

长江流域水生生态系统长期定位观测与试验研究:进展与挑战*

徐力刚^{1,2,3**}, 徐波^{4**}, 苏驰⁵, 李相虎¹, 姚静¹, 程俊翔¹, 蒋名亮¹

(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, 北京 100049)

(3: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

(4: 国家科技基础条件平台中心, 北京 100038)

(5: 中国科学院科技基础能力局, 北京 100864)

摘要: 长江是中华民族的母亲河, 是中华文明的重要发祥地, 也是支撑中国经济社会高质量发展的核心命脉, 长江经济带高质量发展在根本上依赖于长江流域优良的生态环境。长江流域水生生态系统长期定位观测是统筹推进长江水资源、水环境、水生态保护与修复的基本前提, 对流域水生生态系统科学和长江大保护国家战略实施具有重要科学意义。本文系统总结了国内外水生生态系统长期定位观测与试验研究进展和经验, 回顾了长江流域水生生态系统长期定位观测与试验研究的发展历程及重要成果; 系统梳理了国家野外站支撑长江流域水生生态系统安全联合观测研究行动(2023-2025年)实施以来, 在长江流域水生生态系统基础数据整编、观测技术规范编制、水生生态系统变化研究、共性问题联网观测试验、应用示范以及国际合作等六个方面取得的工作进展和成效。针对未来的长江流域水生生态系统长期定位观测研究面临的问题与挑战, 提出了未来长江流域水生生态系统长期定位观测与试验研究的发展趋势和亟需加强的重点方向。本研究为长江流域水生生态系统保护修复的科学研究与管理决策提供了基础认知, 也为大型流域水生生态系统长期定位观测研究提供了参考案例。

关键词: 长江流域; 水生生态系统; 野外站; 长期定位观测; 联网研究

Approaches to long-term monitoring and experimental research on aquatic ecosystems in the Yangtze River Basin: progress and future challenge*

Xu Ligang^{1,2,3**}, Xu Bo^{4**}, Su Chi⁵, Li Xianghu¹, Yao Jing¹, Cheng Junxiang¹ & Jiang Mingliang¹

(1: State 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 Science, Beijing 100049, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(4: National Science and Technology Infrastructure Platform Centre, Beijing 100038, P.R.China)

(5: Bureau of Basic Capacity for Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, P.R.China)

Abstract: The Yangtze River, celebrated as the Mother River of the Chinese nation, constitutes a vital cradle of its civilization and a critical lifeline underpinning the nation's economic and social development. The high-quality development of the Yangtze River Economic Belt is fundamentally reliant on the superior ecological environment of its basin. Long-term, fixed-site observation of the basin's aquatic ecosystem provides the essential foundation for coordinating the protection and restoration of its water resources, water environment, and aquatic ecology. It is also of major scientific importance for advancing watershed aquatic ecosystem science and

* 2026-01-00 收稿; 2026-03-11 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2024YFE0106400)、国家自然科学基金项目(42501149, U2444221)和江西省科技计划项目(20252ABF010001, 20244BCF61001, 20252BAC230006)联合资助。

** 通信作者; E-mail: lgxu@niglas.ac.cn; xubo@most.cn

supporting the implementation of the national Yangtze River Conservation Strategy. This paper systematically reviews progress and experiences in the long-term fixed-site observation and experimental research on aquatic ecosystems within major river basins globally and in China. It outlines the developmental history and key achievements of long-term observational and experimental studies on the Yangtze River Basin's aquatic ecosystem. Furthermore, the paper summarizes the progress and outcomes realized since the initiation of the Joint Observation Research Initiative for Aquatic Ecosystem Security in the Yangtze River Basin (2023–2025). Supported by national field stations, this initiative has advanced the compilation of foundational datasets on the water ecological environment and the development of specialized technical standards for aquatic ecological observation. In response to the challenges confronting future long-term observation research in the Yangtze River Basin, this paper proposes forthcoming development trends and highlights priority areas requiring strengthening in subsequent fixed-site observation and experimental studies. This work provides a fundamental scientific basis for research and management decisions pertaining to the protection and restoration of the basin's aquatic ecosystem, while also offering a referential case for long-term in situ hydrological and ecological observation studies in large river basins worldwide.

Keywords: Yangtze River Basin; aquatic ecosystem; field station; long-term monitoring; networked research

水生态系统长期定位观测是一种面向复杂生态系统演变过程的研究范式，其核心在于围绕具有代表性的固定空间位置，对水生态系统关键要素开展持续、多年际的系统观测^[1-2]。与阶段性调查或常规环境监测不同，长期定位观测强调时间序列的连续性和空间位置的稳定性，关注的不仅是水生态系统在某一时刻的状态特征，更是其在不同水文情势和环境背景下的长期变化趋势、阶段性特征及潜在转折过程。通过长期连续的数据积累，该研究范式为识别水生态系统演变规律和理解复杂生态响应提供了必要基础^[3]。水生态系统长期定位观测以多要素协同为基本特征，观测对象涵盖水文、水质、生物群落及其栖息环境等多个层面。这种多维度观测设计有助于系统刻画水生态系统结构与功能的整体状态，并揭示不同要素之间的耦合关系与协同变化过程。与此同时，长期定位观测通常配合针对性试验研究，通过观测发现规律、通过试验验证假设，从而进一步阐明水生态系统演变的驱动机制和因果关系。水生态系统长期定位观测具有重要的科学价值和突出的现实意义。从科学层面看，该研究范式有助于深化对水生态系统长期演变过程及其驱动机制的认识，推动相关研究由状态描述向过程分析和机制解释转变；从实践层面看，连续、稳定的长期观测数据为流域水生态保护与修复成效评估、水资源调控及生态管理决策提供了可靠的背景参照和趋势判断依据，有助于避免管理决策建立在短期波动或偶然观测结果之上，从而提升流域水生态治理的科学性与前瞻性^[4]。

长江是中华民族的母亲河，也是支撑中国经济发展的核心命脉。长江流域是我国自然地理格局和经济社会发展体系中最具综合性和代表性的流域，其生态状况在全国生态安全格局中具有基础性和全局性意义^[5-7]。作为我国流域面积最大、干支流体系最为复杂的河流系统，长江流域横跨多气候带和多地貌单元，孕育了河流、湖泊、水库和湿地等类型多样、结构复杂的水生态系统^[8-11]。这些水生态系统在维系水生生物多样性、调节物质循环与能量流动以及支撑区域生态系统功能方面发挥着不可替代的作用，是认识大型流域水生态系统结构特征及其演变规律的重要研究对象^[12-15]。国内外学者从长江流域整体和生物多样性保护角度，对长江水生态系统的完整性和复杂性进行了系统阐述^[11,16-17]。作为我国人口、产业和城镇高度集聚的核心区域，长江流域在粮食生产、渔业供给、水资源保障、航运交通和区域协调发展等方面发挥着不可替代的基础支撑作用，其水生态系统状态直接关系到流域内经济活动的稳定性和社会系统的可持续运行^[18-20]。

