湖生态系统研究站基于长期观测、模型模拟、沉积物捕获与同位素示踪等多手段联合，系统揭示了千岛湖碳、氮、磷营养盐在多界面的地球化学循环过程、收支平衡特征及其驱动机制。

千岛湖生态系统研究站基于长期观测和模型模拟结果，量化了千岛湖氮磷营养盐的收支过程。大型水库营养盐输入主要包括地表径流、大气沉降等，根据杭州市生态环境局淳安分局监测的千岛湖主要河道水质数据，结合流域模型模拟方法^[41]，估算了 2016~2023 年千岛湖 TN 年总入湖负荷量为 11687~32471 吨/年，平均值为 16481 吨/年，TP 年总入湖负荷量为 272~1836 吨/年，平均值为 645 吨/年；大气沉降 2020~2021 年周年观测结果则显示，千岛湖大气 TN、TP 沉降入湖负荷分别估算为 1042 吨/年和 20 吨/年^[42]。可见，作为山区水库，入库河道带来的氮磷输入负荷占千岛湖氮磷总输入负荷的 90%以上。千岛湖氮磷营养盐输出以大坝出流为主，此外还包括水厂输出、渔业捕捞移除等，以 2020~2021 年为例，通过大坝出流水量与水质监测数据估算得到大坝出流 TN 负荷量为 13920 吨/年，出流 TP 负荷量为 255 吨/年；千岛湖作为杭州千万人口饮用水源地，年供水量近 10 亿 m³/年，取水输出 TN 约 638 吨/年，输出 TP 约 11.6 吨/年；渔业捕捞移除的 TN 约 406 吨/年，TP 约 29 吨/年^[43]。综上，每年约有 1998~18334 吨氮和 33~1617 吨磷滞留在湖体中，其中部分营养盐沉降至库底。沉积物捕获器开展的周年观测表明，颗粒物沉降是磷截留的主要途径^[44]。根据 2018~2019 年千岛湖沉积物捕获周年实验数据，街口、小金山、大坝前 3 个点位的颗粒物氮年沉降量分别为 57.0、23.0 和 1.2 g/(m²·a)⁻¹，颗粒物磷年沉降量分别为 21.0、4.8 和 0.2 g/(m²·a)⁻¹，颗粒物沉降主要发生在上游至水库过渡区^[44]。这些沉降的氮磷会在高温、缺氧等适宜的条件下向上覆水释放。基于千岛湖沉积物营养盐释放模拟实验结果估算，氮释放速率均值为 4.7 mg/(m²·d)⁻¹，磷释放速率均值为 1.1 mg/(m²·d)⁻¹^[45]。¹⁵N 同位素示踪培养实验发现，千岛湖沉积物反硝化潜力总体较低，5 月各点位沉积物反硝化速率仅为 0.96~11.61 μmol/(kg·h)，8 月除街口在 25°C 时达到 68.41 μmol/(kg·h)外，其余点位仍处极低水平（许海等，未发表数据），意味着千岛湖水体氮素自净能力比较弱，水库中氮磷的长期截留累积及其内源释放风险需要关注。

极端天气带来的水库营养盐浓度短期升高对水质考核带来了挑战。以 2024 年 6 月 19 日至 7 月 4 日的 16 天降雨过程为例，一场降雨入库氮负荷为 8397 吨，磷负荷为 1226 吨，分别为多年年均负荷的 51% 和 1.9 倍。因此，如果不考虑降雨过程的断面磷考核目标是不现实的。千岛湖生态站基于研究成果，结合水文模型模拟提出了“扣除洪水影响”的水质考核建议，为千岛湖个别水质断面考核目标优化提供了理论支撑。

陆源碳输入驱动水体碳循环过程，其迁移转化与埋藏受水文事件调控。郑清等观测发现了千岛湖碳的时空分布特征：春夏季（5~8 月）总有机碳（TOC）储量平均值为 44611 吨，其中溶解性有机碳（DOC）占 86%，颗粒态有机碳（POC）储量平均值为 6159 吨；碳的变化受到外源输入和内源藻类生长的综合影

响^[46]。高频观测发现,暴雨事件显著增加陆源有机物输入,入流河口区溶解性有机质(DOM)荧光强度与入库流量呈显著正相关^[47-48]。强降雨输入溶解性有机物的生物可利用性更高,其降解过程大量消耗溶解氧,降解产物作为碳源进一步促进甲烷、二氧化碳排放^[49-50],引起了千岛湖碳排放模式的变化。陆源DOM输入后经历复杂的迁移转化:入流河口区微生物降解导致溶解氧消耗、pH下降^[49,51];部分DOM随密度流潜入中层形成碳富集层;剩余颗粒态有机碳逐渐沉降进入沉积物。沉积物捕获实验表明,碳的垂向输送主要发生在上游至过渡区,河流区颗粒态有机碳年沉降量 $5.2\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,至坝前降至 $0.3\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,体现了碳在水库中的空间截留特征^[44]。稳定同位素分析表明,暴雨后甲烷 $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 富集、碳同位素分馏系数(αC)降低至1.02,指示产甲烷途径从氢营养型向乙酸裂解型转变,沉降有机质厌氧降解产生的低分子量有机物可能为产甲烷提供关键底物^[49]。综合估算,千岛湖年碳排放约8200吨,其中高生物可利用性部分3000吨^[48]。

