

## 长江流域城市湖泊水环境-水生态协同治理：现状、挑战与举措\*

李一平<sup>1\*\*</sup>, 周玉璇<sup>1</sup>, 倪利晓<sup>1</sup>, 郑飞飞<sup>2</sup>, 徐华成<sup>3</sup>, 陈诚<sup>4</sup>, 邵冬冬<sup>5</sup>

(1: 河海大学环境学院, 流域水循环与水安全全国重点实验室, 南京 210098)

(2: 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

(3: 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)

(4: 南京水利科学研究院生态环境研究所, 南京 210029)

(5: 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

**摘要:** 城市湖泊承担着蓄洪、供水、景观旅游与生态维持等多重功能, 具有重要的生态服务价值与社会经济意义。长江流域分布的城市湖泊总数约 35.5 万个, 其总水域面积占全国城市湖泊面积的 65%以上, 生态功能显著。然而, 目前城市湖泊仍面临汛期面源污染负荷高、生态补水风险大、水生态系统韧性不足等突出问题。为实现水生态环境质量的整体提升, 必须从生态系统整体性与流域系统性角度出发, 推进基于源-网-厂-河-湖一体化的水环境与水生态协同治理。本文系统梳理了长江流域城市湖泊水环境与水生态协同治理的研究现状与发展需求, 综述了国内外相关研究进展及工程实践成效, 深入剖析了当前协同治理中面临的主要挑战: (1) 部分城区旱季“藏污纳垢”、雨季“零存整取”问题仍然突出, 尤其是汛期的面源污染问题已逐步上升为制约城市水环境持续改善的主要矛盾; (2) 城镇污水处理厂尾水补充湖泊生态用水的关键在于, 实现进入湖体的再生水与受纳水体的水质与水生态融合; (3) 湖体水生态系统韧性不强, 流域系统治理不全面。在此基础上, 凝练形成以“外源高效控制-补水安全保障-生境修复重构-系统优化配置-平台综合管理”为核心的系统性治理思路与重点任务, 以推动长江流域城市湖泊水生态环境治理取得新突破, 为国家生态文明建设与绿色发展战略的深入实施提供科技支撑。

**关键词:** 城市湖泊; 水环境-水生态; 污染溯源; 生态补水安全; 生境重构; 综合调度

### Coordinated Governance of Water Environment-Water Ecosystem for Urban Lakes in the Yangtze River Basin: Current Status, Challenges, and Initiatives

Li Yiping<sup>1</sup>, Zhou Yuxuan<sup>1</sup>, Ni Lixiao<sup>1</sup>, Zheng Feifei<sup>2</sup>, Xu Huacheng<sup>3</sup>, Chen Cheng<sup>4</sup> & Shao Dongdong<sup>5</sup>

(1: State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in River Basin, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P.R.China)

(3: 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)

(4: Center for Eco-environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China)

(5: College of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

\* 2025-10-10 收稿; 2026-01-08 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2023YFC3208900) 资助。

\*\* 通信作者; E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

**Abstract:** Urban lakes serve multiple functions, including flood storage, water supply, landscape tourism, and ecological maintenance, thereby holding significant ecological, environmental, and socioeconomic value. The Yangtze River Basin contains approximately 355,000 urban lakes, accounting for over 65% of the nation's total water area, and these lakes exhibit strong ecological functions. However, urban lakes in the basin currently face prominent challenges such as high non-point source pollution loads during flood seasons, pollution risks associated with ecological water supplementation safety, and limited resilience of aquatic ecosystems. Addressing these issues requires an integrated approach that considers the holistic nature of urban lake ecosystems and the systemic characteristics of river basin management. It is essential to advance coordinated water environment and aquatic ecosystem management under a source-sewer-treatment plant-river-lake integrated framework. This study systematically reviews the research status and development needs related to the coordinated governance of water environment and aquatic ecosystems in urban lakes of the Yangtze River Basin. It synthesizes recent progress in domestic and international research as well as practical engineering applications, and provides an in-depth analysis of the major challenges currently constraining coordinated governance: (1) In certain urban areas, the accumulation of pollutants during dry seasons and the episodic release of contaminants during rainfall events remain prominent, with storm-induced non-point source pollution increasingly becoming a key constraint on the sustained improvement of urban water environments; (2) A critical challenge in using effluents from municipal wastewater treatment plants as ecological replenishment for urban lakes lies in achieving water quality and aquatic ecosystem compatibility between reclaimed water and receiving water bodies; (3) The ecological resilience of lake ecosystems remains weak, and watershed-level systematic governance is still insufficient. Based on this analysis, we summarize targeted strategies and key tasks centered on the framework of “pollution source identification and perception – efficient external source control – water supplementation safety – habitat restoration and reconstruction – system optimization and configuration – integrated platform management,” aiming to accelerate progress in ecological environment governance of urban lakes in the Yangtze River Basin and provide scientific and technological support for national ecological civilization construction and the implementation of green development strategies.