在气候变化和人类活动持续增强的背景下，长江流域水生态系统正经历显著而复杂的长期演变过程。水文情势变化、工程调控和土地利用调整等因素不断改变水生态系统的运行条件^[21-22]，而水生态系统对这些扰动的响应通常具有时间累积性、空间异质性和滞后特征^[23-24]。长江水生态系统的持续变化已不再局限于生态问题，而逐步演变为兼具生态风险与社会经济风险的复合问题，这使得从更长时间尺度和系统视角认识长江流域水生态系统的演变过程成为当前水生态研究亟需关注的重要科学问题。近年来，围绕长江流域水生态系统的观测与研究不断增加，相关研究已由对状态特征的描述逐步转向对长期

演变规律及其驱动机制的探讨，这对水生态系统观测试验的监测方法和技术体系等提出了更高要求。在此背景下，本论文对长江流域水生态系统长期定位观测与试验及相关研究进行了系统梳理与综合评述，厘清了其发展脉络，结合国家野外站支撑长江流域水生态系统安全联合观测研究行动（2023-2025年）取得的初步进展，对长江流域水生态系统长期定位观测研究发展趋势进行了展望，以为长江流域水生态系统后续研究的深化和相关保护实践提供更加清晰的科学认识基础。

1 流域水生态系统长期定位观测研究进展

1.1 基于网络的水生态系统定位观测研究

全球生态定位监测体系大致包括两类：以长期生态研究网络 LTER/ILTER 为代表的自下而上的长期生态研究网，以及美国国家生态观测站网络 NEON、澳大利亚陆地生态系统研究网络 TERN、德国陆地环境观测站网络 TERENO、欧洲综合碳观测系统 ICOS、中国生态系统研究网络 CERN 等为代表的自上而下建设的大陆或国家级观测网络。LTER 监测网络通过全球数百个长期生态站和社会-生态平台，为理解和管理气候变化、土地利用变化等驱动下的生态系统提供了时空数据和试验基础，侧重长期机制与试验^[25]。NEON、TERN、TERENO、ICOS、CERN 等监测网络则提供标准化、连续的大陆/国家尺度观测，并与 LTER/ILTER 紧密衔接^[26-27]。

流域水生态定位观测站是生态观测网络在水文水生态尺度上的基本单元和关键节点。一方面按照统一指标和数据标准，融入多网络共址；另一方面通过高频过程监测和试验研究，为理解水文过程、检验趋势、校验模型提供多要素基础数据，支撑流域的防洪、供水和生态服务管理，为流域污染治理、生态修复和政策评估提供科学依据。流域水生态定位观测站不仅服务于流域的长期水生态观测，纳入国家尺度的水生态监测网格，同时支撑国家级的大尺度水生态调查及评估。

美国国家水生资源调查 NARS 是美国环境保护局（EPA）主导的一项全国性水质水生态监测与评估项目。NARS 在全国范围内随机选取代表性监测点，针对沿海、河流、湖库和湿地进行调查评估。调查采用统一的野外采样、实验室分析方法和质量控制程序，于每年夏季对全国上千个站点进行同步观测^[28]。目前已提供超过 20 年的化学、物理和生物数据，具体指标包括底栖大型无脊椎动物、鱼类、植被、浮游动物、营养物质浓度、沉积物化学、土壤化学、栖息地、微囊藻毒素浓度等。典型研究案例如：基于美国 2000 多个湖泊和河流站点的 NARS 数据，开展摇蚊幼虫的氮稳定同位素值 $\delta^{15}\text{N}$ 分析，追踪和量化流域尺度的氮来源及氮移除过程^[29]。

2014-2018 年，欧盟资助开展了管理多重压力下的水生生态系统和水资源项目 MARS^[30]。针对城市和农业土地利用、水力发电和气候变化等压力，在水体尺度上，通过多因素试验和长时间序列分析，研究压力因素相互作用的机理及其对水资源、水生态和生态系统服务的影响；在流域尺度上，针对欧洲 16 个河流流域，采用建模和经验分析方法，刻画多重压力源与生态功能服务和水资源之间的关系，重点关注大型跨界河流、湖泊和鱼类，为欧盟《水框架指令》WFD 的第三次流域管理计划提供支撑。

欧盟资助的大型实验性中宇宙设施跨国访问计划 AQUACOSM-plus (<http://www.aquacosm.eu>, 2020-2024)，是欧洲在水生态系统实验研究领域的一项基础设施网络项目，整合了欧洲 60 多个顶尖的实验设施，涵盖了河流、池塘、湖泊、河口和海洋系统，可开展过程研究、长期数据趋势分析或生态系统响应研究。通过提供跨国访问支持、促进设施间的方法标准化和数据共享，以及协调联合实验活动来推动欧洲水生生态学研究。

1.2 国内外重要流域水生态系统长期定位观测与试验研究

美国典型的长期生态水文定位观测流域哈伯德布鲁克实验林（Hubbard Brook Experimental Forest, HBEF）是全球最著名的长期生态系统与小流域研究站之一，自 1955 年建立、1963 年启动“哈伯德布鲁克生态系统研究”（HBES），以小流域为试验单元，持续开展至今。首次提出了流域生态系统概念，量化了营养盐通量变化^[31]，成为全球实验流域范式。其小流域试验与长期连续观测相结合的模式已在全球多地复制。

英国普林利蒙 Plynlimon 流域是英国乃至欧洲最典型的长期定位观测与试验流域之一^[32]，自上世纪

60年代起,重点研究植被、大气沉降和气候变化对水量与水质、水文过程的影响。通过连续多年代的水量平衡、水化学与同位素及高频监测数据,系统揭示了森林与草地用水差异、酸沉降及其恢复、水龄与汇流路径等关键水文水化学过程^[32-35],为当今流域实验站和观测网络的设计提供了可直接借鉴的范式,其公开的数据库已成为全球实验流域和水生态-水化学建模的重要基准。