2.4 揭示了有害藻类长期演替特征与水华促发机制

传统研究认为,营养盐富集是驱动藻类群落演替和水华发生的主导因素^[52-53]。然而,近年来越来越多的研究表明,在营养盐本底较低的贫中营养水体中,物理过程(如水文扰动、热力分层)对藻类群落的调控作用可能超越营养盐本身^[20,54]。笮文怡等基于千岛湖2002~2017年浮游植物监测数据分析发现,近年来千岛湖藻类群落结构呈“蓝藻化”和“小型化”趋势^[55]。全年呈现硅藻/绿藻→硅藻/隐藻→绿藻/蓝藻→硅藻/绿藻的演替模式^[56]。基于藻类荧光分析仪(BBE Fluoro Probe)的剖面浮标高频监测发现,不同门藻类垂向分布有所不同:绿藻门主要聚集在1m左右的表层,蓝藻门和硅藻门则主要分布在3—5m的次表层^[4]。总氮浓度下降导致丝状蓝藻种类增加,说明不同蓝藻属对营养盐的响应存在差异——假鱼腥藻、尖头藻与总氮负相关,而长孢藻与总氮正相关,反映出蓝藻群落结构演替的复杂性^[55]。

暴雨事件扰动等对千岛湖藻类群落结构演替、蓝藻水华暴发具有重要促发作用^[57]。暴雨通过冲刷携带大量外源营养盐(尤其是磷)入库,同时强烈扰动水体,破坏热分层,增加浊度,在短期内暂时抑制蓝藻生长;暴雨后约20天,随着热分层快速恢复,水体稳定性和透明度回升,加之暴雨输入的遗留营养盐效应,蓝藻重新获得竞争优势,生物量再次占优,形成“抑制—恢复—促进”的阶段性响应^[57]。空间尺度上,暴雨对藻类的影响存在显著的湖区差异:河流区因流量激增、浊度高、光照受限而短期抑制,湖心区则因接纳更多营养盐而促进藻类生长;且暴雨强度越大,受影响的湖区范围越广^[58]。

垂向维度上深水水库特有的热分层能强化藻类的表层聚集作用。热分层通过提高表层水温、增强光照可利用性、限制藻类垂向分布等机制,将藻类“锁定”在较为光照充足的表层,当混合层深度(MLD)浅于真光层深度(约5m)时,藻类异常增殖或水华的风险增加;而暴雨洪水通过加深混合层、升高浊度破坏热分层,能导致藻类聚集暂时中断7—11天,形成“洪水-分层-水华”的时序耦合^[23]。国超旋等在富春江水库蓝藻水华发生机制研究时发现了类似现象^[59]。

基于对千岛湖蓝藻水华暴发机制的分析,运用分位回归模型,提出了千岛湖蓝藻水华防控的不同水华强度目标对应的TP浓度控制阈值(夏季水体Chla控制目标10~60 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时对应的TP浓度均值12.5~66.7 $\mu\text{g}/\text{L}$),以及相应的入湖负荷阈值^[60],提出了蓝藻水华风险防控的“分时预警(识别暴雨后20天风险窗口期)、分区断症(区分整体磷限制区与河口区氮磷共同限制区)、溯源控源(关注暴雨-热浪序列耦合效应及流域级联效应)”技术策略。

2.5 初步探索了千岛湖鱼类群落结构特征与生态效应

鱼类作为湖泊生态系统的顶级消费者,其群落结构变化可通过食物网的下行调控作用显著影响生态系统的结构与功能稳定性^[61]。许海等尝试运用eDNA宏条形码技术分别于2023年10月和2024年6月对千岛湖43个采样点开展了鱼类多样性调查^[62-63],共检出9目24科65属86种鱼类,其中鳙(*Hypophthalmichthys nobilis*)为绝对优势种,序列数占比90%。鲤形目构成千岛湖鱼类群落的主体,两次调查中鲤形目物种占比均超过60%,其次为鲈形目(占比约20%)。在科水平上,鲤科序列数占比最高(82.4%),其他依次为鳅科、鲢科和虾虎鱼科等。此外,调查还检出了齐氏罗非鱼、蓝鳃太阳鱼、大口黑鲈、尼罗罗非鱼等入侵物种。空间分布分析显示,鳙在千岛湖全域分布且数量占优,而鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)则集中分布在东北库区和西南库区的部分点位,少量分布在西北区,数

量较鳙少，分布区域相对局限^[63]。在垂直分布上，不同水层（表层 0~5 m、中层 15~25 m、底层 30~50 m）之间的物种多样性指数无显著差异，鱼类群落组成较为一致^[63]。结合鱼类生态习性分析^[64]，环境 DNA 检出的鱼类中约 60% 的鱼种的相对丰度与其偏好栖息水层呈现一致性，其中鲢和鳙主要分布在中上层，银鮠 (*Squalidus argentatus*) 主要在下层检出，珍稀鱼类如斑鳊 (*Siniperca scherzeri*) 则主要生活在中心湖区的中间水层。

朱广伟等在 2010 年对千岛湖淳安城区附近的投饵养殖网箱开展了水质影响调查，发现投饵型的网箱养殖对环境显著影响：网箱区表层 20 m 水柱的叶绿素 a 含量 (7.4 $\mu\text{g/L}$) 和浊度 (2.9 NTU) 均明显高于非网箱区 (1.0 $\mu\text{g/L}$ 和 1.8 NTU)，溶解氧饱和度 (67%) 显著低于非网箱区 (83%)；网箱区 3 m 处溶解氧饱和度就开始明显下降，而非网箱区直到 23 m 深处才明显下降；网箱养殖区底泥又黑又烂，有明显鱼粪、饲料残渣等有机碎屑物，表明投饵网箱养殖水库水质污染严重，水源地水库必须取缔。

3 深水湖库监测与修复技术开发示范

技术示范是野外科学观测研究站的一个重要功能。千岛湖生态站是多种水环境、水生态监测与修复治理技术的探索平台。近年来，千岛湖生态站参与开发了有关湖库水生态监测、预测预警与生态浮岛水库生态修复技术，并在千岛湖部分断面和水域开展了示范，为相关技术的推广提供了验证平台。

3.1 湖库水质监测技术示范

千岛湖水面宽广，总体水质优良，适合多种水质监测技术的探索研发。千岛湖生态系统研究站依托千岛湖的地面水质监测，开展了大量水质遥感反演算法的开发。如周永强等开发了利用水体溶解性有机碳光谱特征中 275/342 nm 波段吸收峰比值的方法提取入流点源污染信息^[51]。施坤等基于千岛湖的水体监测数据率定，开发出利用 Landsat 8 OLI 影像数据反演湖泊营养状态指数 TSI 的半分析模型 (Shi) 算法等^[65]。2013 年，中国科学院南京地理与湖泊研究所为千岛湖水水质水华监测设计了包括水质浮标在内的立体监测系统，指导地方环境监测部门在千岛湖布设了水质剖面监测浮标、藻类剖面监测浮标等剖面监测浮标技术，起到了较好的示范作用。

2020 年，张运林、施坤等人融合遥感监测优势与水质断面监测浮标优势，研制出高光谱近感水质仪技术^[66]。从 2022 年起，研发的高光谱近感水质监测产品在千岛湖鸬坑口监测站、千岛湖生态站、亚运场馆千岛湖水上运动场以及亚运会富阳水上运动中心等水域在线试运行 (图 10)，为该技术的应用推广提供是示范验证。

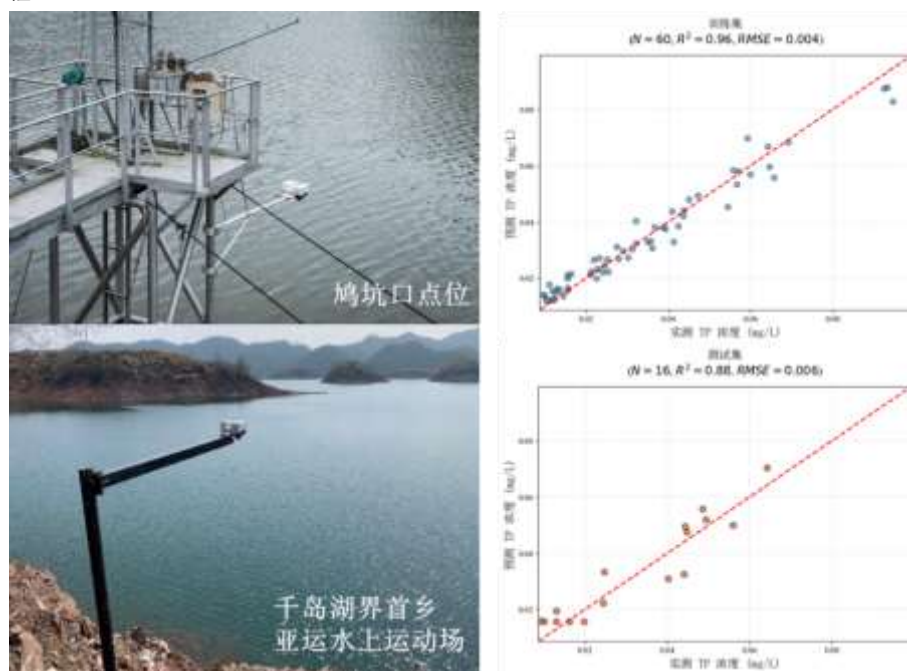


图 10 高光谱近感水质仪在千岛湖的布设及其对总磷的反演情况

Fig.10 Deployment of hyperspectral proximal water quality analyzer in Lake Qiandao Reservoir and retrieval of TP.