维也纳自然资源与生命科学大学(BOKU)的实验性研究森林站点 Rosalia,于2015年构建了完整的生态水文实验流域,开展了多尺度、多学科观测系统,以研究水、能量和溶质运移过程,监测指标包括水文气象数据及四个剖面不同深度的土壤含水量和温度,并逐步增加了营养盐 and 同位素数据等^[36]。卢森堡的魏尔巴赫 Weierbach 试验流域,自2009年起连续监测降水、土壤水、地下水 and 河水通量与化学及同位素组成,以揭示流域地表地下水的转换和相互作用^[37]。基于欧洲水生态环境观测整合数据系统(水信息系统 WISE6)的研究表明,近年来欧盟污染物超标情况更为严重,鱼类和水生无脊椎动物的风险显著增加,其中农药为主要的风险驱动因素,而农业土地利用是整个欧洲地表水生态风险的主要空间驱动因素^[38]。总体而言,欧洲的水生生态系统完整性仍面临严重威胁,监测数据存在空间异质性问题。

我国首个流域尺度的生态系统长期定位观测试验“黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验”HiWATER,构建了多尺度、一体化观测系统,开展了基础试验、专题试验、应用试验,形成了系列遥感产品和数据系统^[39-40];其建立的国际领先的“多尺度观测-尺度转换-遥感验证”一体化方法论框架,为后续大型观测实验提供了范本。我国其他典型案例如:黄河流域在河口湿地、重要水源涵养区、典型污染河流等关键生态区建立了长期研究站,监测指标涵盖水文水质、物理生境和水生生物等^[41];海河流域内已设置了两百多个采样点,涵盖干流和较大支流的上、中、下游,并在如白洋淀、滹沱河和潮白河等重点区域增设了密集的监测站点^[42]。

2 长江流域水生态系统长期定位观测与试验研究

2.1 长江流域水生态系统定位观测与试验研究的发展历程

长江流域水生态系统定位观测与试验研究的发展历程,是在借鉴国内外小流域试验与长期连续观测相结合模式基础上,参考国际标准化的联网观测体系,从单站点向网络化方向发展,从为工程评估服务到为揭示生态系统功能和过程服务,是一条紧密契合国家战略需求、伴随科技进步而不断深化拓展的系统性科学能力建设之路。其演进脉络深刻反映了我国在流域生态环境认知与管理理念上的升华,大致可分为三个特征鲜明的历史阶段^[43-45]。

第一阶段(1950年代至1990年代):工程驱动下的零散观测与数据奠基期。此阶段的观测工作并非源于系统的生态认知,而是主要服务于流域内大规模水利水电工程(如丹江口水库、葛洲坝工程等)的规划、建设与初期运行评估。观测活动呈现鲜明的“点状”和“问题响应式”特征,高度集中于工程坝区及邻近河段。观测内容以工程水文(流量、水位、泥沙)和基础理化水质(如pH、溶解氧、部分重金属)为核心,水生生物方面则仅限于与渔业资源相关的简单调查。方法手段依赖传统的人工船测、岸边采样和实验室分析为主,除水文水质监测数据序列外,其余生态相关观测数据存在序列不连续、标准不一的问题。尽管如此,这一阶段积累了关于长江本底水文情势、部分河段水质及鱼类资源的首批宝贵资料,为后续研究提供了不可或缺的历史参照基线,并初步孕育了工程影响下的生态问题意识。

第二阶段(1990年代至2010年代):系统网络化建设的奠基与框架形成期。随着全球可持续发展思潮兴起及国内对生态环境问题的日益重视,特别是三峡工程论证与建设带来的空前广泛的生态影响关注,长江水生态观测在借鉴 LTER 和 NEON 等站点联网理念基础上,观测由站点扩展到区域和大陆尺度,进入了“网络化”建设新阶段。以中国科学院中国生态系统研究网络(CERN)为代表的国家级科学观测网络规划实施,推动了一批具有地理代表性(覆盖江源区、上游干支流、中下游通江湖泊、河口等)和生态关键区(如三峡库区、太湖、鄱阳湖、洞庭湖等)的生态系统定位观测研究站相继建立或升级,形成了沿水文梯度与生态系统类型的空间观测网络。观测目标从单纯的工程影响评估,转向对流域典型生态系统结构、功能与过程的长期监测与揭示。观测指标体系得以系统扩展,在延续水文水质监测的同时,将浮游动植物、底栖动物、水生维管植物、鱼类等生物群落监测纳入常规,开始了真正意义上的多要素、

综合性生态观测。数据采集的规范化、标准化和长期连续性得到显著加强，一个覆盖长江上、中、下游及生态关键区的定位观测网络框架基本形成。

第三阶段（2010年代至今）：技术融合与多维拓展的深化期。在此阶段，长江水生态系统观测工作迎来了技术革命的浪潮，并积极响应国家“生态文明建设”和“长江大保护”的战略转向。传统地面观测与遥感（RS）、地理信息系统（GIS）、自动传感器网络、环境DNA（eDNA）生物监测、声学探测等新技术深度融合，观测的时空尺度被极大拓展。卫星遥感实现了对全流域水温、浊度、叶绿素a浓度及藻华范围的大面积动态反演；高频在线传感器实现了对关键水质参数的实时、连续监测；eDNA技术为生物多样性，特别是珍稀濒危和隐匿物种的快速普查提供了新利器。与此同时，观测的科学内涵进一步深化，从现象描述更多转向过程机理探究，如营养物质生物地球化学循环、水文过程与生物生命周期的耦合效应、生态系统碳汇功能等。观测目标也更加明确，直接服务于长江流域系统治理与高质量发展的科学支撑和重大管理决策。

2.2 长江流域水生态系统定位观测网络建设与相关研究

经过几十年的发展，目前围绕长江流域水生态系统监测而建设的省部级以上野外站点达52个，其中13个为国家野外科学观测站，其余主要分布在中国科学院、水利部、生态环境部、自然资源部、国家林业和草原局等部门（图1）。纵观整个发展历程，长江流域水生态系统定位观测工作将小流域实验、标准化联网观测、多重压力分析等国际经验，结合长江流域跨度大、水体类型多样、人类活动干扰复杂的特点进行落地应用，已实现了从服务于单一工程到服务于全流域生态系统健康、从人工离散采样到智能连续感知、从单纯数据采集到信息知识服务的根本性转变。在持续几十年的观测积累中，长江流域水生态系统研究也取得了若干标志性进展^[46-47]。首先，在深化重大工程生态效应科学认知方面，基于长期的定位对比观测与控制实验，揭示并量化了三峡工程及梯级水库运行带来的复合生态效应，包括水文情势变化对泥沙淤积、下游河道冲刷、河口三角洲演变的影响以及水库滞温效应对鱼类产卵物候的干扰等。这些发现不仅深刻改变了国际社会对大型水库生态影响复杂性的理解，更直接催生并优化了以促进鱼类自然繁殖、保障下游生态需求为目标的生态调度实践，推动了水利工程从单一功能向生态友好型运行的范式转变。其次，在生物多样性衰退机制与保护原理揭示方面，长期监测数据构成了长江水生生物，特别是珍稀特有物种（如中华鲟、长江江豚等）种群衰退的客观证据，系统阐明了栖息地丧失与破碎化、过度捕捞、水域污染、航运干扰等多重胁迫因子的叠加效应与驱动机制，为“长江十年禁渔”等保护政策的出台提供了重要的决策依据。再者，在流域性环境问题机理解析与治理方面，通过长期定位研究，清晰刻画了氮、磷等营养盐在流域内的迁移转化通量与时空格局，揭示了水库拦截、江湖关系变化对生物地球化学循环的重塑作用，以及富营养化与藻类水华暴发的驱动阈值，为实施精准、科学的流域面源污染控制、湖泊治理与风险防控等提供了重要的科学依据。最后，在湿地生态系统功能与适应性管理方面，长期观测数据揭示了江湖关系变化与气候波动共同作用下长江中下游湖泊湿地植被群落演替、土壤碳氮循环、水鸟栖息地适宜性等生态过程的响应规律，定量评估了围垦、岸线变化等人类活动的长期生态损益。这些成果为开展湿地生态修复与功能提升（如拆除圩垸、建设生态缓冲带）等提供了核心设计原理和后期效果评估的基准。

基于长期观测和相关研究发现，近二十年来，长江水文节律发生较大变化。长江上游偏湿，中下游偏干，且旱涝急转、极端事件频发^[48-49]；干流对中游通江湖泊的顶托作用减弱、拉空作用增强，导致湖区水位降低、枯水期提前、湖体萎缩^[50]。河流污染物浓度普遍下降，95%以上断面达到I-III类水^[51]，但多数湖泊TN降幅有限、TP甚至上升，底栖生物多样性下降，沉水植被显著退化^[51]。虽然长江十年禁渔政策一定程度上增加了渔业资源，但鱼类多样性有所降低^[16]。受枯水影响，长江中下游近一半的天然湿地显著“变干”、淹水天数缩短，对候鸟栖息地和鱼类产卵场空间造成挤压^[52]。整体而言，长江江湖关系变化通过改变湖泊水位节律、水动力条件及水文连通性，引起湖泊栖息地格局与物质循环过程的协同变化，进而驱动水生生物群落结构调整，最终导致湖泊生态系统结构与功能的级联响应（图2）。近二十年来长江流域河湖水质改善效果显著，但湖泊生态恢复明显滞后于其水质改善效果。

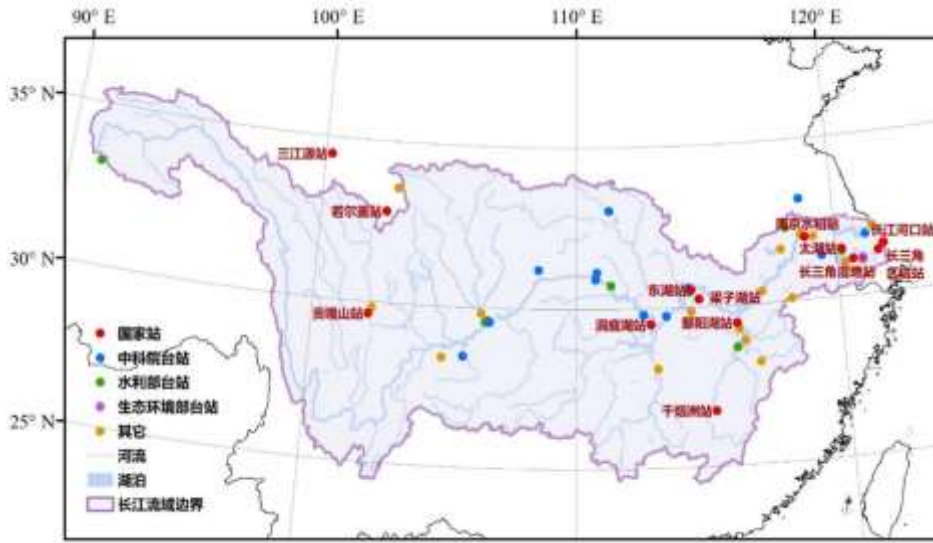


图1 围绕长江流域水生态系统监测建设的野外站点空间分布图（截至2024年）

Fig. 1 Spatial distribution of aquatic ecosystem observation and research stations established in the Yangtze River Basin (2024)



图2 长江流域江湖关系变化-水文节律改变-水生态系统响应的级联效应概念图

Fig. 2 Conceptual diagram of the cascading effects of river-lake relationship changes, hydrological regime alterations, and aquatic ecosystem responses in the Yangtze River Basin

3 长江流域水生态系统安全联合观测行动工作进展

为深入落实长江经济带高质量发展重大战略部署，充分发挥国家野外站对长江流域水生态系统安全的支撑保障作用，推进长江流域水生态保护修复工作，2023年7月，科技部基础研究司、国家科技基础条件平台中心在江西南昌组织召开国家野外站服务长江流域水生态系统安全联合观测研究行动。专项行动实施以来，发布了《国家野外站服务长江流域水生态系统安全联合观测研究行动方案(2023-2025年)》，并在长江流域水生态系统基础数据整编、水生态观测专项技术规范编制、水生态系统变化研究、共性问题联网观测试验、应用示范以及国际合作等六个方面取得了显著工作成效。