3.2 水库水质水华模拟与预测预警技术示范

针对深水型、多岛屿复杂地形水库（以千岛湖为典型代表）的水生态响应特征，李慧赞等创新性发展了流域水文-水库水动力水生态模型。该模型突破传统单一模块模拟局限，将流域产汇流过程、库区三维水动力输移、光热水环境演变、营养盐生物地球化学循环及藻类生态动力学全过程有机耦合，实现了水文-水动力-生态响应链的同步模拟。基于该模型开发了适用于深水水库的千岛湖水质水华模拟预测技术，在2019年在淳安生态环境分局的“秀水卫士”水质信息化平台上实现了业务化运行（图11）。



图 11 千岛湖水质水华预测预警系统在“秀水卫士”技术示范

Fig.11 Demonstration of Lake Qiandao water quality and algal bloom forecasting and early warning system on Lucid Waters Guardian platform.

该预警平台集成高频自动监测网络、卫星遥感影像解译、流域水文预报与库区生态模型四大技术模块，形成了人机交互式水库水质水华预测预警智能系统，采用决策支撑与场景模拟双轨并行架构，支持3~7天千岛湖水水质与蓝藻水华风险的滚动预测，逐日生成《千岛湖水水质水华预测预警报告》。系统自2019年9月投入业务运行以来，运行稳定，累计发布预警报告2100余期；2025年度实现365天准点交付，并深度对接淳安县“秀水卫士”数字治理中枢，实现监测、预警、联动与应急的闭环响应。

3.3 深水水库生态浮岛生境修复及水质净化技术示范

山区深水水库流域往往面临土地资源紧缺、山高坡陡的特殊地理条件，不但流域氮磷等营养盐的传统陆地拦截措施严重受限，还因巨大的消落带等问题导致水库本身的鱼类产卵场不足、生物多样性较低。针对该问题，千岛湖生态系统研究站开发了适用于深水水库的“生态浮岛”生境修复及水质净化技术，增加了深水水库的鱼类产卵场、鸟类栖息地等生境，并实现的氮、磷的部分去除。该技术在千岛湖及其流域水体、绍兴市汤浦水库、丹江口水库等地开展示范与推广（图12）。



图 12 生态浮岛生境修复与水质净化技术在千岛湖坪山水域示范

Fig.12 Technology demonstration of ecological floating island habitat restoration and water purification technology in the Pingshan Area of Lake Qiandao Reservoir

基于对示范水体及野外站的原位试验等观测研究发现，植物种类差异是影响净化效率的关键因素，黄花水龙和绿色狐尾藻的氮磷去除能力优于菖蒲，绿色狐尾藻体内氮、磷吸收量最高，分别为12.44~15.57 g/kg和0.96~1.95 g/kg^[67]。空心菜对水体氮素的净化能力显著高于粉绿狐尾藻，在最佳条件下（氮磷加富+40%遮光）对总氮的净去除效率达213.30 mg/(m²·d)，约为粉绿狐尾藻的4.66倍^[68]。针对深水水库下

层水体自净能力弱的缺陷，研发了人工介质强化技术，发现组合填料挂膜深度在 5 m 以内、挂膜时间 30 d 以上时反硝化潜力可达 $1.52\sim 1.71\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ，可作为植物浮床脱氮的辅助技术^[69]。开发了针对深水水库的“分区施策、植物优选、介质强化、科学刈割”生态浮岛立体生态修复模式：在氮浓度较高水域实施以空心菜为主并配套 40%遮阳网的浮岛植物；在氮浓度不高的水域，采用空心菜与粉绿狐尾藻混合种植及覆盖 40%和 75%遮阳网的技术组合，并增加人工介质悬挂至 5 m 水深以下，拓展脱氮空间；植物管理方面，水芹每 45 d 刈割其水上部分，绿色狐尾藻每 4 个月整株收割并资源化利用（如茶园覆盖）。该技术在千岛湖坪山库湾建成了 3000m²的技术示范区，取得了较好的环境、经济与社会效益，入选浙江省第二批全省生态环境系统共同富裕最佳实践名单，获中央电视台、新华社等权威媒体专题报道。

4 下一步研究重点

作为一个大型生态系统的野外科学观测研究站，千岛湖生态站还十分年轻，系统开展科学观测与研究的时间短，对千岛湖及类似大型湖库生态系统的科学认识还十分粗浅，许多科学观点还不成熟，仍需要持续开展大量的过程观测与专题研究，才能为大型湖库应对生态环境问题提供高质量的科技支撑。结合千岛湖生态环境保护与治理实践中的科技瓶颈问题，千岛湖生态站建议关注的研究重点包括如下 5 个方面：