3.1 整编长江流域水生态环境基础数据集

生态系统长期观测数据是理解流域水生态系统变化过程机制、评估生态修复和环境治理效果的重要基础^[53]。长江流域涉水管理部门较多，各部门数据共享机制尚不健全，数据碎片化、数据孤岛问题突出，制约了流域水生态保护相关研究与实践开展。专项行动整合长江流域水生态相关的21个国家、部门、地方野外站的历史观测数据，按照湖泊、水库、湿地、河流、河口等水生态系统类型，系统整编形成了2019-2025年长江流域水生态环境基础数据集，并汇交至科技部平台中心。数据集涵盖刻画水生态系统基本结构、空间格局及功能评估的水资源、水环境、水生态、水生境等共性指标和湖泊、湿地、水库、河流、河口等不同类型水生态系统的个性观测指标，具体包括水-土-气-生4大类、14小类、132个水生态环境相关指标(表1)，是目前最为系统的长江流域水生态环境数据集。本次数据整编工作有利于推动建立长期可持续数据汇交与共享机制，为气候变化、长江十年禁渔、大型水利工程建设等条件下的长江水生态系统结构和功能演变研究提供基础数据支撑。

表1 长江流域水生态环境基础数据类别

Tab.1 Categories for the aquatic ecological environment of the Yangtze River Basin

大类	小类	指标数
水体	水物理	6
	水化学	30
	湖泊底质	11
土壤	土壤	12
	土地利用	5
大气	气象	9
	浮游动物	10
	浮游植物	15
	初级生产力	3
生物	底栖动物	11
	大型水生植物	5
	细菌	6
	鱼类	4
	鸟类	5

3.2 编制长江流域水生态观测专项技术规范

制定标准规范是科学开展长期定位观测，开展河湖生态保护与修复工作的基本参考依据^[54]。针对长江流域当前的监测体系仍不足以支撑流域和区域水安全保障的实际问题，针对长江流域水生态环境特点和联网观测实际需求与技术能力，编制《长江流域水生态系统专项观测技术规范》(图3)。技术规范提出了服务共性科学目标的共性观测指标体系和服务个性科学问题需求的个性观测指标体系，明确了观测场地设置、观测技术方法、质量控制、数据汇交、人员保障等核心内容，可支撑流域水生态系统科学前沿、国家生态环境保护科技需求和长江流域水生态保护与管理具体需求。

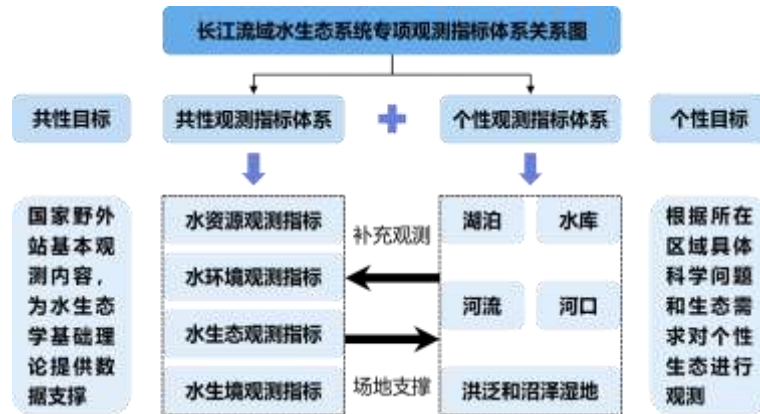


图3 长江流域水生态系统专项观测指标体系框架图

Fig. 2 Framework diagram of the specialized monitoring indicator system for the Yangtze River Basin aquatic ecosystem

3.3 发布长江流域水生态系统变化研究报告

基于长江流域水生态环境基础数据集，以长江上中下游典型水体单元为主线，综合评估了长江流域水生态系统变化，研判了长江流域水生态系统变化发展趋势并提出针对性保护与发展建议，联合发布《长江流域水生态系统变化研究报告》。研究报告通过构建统一的、普适的长江流域水生态系统变化评估框架，提出长江上中下游、不同类型水生态系统差异化的评估指标体系，确定不同江段、不同指标的分级标准，深刻剖析长江流域江河湖库水生态系统的变化特征。研究报告客观反映了长江流域太湖、鄱阳湖、洞庭湖、长江河口湿地等典型水生态系统的长期演变趋势及其演变原因和驱动机制，科学支撑了长江流域高水平保护与高质量发展。研究报告发布后，社会反响积极，公众关注度高，为国家和相关部门在长江流域水生态系统保护、修复和资源利用等方面提供了重要决策参考。

3.4 开展长江流域生态环境共性问题联网观测试验

联网观测试验可以克服单一站点的局限性，是解决大尺度生态学问题的重要途径，如全球草地营养网络 (Nutrient Network, 简称 NutNet)、国际干旱联网试验 (International Drought Experiment, 简称 IDE) 等全球联网试验产出了一批高质量、有代表性的成果^[55]。基于长江流域野外站已建立的长期定位观测样地及试验设备，针对长江流域生态环境共性科学问题，通过联网试验顶层设计与共性科学目标凝练，同步开展长江流域水生态系统对增温、营养输入和水位波动的响应与适应联网观测试验。针对“气候变暖如何影响长江上游湿地生态系统碳储量和多功能性”的关键科学问题，开展全生态系统增温联网观测试验，为应对气候变化和“碳达峰碳中和”目标提供理论支撑；针对“富营养化对高寒泥炭湿地生物地球化学循环过程及功能的影响”的关键科学问题，开展营养输入联网观测试验，为长江上游生态系统安全和可持续发展提供理论依据；针对“水位变化对湿地生态功能生物地球化学循环过程的影响”的关键科学问题，开展水位变化联网观测试验，为山水林田湖草沙一体化保护与修复提供理论支撑。

3.5 开展长江上中下游水生态系统安全应用示范

聚焦长江流域上游水资源、中游水生态、下游水环境、长江口湿地安全，分段构建了特色技术体系并在典型区域开展了技术示范与推广服务。在长江上游聚焦基于水生态安全保障的水源涵养构建技术，并开展区域水资源优化配置应用示范；在长江中游重点研发水生态完整性评价技术，并开展河湖水生态修复与调控关键技术应用示范；在长江下游更多关注水体富营养化治理和蓝藻水华预警防控技术，建立预警平台，开展防控技术应用与示范。

3.6 推动联合国生态系统修复十年计划等国际合作

长江流域国家站和地方、行业野外站从大湖流域水生态安全保障、流域水生态多样性、植物生态系统修复、气候变化应对等方面深度推进了联合国生态系统恢复十年 (2021-2030) 倡议和联合国可持续发展目标等国际合作与关键科学难题破解。例如，以太湖站和鄱阳湖站为代表的野外站在湖泊富营养化高

精度遥感监测领域取得的创新技术，为维多利亚湖、坦噶尼喀湖等非洲大型湖泊的生态诊断提供了可推广的解决方案，为非洲国家履行联合国生态系统恢复十年倡议和联合国可持续发展目标（SDG 6：清洁饮水与卫生设施）提供了技术参考。同时，各野外站积极开展国际合作项目与“一带一路”沿线重要节点国家的合作与交流，依托联合国环境规划署国际生态系统管理伙伴计划（UNEP-IEMP）、国家自然科学基金-联合国环境规划署国际合作项目（NSFC-UNEP）、国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项、中国科学院国际合作交流项目等与联合国相关国际组织、全球南方国家以及金砖国家（BRICS）体系建立了长期稳定的合作模式。

4 长江流域水生态系统长期定位观测研究发展趋势

长期定位观测研究为长江流域水生态系统安全的精准诊断、动态评估和科学修复提供不可替代的支撑。长江流域水生态系统长期定位观测研究将会呈现技术智能化、网络系统化、目标精准化、协作一体化的全面发展图景。它将以构建流域智能监测网为技术骨架，以跨尺度的站点联网观测为科学脉络，以解决长江流域生态环境突出问题解决为导向，以跨学科跨部门的协同共享为制度保障。而健全的跨流域数据开放共享机制、系统化的跨学科复合型人才培养体系、稳定持续的经费支持体系，是保障长江流域水生态长期观测网络规范化建设、高效化运行与可持续发展的核心基础，亦是推动上述发展图景落地实施的重要支撑。

4.1 加强整体规划与统筹布局

更加强调长江流域水生态系统野外科学观测研究站布局与整体规划，统筹推进水资源、水环境、水生态安全保护。健全长江流域水生态系统野外科学观测研究体系，按照长江流域水生态保护空间布局，并考虑气候带、地貌类型、人类活动强度的梯度分布，在重点流域、河湖及水源地等统筹布局国家、部门、省市水生态系统野外科学观测研究站，并在江湖交汇区、水库库区等生态敏感区加密布设，合理优化布局水生态等监测站点，构建江-湖联网观测体系，围绕水资源、水环境、水生态开展全观测要素、长时间序列、大空间尺度科学观测，构建长江水生态安全观测科学数据库。聚焦重要污染源、重要排水口、重点水源保护区、水生生物多样性等关键问题，开展全要素、多过程动态感知数据分析；在重要城市水源地和河口区，建立高分辨质谱平台，筛查新型污染物，并诊断其生态效应。整体提升水生态变化预报预警和科学决策支撑能力。

4.2 搭建联合观测与联网试验体系

持续提升长江流域水生态野外站协同观测能力与数据规范标准，聚焦十年禁渔、梯级水库开发影响评估等重大需求和关键科技问题开展长江流域水生态关键科技问题的联网试验与联合研究。围绕长江流域水生态安全保障重大需求和关键科技问题，基于长江流域上、中、下游的主要地理特征和突出水生态环境问题，构建联合观测研究行动合作网络，开展联网试验和联合研究。如针对如何区分气候变化和人类活动对长江流域水生态影响这一科学问题，基于长期水文生态观测数据，检验变化趋势、识别突变点，结合上下游和有无重大工程措施的对照观测和联合试验，进行综合研判。提升基于野外站的大河流域复杂生态环境问题解决能力，为长江流域有效控制并逐步降低湖库水体的富营养化程度提供科学依据和技术支撑，提升长江流域水源涵养与土壤保持、洪水调蓄与生物多样性保护、水源供给与湿地蓝碳固存等核心水生态功能。

4.3 强调从“局部诊断”到“整体研判”转变

更加注重跨学科、跨部门、跨区域的协同，强化通过联网观测和联合研究来提升对长江流域重大环境问题研判、重大工程影响识别、重大行动效果评估和重大决策咨询论证的支撑作用。以揭示流域系统功能的级联效应为核心科学目标，推动长江流域水生态研究从局部诊断向整体研判转变。传统小尺度的站点尺度实验方法难以直接推广至长江这样的大中型流域，而依赖于小尺度研究开发的模型在大尺度应用时有效性存疑。长江流域水生态系统长期定位观测所构建的“站点—样带—网络”多维观测体系，正是应对这一挑战的关键路径。通过将散布于全流域的定位观测站进行标准化联网，并结合遥感反演、模型集成、数据同化等方法，能够获取更长时间序列、更大空间尺度的协同数据，从而形成整体、系统、

更具宏观视野的观测结果和判断。这有助于揭示从局部生态过程到流域系统功能的级联效应，理解气候变化和人类活动干扰下长江流域水生态系统的耦合过程与平衡关系如何发生变动。只有坚持并深化这种跨尺度的长期定位观测，才能捕捉到水生态系统演变的长期趋势与临界点，支撑精准保护与修复，为推动长江经济带高质量发展、建设人与自然和谐共生的美丽中国，奠定坚实的科学基石。

4.4 开展全流域智能监测与风险评估

搭建长江全流域智能监测和大数据平台，支撑长江流域水生态重大问题研判和重大行动效果评估。长江流域的水生态系统治理与保护工作将从“经验治理”到“智慧管控”转变，更加重视以数据驱动决策，用科技赋能治理，实现更精准、高效和系统的长江水生态治理与保护系统。更加注重整合水文、水环境、水生态等多源异构观测数据，构建长江干流及重要湖库水生态联网观测数据库，构建长江流域水安全大数据中心共享平台，利用 AI 技术开展数据挖掘，服务于长江流域水安全保障。研发长江干流及重要湖库水生态联网观测数据分析系统，研制长江干流及重要湖库水生态系列数据产品，开展长江流域水生态风险评估，在此基础上基于水生态风险现状及变化趋势评估，开展长江流域水生态重大问题研判和重大行动效果评估，支撑长江大保护及长江经济带高质量发展国家战略部署实施。