(1) 水源水库的丝状蓝藻危害机制与防控技术。水源水库大多处于贫-中营养状态，富营养状态易滋生的微囊藻等球状有害蓝藻的竞争力弱于耐低磷的丝状蓝藻，如拉式尖头藻、浮丝藻、拟浮丝藻、假鱼腥藻等。这些丝状蓝藻能够产生与微囊藻不同的毒素，有些还能产生 2-甲基异茨醇、土臭素等异味物质，危害饮用水品质。丝状藻类能形成弥散性的水华，隐蔽性强，监测与分析困难，其优势形成与异常增殖机制的尚不明确，是当前水源水库有害藻类防控的难点。

(2) 深水水库物理环境变化的生态效应。光、热、水动力等物理条件是支撑水生态系统的基础。较强的水力交换和水动力扰动的水库生态学过程有别于一般湖泊的鲜明特色。气候变化引起的光、热、降雨等多重极端事件复合是全球湖泊生态系统面临的重要挑战^[23]。利用千岛湖这一典型的大型、深水、中-低营养水库开展物理生态学研究可为全球湖库应对湖泊物理环境变化的生态学挑战提供理论与技术支撑。研究重点包括极端气候事件的大型湖库生态学响应过程与机制，水库水力调度模式对热分层形成、维持与消失的定量影响，水文过程驱动下的藻类群落演替、底层缺氧动态及生态系统稳定性规律等。

(3) 大型深水水库的食物网结构、功能及其生物调控技术。食物网结构与功能是湖库生态系统稳定与水安全的内在因素。但大型深水水库的食物网结构对环境变化的响应十分复杂，是生态调控与生物操纵管理的难点。我国大多数水源水库存在鲢、鳙等滤食性鱼类养殖的历史，鲢、鳙等在水库生态系统中的优势度高，容易导致食物网简化、能量传递效率下降及生态系统韧性降低。科学认知水库食物网结构、功能及其环境响应机制是科学调控的前提，千岛湖生态站的未来工作建议强化营养级联效应的调控机理，探索通过优化鱼类群落结构实现有害藻类抑制的生态路径。同时，还应评估外来入侵物种的扩散风险及其对本土食物网的冲击，开发基于鱼类结构调控、水陆交错带恢复、人工鱼礁及生态浮岛等多重生物调控与生境修复技术，为我国大型水库的生态管理提供科技支撑。

(4) 流域污染过程与调控。千岛湖流域水系结构清晰，土地利用与河、库水质关系密切，流域生态环境保护意识高，农业、环保、管理等技术探索丰富，是开展流域-湖泊一体化研究的良好生态系统。下一步应加强气候变化与人类活动叠加影响下的流域污染过程及其对水库水质与生态系统的冲击研究，包括水土流失与泥沙输移过程、河流地貌及其污染净化过程、生源要素的流域输移与转化过程、新污染物等的产生与输移转化等，基于对水库流域污染发生、迁移、入库及其水质效应的认识，开发水库流域污染防控与治理技术，支撑水库生态环境保护。

(5) 水库水资源与生态环境的数字孪生与智慧管理技术。深水水库的复杂性与动态性对传统管理方式构成挑战，数字孪生与人工智能技术为实现精准、智能、前瞻的管理提供了新范式。千岛湖目前已经成为水库水文、水质与水生态信息化监测技术的热点试验场。未来应集成多源立体监测网络，发展融合物理机制与数据驱动的混合建模方法，实现水文、水质、生态过程的多尺度模拟与预测；构建具备“预报—预警—预演—预案”功能的数字孪生决策支持系统，支撑极端水文事件下水库调度、水质保障、生