5 参考文献

- [1] Guo XB, Tang XZ, Su W, et al. Development of Data Product Specification of Long-term Observation for Ecosystem (EcoLTO). *China Scientific Data*, 2022, 7(1): 3-14.[郭学兵,唐新斋,苏文等.生态系统要素长期观测(EcoLTO)数据产品规范研制.中国科学数据(中英文网络版),2022,7(1):3-14.]
- [2] Zuo QT. National multi-level guarantee system for the water ecological health. *J Hydraul Eng*, 2021, 52(11): 1347-1354.[左其亭.国家多层水生态健康保障体系构建.水利学报,2021,52(11):1347-1354.]
- [3] Lindenmayer D B, Likens G E, Andersen A, et al. Value of long - term ecological studies. *Austral Ecology*, 2012, 37(7): 745-757.
- [4] Sergeant C J, Moynahan B J, Johnson W F. Practical advice for implementing long-term ecosystem monitoring. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(5): 969-973.
- [5] Yu XG. The problems of ecological security in the Yangtze Basin and some suggestions. *J Nat Resour*, 2002, 17(3): 294-298.[虞孝感.长江流域生态安全问题及建议.自然资源学报,2002,17(03):294-298.]
- [6] Yang GS, Xu XB. Foundation and strategy of well-coordinated environmental conservation and avoiding excessive development in the Yangtze River Economic Belt. *Bull Chin Acad Sci*, 2020, 35(8): 940-950.[杨桂山,徐晋保.长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”的基础与策略.中国科学院院刊,2020,35(08):940-950.]
- [7] 陈宜瑜. 序言 见: 陈大庆. 长江流域渔业资源现状. 北京: 科学出版社, 2025.
- [8] Chen J. Ecosystem of the Yangtze River basin[M]//Evolution and water resources utilization of the Yangtze River. *Singapore: Springer Singapore*, 2019: 163-220.
- [9] Yu Y, Xiao Z, Bruzzone L, et al. Mapping and analyzing the spatiotemporal patterns and drivers of multiple ecosystem services: A case study in the Yangtze and yellow river basins. *Remote Sensing*, 2024, 16(2): 411.
- [10] Wang HZ. Preliminary discussion on the overall protection strategy of water ecological environment in the Yangtze River Basin (Preface). *Acta Hydrobiol Sin*, 2019, 43(S1): 1-2.[王洪铸.长江流域水生态环境整体保护战略刍议(代序言).水生生物学报,2019,43(S01):1-2.]
- [11] Xia J, Li Z, Zeng S, et al. Perspectives on eco-water security and sustainable development in the Yangtze River Basin. *Geoscience Letters*, 2021, 8(1): 18.
- [12] Jin B, Winemiller K O, Ren W, et al. Basin - scale approach needed for Yangtze River fisheries restoration. *Fish and Fisheries*, 2022, 23(4): 1009-1015.
- [13] Cai Y, Dong R, Kattel G, et al. Macroinvertebrate diversity and ecosystem functioning across the eutrophication gradients of the middle and lower reaches of Yangtze River lakes (China). *Ecology and Evolution*, 2023, 13(1): e9751.
- [14] Xu Y, Hou R, Xiao F. Ecosystem services in the Yangtze River Basin and their trade-offs/synergies relationships in response to climate change. *Environmental Research Communications*, 2024, 6(10): 105032.
- [15] Zheng L, Wang Y, Li J. Quantifying the spatial impact of landscape fragmentation on habitat quality: A multi-temporal dimensional comparison

- between the Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin of Chin. *Land Use Policy*, 2023, **125**: 106463.
- [16] Li Z, Xie H, Peng Z, et al. Hydrology and water quality drive multiple biological indicators in a dam-modified large river. *Water Research X*, 2024, **25**: 100251.
- [17] Cai QH. The Yangtze River conservation and watershed ecology. *Yangtze River*, 2020, **51**(1): 70-74.[蔡庆华.长江大保护与流域生态学.人民长江,2020,51(1):70-74.]
- [18] Huang SY, Fu YM, Zhang YY, et al. Research on the coupling and coordinated development of water-energy-food-forest system in the Yangtze River Basin. *Chin J Eco-Agric*, 2024, **32**(7): 1193-1205.[黄书苑,傅一敏,章语嫣等.长江流域水-能源-粮食-森林系统耦合协调发展研究.中国生态农业学报(中英文),2024,32(7):1193-1205.]
- [19] Zheng Y, Yu FL, Sang XF, et al. Evaluation method of ecosystem service value of water system in the Yangtze River Basin. *J China Inst Water Resour Hydropower Res*, 2023, **21**(3): 222-235.[郑阳,于福亮,桑学锋等.长江流域水系统生态服务价值评价方法.中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(3):222-235.]
- [20] Xia P, Peng J, Gu T, et al. Lake - related ecosystem services facing social - ecological risks. *People and Nature*, 2025, **7**(4): 734-751.
- [21] Zhang Z, Jin G, Tang H, et al. The response to hydrological regime change of nitrogen transformation processes at the sediment - water interface of seasonal floodplain lakes: Insights from the Yangtze River - Poyang Lake system. *Water Resources Research*, 2025, **61**(4): e2024WR037972.
- [22] Xie H, Ma Y, Jin X, et al. Land use and river-lake connectivity: Biodiversity determinants of lake ecosystems. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, **21**: 100434.
- [23] Wang Z, Mao J, Peng Y, et al. Exploring the driving forces of ecosystem services in the Yangtze River basin, China. *Land*, 2025, **14**(2): 411.
- [24] Pan S, Zhang W, Li Y, et al. Trends and prospects in the Yangtze River Basin research: A bibliometric analysis. *River Research and Applications*, 2023, **39**(1): 134-148.
- [25] Haase P, Tonkin J, Stoll S, et al. The next generation of site-based long-term ecological monitoring: Linking essential biodiversity variables and ecosystem integrity. *The Science of the total environment*, 2018, **613-614**:1376-1384.
- [26] Mollenhauer H, Kasner M, Haase P, et al. Long-term environmental monitoring infrastructures in Europe: observations, measurements, scales, and socio-ecological representativeness. *The Science of the total environment*, 2018, **624**: 968-978.
- [27] Kaha M, Lang M, Zhang S, et al. Note on the compatibility of ICOS, NEON, and TERN sampling designs, different camera setups for effective plant area index estimation with digital hemispherical photography. *Forestry Studies*, 2023, **79**, 21-36.
- [28] Nahlik A M, Paulsen S G, Dumelle M, et al. National Aquatic Resource Surveys (NARS): the foundation for long-term aquatic monitoring data across the United States. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, **197**(12): 1291.
- [29] Brooks J R, Compton J E, Lin J, et al. $\delta^{15}\text{N}$ of Chironomidae: An index of nitrogen sources and processing within watersheds for national aquatic monitoring program. *Science of the Total Environment*, 2022, **813**: 151867.
- [30] Hering D, Carvalho L, Argillier C, et al. Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress—An introduction to the MARS project[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 503-504: 10-21.
- [31] Likens G E. The watershed-ecosystem approach[J]. *Hydrological Processes*, 2021, **35**(e13977): 1-3.
- [32] Neal C, Reynolds B, Norris D, et al. Three decades of water quality measurements from the Upper Severn experimental catchments at Plynlimon, Wales: an openly accessible data resource for research, modelling, environmental management and education[J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(24): 3818-3830.
- [33] Neal C, Reynolds B, Neal M, et al. Long-term changes in the water quality of rainfall, cloud water and stream water for moorland, forested and clear-felled catchments at Plynlimon, mid-Wales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001, **5**(3): 459-476.
- [34] Robinson M, Rodda J C, Sutcliffe J V. Long-term environmental monitoring in the UK: origins and achievements of the Plynlimon catchment study. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2013, **38**(3): 451-463.
- [35] Benettin P, Kirchner J W, Rinaldo A, et al. Modeling chloride transport using travel time distributions at Plynlimon, Wales. *Water Resources Research*, 2015, **51**(5): 3259-3276.
- [36] Fürst J, Nachtnebel H P, Gasch J, et al. Rosalia: an experimental research site to study hydrological processes in a forest catchment. *Earth System Science Data*, 2021, **13**: 4019-4034.
- [37] Hissler C, Martinez-Carreras N, Barnich F, et al. The Weierbach experimental catchment in Luxembourg: A decade of critical zone monitoring in a