态修复等多目标优化决策，为我国深水水库精准管理提供技术示范。

5 参考文献

- [1] Zhu G, Cheng X, Wu Z, et al. Spatio-temporal variation of nutrient concentrations and environmental challenges of Qiandaohu Reservoir, China. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 852-863. [朱广伟, 程新良, 吴志旭, 等. 千岛湖水体营养盐时空变化及水环境挑战. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 852-863.]
- [2] 《新安江水电站志》编辑委员会. 新安江水电站志. 杭州: 浙江人民出版社, 1993.
- [3] [陈马康, 何光喜, 陈来生. 千岛湖主要支流生态与渔业功能. 上海: 上海科学技术出版社, 2014.
- [4] Shi P, Zhu G, Li W, et al. Spatial-temporal variation of algal community in central of Qiandaohu Reservoir based on high frequency monitoring buoy data. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 908-817. [史鹏程, 朱广伟, 李未, 等. 基于高频监测的千岛湖湖心藻类时空变化研究. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 908-817.]
- [5] Scientific Research Institute of the 13th Regiment of Zhejiang Production and Construction Corps. Fishery resources survey of Xin'anjiang Reservoir. *Freshwater Fisheries*, 1974(11): 11-15. [浙江生产建设兵团十三团科研所. 新安江水库渔业资源调查. *淡水渔业*, 1974(11): 11-15.]
- [6] 刘其根. 千岛湖保水渔业及其对湖泊生态系统的影响[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [7] 夏必琴. 千岛湖旅游地演化进程及其机制研究[学位论文]. 芜湖: 安徽师范大学, 2007.
- [8] 罗丹, 梅洪常. 从“农夫山泉”看企业名牌战略的导向. *重庆商学院学报*, 2001(4): 76-77.
- [9] 赖勇, 张永进. 千岛湖配水工程概况及其前期论证关键问题探讨. *浙江水利科技*, 2017(6): 42-44,48.
- [10] 孟友军. 走出一条生态保护与产业发展共融之路. *政策瞭望*, 2022(2): 48-50.
- [11] Han W, Hu S, Jin W, et al. Study on water environmental quality investigation and protection countermeasures of Qiandao Lake. *Research of Environmental Sciences*, 1997, 10(6): 20-26. [韩伟明, 胡水景, 金卫, 等. 千岛湖水环境质量调查与保护对策研究. *环境科学研究*, 1997, 10(6): 20-26.]
- [12] Xi J, Wu H, Jiang H, et al. Current situation and suggestions for environmental monitoring capacity building in China. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2001, 13(6): 1-4. [席俊清, 吴怀民, 蒋火华, 等. 我国环境监测能力建设的现状及建议. *环境监测管理与技术*, 2001, 13(6): 1-4.]
- [13] Cui Y, Zhu G, Zhang Y, et al. High-frequency monitoring method for eutrophication indicators in lakes and reservoirs. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(5): 1178-1185. [崔扬, 朱广伟, 张运林, 等. 湖库富营养化指标的高频监测方法研究. *环境科学学报*, 2014, 34(5): 1178-1185.]
- [14] 严力蛟, 虞左明, 黄迅刃. 千岛湖浮游藻类的群落特征与优势种. *当代生态农业*, 2001(22): 84-88.
- [15] Da W, Zhu G, Wu Z, et al. Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1320-1333. [笪文怡, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2002—2017年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素. *湖泊科学*, 2019, 31(5): 1320-1333.]
- [16] Li G, Yu Z. Study on zooplankton community diversity in Qiandao Lake, Zhejiang Province. *Biodiversity Science*, 2001, 9(2): 115-121. [李共国, 虞左明. 浙江千岛湖浮游动物群落多样性研究. *生物多样性*, 2001, 9(2): 115-121.]
- [17] Hu Z, Sun Y, Liu Q, et al. Temporal and spatial distribution of profundal macrozoobenthic community in Lake Qiandao, Zhejiang, China. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 265-271. [胡忠军, 孙月娟, 刘其根, 等. 浙江千岛湖深水区大型底栖动物时空变化格局. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 265-271.]
- [18] 刘其根, 汪建敏, 何光喜, 等. 千岛湖鱼类资源. 上海: 上海科学技术出版社, 2011.
- [19] Niu D, Huang T, Yang P, et al. Construction and thinking of Chinese Ecosystem Research Network (CERN). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2006, 21(6): 466-471. [牛栋, 黄铁青, 杨萍, 等. 中国生态系统研究网络(CERN)的建设与思考. *中国科学院院刊*, 2006, 21(6): 466-471.]
- [20] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, et al. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16: 471-483.
- [21] Paerl H W, Huisman J. Blooms like it hot. *Science*, 2008, 320: 57-58.
- [22] Zhang Y, Shi K, Zhang Y, et al. River plume monitoring in a deep valley reservoir using HJ-1 A/B images. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 125031.
- [23] Zhang M, Zhang Y, Deng J, et al. High-resolution temporal detection of cyanobacterial blooms in a deep and oligotrophic lake by high-frequency

- buoy data. *Environmental Research*, 2022, 203: 111848.
- [24] Woolway R I, Zhang Y, Jennings E, et al. Extreme and compound events in lakes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2025, 6: 593-611.
- [25] Yin W, Wang C, Wang L, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of total phosphorus in Danjiangkou Reservoir. *Yangtze River*, 2023, 54(1): 1-7. [尹炜, 王超, 王立, 等. 丹江口水库总磷时空分布特征及其影响因素. *人民长江*, 2023, 54(1): 1-7.]
- [26] Qian Z, Bai F, Yang Z, et al. Attribution analysis of total phosphorus concentration increase in Danjiangkou Reservoir during 170m impoundment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, 34(11): 2564-2574. [钱竹隐, 白凤朋, 杨中华, 等. 丹江口水库 170m 蓄水期间总磷浓度升高归因分析. *长江流域资源与环境*, 2025, 34(11): 2564-2574.]
- [27] Zhu G, Guo C, Kang L, et al. Characteristics of algal bloom and water quality changes in Lake Taihu under Class III water quality background. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(3): 705-715. [朱广伟, 国超旋, 康丽娟, 等. 太湖水质达 III 类背景下藻情与水质变化特征. *湖泊科学*, 2025, 37(3): 705-715.]
- [28] Zhao C, Pan X, Wang X, et al. Hydrology and water quality factors driving spatiotemporal analyses of zoobenthos in a pilot city in China. *Ecohydrology*, 2020, 13: e2187.
- [29] Zhang Y, Wu Z, Liu M, et al. Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China. *Limnology and Oceanography*, 2014, 59(4): 1193-1202.
- [30] Li Y, Shi K, Zhang Y, et al. Warming lake surface water temperatures in Lake Qiandaohu, China: Spatiotemporal variations, influencing factors and implications for the thermal structure. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 995862.
- [31] Yang Y, Deng J, Woolway R I, et al. Lakes are experiencing more severe heatwaves than the atmosphere. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 959.
- [32] Liu M, Zhang Y, Shi K, et al. Thermal stratification dynamics in a large and deep subtropical reservoir revealed by high-frequency buoy data. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 614-624.
- [33] Zhang Y, Wu Z, Liu M, et al. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research*, 2015, 75: 249-259.
- [34] Liu M, Zhang Y, Shi K, et al. Spatial variations of subsurface chlorophyll maxima during thermal stratification in a large, deep subtropical reservoir. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125: e2019JG005480.
- [35] Huang Q, Li N, Li Y. Long-term trend of heat waves and potential effects on phytoplankton blooms in Lake Qiandaohu, a key drinking water reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 68448-68459.
- [36] He S, Zhang Y, Li N, et al. Summer heatwaves promote harmful algal blooms in the Fuchunjiang Reservoir, an important drinking water source. *Journal of Environmental Management*, 2024, 359: 121056.
- [37] Li Y, Shi K, Zhang Y, et al. Analysis of water clarity decrease in Xin'anjiang Reservoir, China, from 30-year Landsat TM, ETM+, and OLI observations. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125476.
- [38] Zhao X, Xu H, Kang L, et al. Nitrate sources and transformations in a river-reservoir system: Response to extreme flooding and various land use. *Journal of Hydrology*, 2024, 638: 131491.
- [39] Zhao X, Xu H, Yu J, et al. Impacts of urban distribution on nutrient concentrations in Xin'an River and Qiandaohu Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 864-876. [赵星辰, 许海, 俞洁, 等. 城镇分布对新安江水系及千岛湖营养盐浓度的影响. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 864-876.]
- [40] Zhang Z, Xu H, Jiang W, et al. Identifying seasonal variation of nitrate sources in mountainous rivers at the Qiandao Lake Basin based on nitrogen and oxygen isotopes. *Environmental Science*, 2025, 46(4): 2232-2241. [张子宁, 许海, 江威, 等. 基于氮氧同位素技术的千岛湖流域典型山区河流硝酸盐来源解析. *环境科学*, 2025, 46(4): 2232-2241.]
- [41] Li H, Wang Y, Shan L, et al. Effect of rainstorm runoff on total phosphorus loading into Xin'anjiang Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 887-895. [李慧贇, 王裕成, 单亮, 等. 暴雨径流对新安江入库总磷负荷量的影响. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 887-895.]
- [42] Zhu M, Cheng X, Zhu K, et al. Atmospheric deposition characteristics and flux of nitrogen and phosphorus in Qiandaohu Reservoir, China. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 877-886. [朱梦圆, 程新良, 朱可嘉, 等. 千岛湖大气氮磷干湿沉降特征及周年入库负荷. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 877-886.]
- [43] Xu H, Zou W, Zhu G W, et al. Impoundment-induced stoichiometric imbalance exacerbated phosphorus limitation in a deep subtropical reservoir:

- Implications for eutrophication management. *Water Research*, 2025, 269: 122787.
- [44] Shi P, Zhu G, Yang W, et al. Spatial-temporal distribution of suspended solids and its sedimentation flux and nutrients effects in Xin'anjiang Reservoir, China. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2137-2148. [史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 等. 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应. *环境科学*, 2020, 41(5): 2137-2148.]
- [45] 王铁森. 深水水库水体与沉积物营养盐分布特征及其影响因素研究[学位论文]. 南充: 西华师范大学, 2023.
- [46] Zheng Q, Li Y, Zhu G, et al. Spatio-temporal distribution and driving factors of organic carbon in Qiandaohu Reservoir during summer storm. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 887-895. [郑清, 黎云祥, 朱广伟, 等. 夏季强降雨期间千岛湖有机碳的时空分布特征及影响因素. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 887-895.]
- [47] Zhou Y Q, Zhang Y L, Jeppesen E, et al. Inflow rate-driven changes in the composition and dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a large drinking water lake. *Water Research*, 2016, 100: 211-221.
- [48] Zhou Y Q, Liu M, Zhou L, et al. Rainstorm events shift the molecular composition and export of dissolved organic matter in a large drinking water reservoir in China: High frequency buoys and field observations. *Water Research*, 2020, 187: 116471.
- [49] Li Y Y, Zhou Y Q, Zhou L, et al. Changes in water chemistry associated with rainstorm events increase carbon emissions from the inflowing river mouth of a major drinking water reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(22): 16494-16505.
- [50] Zhou Y Q, Zhang T, Zhou L, et al. Terrestrial organic matter inputs modulate methane emissions from a mega-reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(13): 6590-6599.
- [51] Zhou Y Q, Jeppesen E, Zhang Y L, et al. Dissolved organic matter fluorescence at wavelength 275/342 nm as a key indicator for detection of point-source contamination in a large Chinese drinking water lake. *Chemosphere*, 2016, 144: 503-509.
- [52] Schindler D W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science*, 1974, 184(4139): 897-899.
- [53] Smith V H, Wood S A, McBride C G, et al. Phosphorus and nitrogen loading restraints are essential for successful eutrophication control of Lake Rotorua, New Zealand. *Inland Waters*, 2016, 6(2): 273-283.
- [54] Stockwell J D, Doubek J P, Adrian R, et al. Storm impacts on phytoplankton community dynamics in lakes. *Global Change Biology*, 2020, 26: 2756-2784.
- [55] Da W, Zhu G, Wu Z, et al. Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1320-1333. [董文怡, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素. *湖泊科学*, 2019, 31(5): 1320-1333.]
- [56] Da W, Zhu G, Li Y, et al. High-frequency dynamics of water quality and phytoplankton community in inflowing river mouth of Xin'anjiang Reservoir, China. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 713-727. [董文怡, 朱广伟, 黎云祥, 等. 新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化. *环境科学*, 2020, 41(2): 713-727.]
- [57] Qiu Y, Xu H, Zou W, et al. Rainstorm regimes modulate cyanobacterial bloom dynamics in deep reservoirs: Synergistic effects of nutrient pulses and hydrological perturbations. *Limnology and Oceanography*, 2025, 70: 1-15.
- [58] Shi P, Zhu M, You R, et al. Rainstorm events trigger algal blooms in a large oligotrophic reservoir. *Journal of Hydrology*, 2023, 622: 129711.
- [59] Guo C, Zhu G, Paerl H W, et al. Extreme weather event may induce *Microcystis* blooms in the Qiantang River, Southeast China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 22273-22284.
- [60] Xu H, Zou W, Zhu G, et al. Impoundment-induced stoichiometric imbalance exacerbated phosphorus limitation in a deep subtropical reservoir: Implications for eutrophication management. *Water Research*, 2025, 269: 122787.
- [61] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413(6856): 591-596.
- [62] Li X, Wang J, Wu M, et al. Spatial distribution pattern and driving factors of fishes in Qiandao Lake based on environmental DNA. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2025, 20(6): 49-59. [李栩, 汪敬业, 吴铭杰, 等. 基于环境 DNA 的千岛湖鱼类空间分布格局及驱动因素研究. *生态毒理学报*, 2025, 20(6): 49-59.]
- [63] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 淳安县基于环境 DNA 技术的千岛湖水生生物群落结构特征解析项目成果专报[R]. 杭州: 杭州市生态环境局淳安分局, 2024.
- [64] Deng Y, Zheng Y, Chang J. Evaluation of the effect of stocking silver carp and bighead carp on the ecosystem of Qiandao Lake using Ecopath model. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6853-6862. [邓悦, 郑一琛, 常剑波. 利用 Ecopath 模型评价鲢鳙放养对千岛湖生态系统的影响.]

生态学报, 2022, 42(16): 6853-6862.]

- [65] Shi K, Zhang Y, Song K, et al. A semi-analytical approach for remote sensing of trophic state in inland waters: Bio-optical mechanism and application. *Remote Sensing and Environment*, 2019, 232: 111323.
- [66] Wang W, Shi K, Zhang Y, et al. A ground-based remote sensing system for high-frequency and real-time monitoring of phytoplankton blooms. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 439: 129623.
- [67] Tang W, Xu H, Zhan X, et al. Nitrogen and phosphorus purification effects of ecological floating bed in Qiandao Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(4): 926-935. [唐伟, 许海, 詹旭, 等. 生态浮床对千岛湖水体氮磷净化效果研究. *环境科学研究*, 2022, 35(4): 926-935.]
- [68] Ni Z, Xu H, Zhan X, et al. Comparative research on nitrogen removal efficiency of two floating bed plants in deep reservoir of southeast hilly region. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(1): 123-136. [倪子怡, 许海, 詹旭, 等. 东南丘陵山区深水水库两种浮床植物脱氮效率对比研究. *湖泊科学*, 2024, 36(1): 123-136.]
- [69] Cheng X, Tang W, Xu H, et al. Enhanced nitrogen removal by denitrification in deep reservoirs using artificial media. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(10): 1927-1936. [程新良, 唐伟, 许海, 等. 深水水库人工介质强化脱氮作用研究. *环境科学研究*, 2023, 36(10): 1927-1936.]