- temperate forest - from hydrological investigations to ecohydrological perspectives. *Hydrological Processes*, 2021, **35**(e14140): 1-7.
- [38] Wolfram J, Stehle S, Bub S, et al. Water quality and ecological risks in European surface waters-Monitoring improves while water quality decreases. *Environment International*, 2021, **152**: 106479.
- [39] Li X, Liu SM, Ma MG, et al. HiWATER: An integrated remote sensing experiment on hydrological and ecological processes in the Heihe River Basin. *Adv Earth Sci*, 2012, **27**(5): 481-498.[李新, 刘绍民, 马明国等. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计. 地球科学进展, 2012, **27**(05): 481-498.]
- [40] Li X, Jin R, Liu SM, et al. Progress and prospect of upscaling research in the Heihe remote sensing experiment. *J Remote Sens*, 2016, **20**(5): 921-932.[李新, 晋锐, 刘绍民等. 黑河遥感试验中尺度上推研究的进展与前瞻. 遥感学报, 2016, **20**(5): 921-932.]
- [41] Liu Z, Zhang N, Peng DH, et al. Research progress of aquatic ecological monitoring methods and the application in the Yellow River Basin. *Environ Monit China*, 2022, **38**(1): 58-71.[刘哲, 张宁, 彭定华等. 水生生态监测方法研究进展及在黄河流域的应用实践. 中国环境监测, 2022, **38**(01): 58-71.]
- [42] Sun RH, Cheng X, Chen LD. Water ecological function zoning of Haihe River Basin based on terrestrial-aquatic ecosystem coupling. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(24): 8445-8455.[孙然好, 程先, 陈利顶. 基于陆地-水生态系统耦合的海河流域水生生态功能分区. 生态学报, 2017, **37**(24): 8445-8455.]
- [43] 孙鸿烈. 生态系统综合研究. 北京: 科学出版社, 2009
- [44] Gao CD, He HL. Field scientific observation and research stations have great development potential and should be highly valued. *Bull Chin Acad Sci*, 2019, **34**(3): 344-348.[高春东, 何洪林. 野外科学观测研究站发展潜力大应予高度重视. 中国科学院院刊, 2019, **34**(3): 344-348.]
- [45] Xu DH, Wang Y, Li XH, et al. Thoughts and suggestions on promoting scientific observation research station to support national major comprehensive scientific investigation. *China Sci Technol Resour Rev*, 2024, **56**(2): 47-53.[许东惠, 王祎, 李笑寒等. 野外科学观测研究站支撑服务国家重大综合科学考察的思考与建议. 中国科技资源导刊, 2024, **56** (2) : 47-53.]
- [46] Liao XH, Feng ZM, Gao X, et al. The development of field scientific observation and research stations (networks) and scientific data centers. *Acta Geogr Sin*, 2020, **75**(12): 2669-2683.[廖小罕, 封志明, 高星等. 野外科学观测研究台站(网络)和科学数据中心建设发展. 地理学报, 2020, **75** (12) : 2669-2683.]
- [47] Wang JL, Wang Y, Gao MX, et al. Deep integration path of comprehensive scientific investigation and positioning station observation. *Resour Sci*, 2025.[王卷乐, 王祎, 高孟绪等. 综合科学考察与定位台站观测的深度结合路径. 资源科学, 2025.]
- [48] Hu JX, Luo ZL, Gao YY, et al. A century-long streamflow reconstruction reveals significant streamflow increases in the upper Yangtze River basin. *CATENA*. 2025,**250**:108774
- [49] Ma Y, Xu Z, Dong Z, et al. Spatiotemporal Trends of Precipitation and Natural Streamflow in the Upper Yangtze River Basin from 1951 to 2020. *Hydrology*. 2025; **12**(9):243.
- [50] Li B, Yang GS, Wan RR. Reassessment of the declines in the largest freshwater lake in China (Poyang Lake): uneven trends, risks and underlying causes. *Journal of Environmental Management*. 2023, **342**:118157.
- [51] Zhao XC, Zhang YL, Tang HR, et al. Water quality improvements and ecological inertia: a basin-wide assessment of ecosystem recovery in the Yangtze River system (2005 - 2022). *Ecol. Indic*. 2025,**176**, 113700.
- [52] Lu DS, Zheng YC, Liu XN, et al. Changes in wetland landscape and inundation patterns in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin from 1990 to 2020. *Ecological Indicators*. 2024,**161**:111992.
- [53] Wu DX, Zhang L, Song CY. Long-term observation data of ecosystems provide fundamental support for the research, conservation and sustainable utilization of ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, **49**(8): 1177 - 1181.[吴冬秀, 张琳, 宋创业. 生态系统长期观测数据为生态系统研究和保护利用提供基础支撑. 植物生态学报, 2025, **49**(8): 1177 - 1181.]
- [54] Zhao JY, Yu ZC, Zhang J, et al. Progress of technical standards for ecological protection and restoration of rivers and lakes. *China Water Resources*, 2022, **936**(6): 32 - 37.[赵进勇, 于子斌, 张晶等. 国内外河湖生态保护与修复技术标准进展综述. 中国水利, 2022, **936**(6): 32 - 37.]
- [55] Borer ET, Stevens CJ. Nitrogen deposition and climate: an integrated synthesis. *Trends Ecol Evol*, 2022, **37**(6): 541-552.