**Key words:** Urban lakes; Water environment-water ecology; Pollution source identification; Ecological water supplementation safety; Habitat reconstruction; Comprehensive operation

我国江河湖泊众多，水系发达，构成了复杂多样的流域格局与生态系统，是国家水网体系建设的重要本底基础。城市湖泊通常指位于城市建成区或城市近郊的湖泊，也包含部分受到城市化强烈影响、功能已转变为城市服务为主的天然中小型湖泊，是城市水系统的关键组成部分<sup>[1]</sup>。与流域型天然湖泊相比，城市湖泊多为人工景观水体，具有水深较浅、面积较小、水体停留时间长、易受扰动等特点。受人类活动的直接影响，城市湖泊被认为是世界上最脆弱的淡水生态系统之一<sup>[2]</sup>，其水环境治理及生态维持难度大、投入多，已成为日益关注的焦点。2025 年中共中央办公厅、国务院办公厅《关于持续推进城市更新行动的意见》明确提出了修复城市生态系统的主要任务，城市湖泊的多元功能日益凸显。不仅是城市安全与资源环境的重要支撑，承担着蓄洪供水、气候调节等基础功能，更在生态维持、景观塑造与文化传承方面发挥着不可替代的作用<sup>[3]</sup>，是实现“宜居、韧性、智慧”城市发展目标的关键环节。

据统计，我国目前约有 110 万个大小不一的城市湖泊（>0.001 平方公里），总水域面积约 2000 多平方公里<sup>[2]</sup>。长江流域城市湖泊众多（共有约 35.5 万个），数量占全国的 29% 左右，总水域面积占全国的 65% 以上<sup>[2]</sup>，生态服务价值多样，是流域重要的城市生态安全屏障<sup>[4]</sup>。其中，超过 80% 是水域面积在 10 平方公里以内的中小型湖泊，且大部分都集中在中下游的城市湖泊群。近年来，随着水污染防治攻坚战持续深入，长江流域大部分城市湖泊水环境质量得到明显改善<sup>[5]</sup>，但湖泊水环境-水生态协同治理仍面临严峻挑战。一方面，其所在区域经济发达、城市化强度高，陆源污染输入量大，湖泊水质改善总体滞后于流域河流，部分湖泊总氮、总磷及叶绿素 a 浓度持续偏高，富营养化加剧，藻华频发<sup>[6, 7]</sup>；即便在实施系统修复的典型超富营养湖泊南湖，TN 与 TP 最大浓度仍达 9.85 mg/L 和 1.49 mg/L，平均叶绿素 a 达 51.85 μg/L，蓝藻水华仍然频发<sup>[8]</sup>。另一方面，受亚热带季风控制显著，汛期径流突增、面源污染冲击大，使水体污染物时空波动更为剧烈。以武汉东湖为例，与雨前相比，雨后表层水体浊度、总磷、溶解性总磷、

活性磷酸盐显著升高，总体处于重度污染水平<sup>[9]</sup>。此外，“江-河-湖”复合水系及工程调控使水位变幅大、交换过程复杂，湖体易呈现生态退化的敏感性。

自20世纪30年代以来，发达国家主要以水资源高效利用、水旱灾害防御为靶向聚焦大型天然湖库研究。随着世界多国湖泊富营养化及水华暴发问题日益突出，国际学界都逐渐重视水生态环境系统治理，总体经历了从点源向面源、从局部到流域、从工程到制度的演化过程<sup>[10, 11]</sup>；21世纪初，兼顾水资源-水环境-水生态的流域综合治理研究成为国际趋势。近年来，在长江大保护战略指导下，围绕鄱阳湖、太湖等大型天然湖泊的水生态环境治理，国家启动了一系列科研项目，并取得了卓有成效的成果，但尚未针对性开展城市湖泊水环境-水生态协同治理的科研攻关。城市水环境治理的“问题在水里，根源在流域、关键在排口、核心在管网、成败在管理”，故亟需开展城市湖泊水环境-水生态关键科学机理剖析及技术研发，突破城市湖泊水环境-水生态协同治理关键技术并进行应用示范，契合“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水思路，服务长江大保护和美丽中国建设。

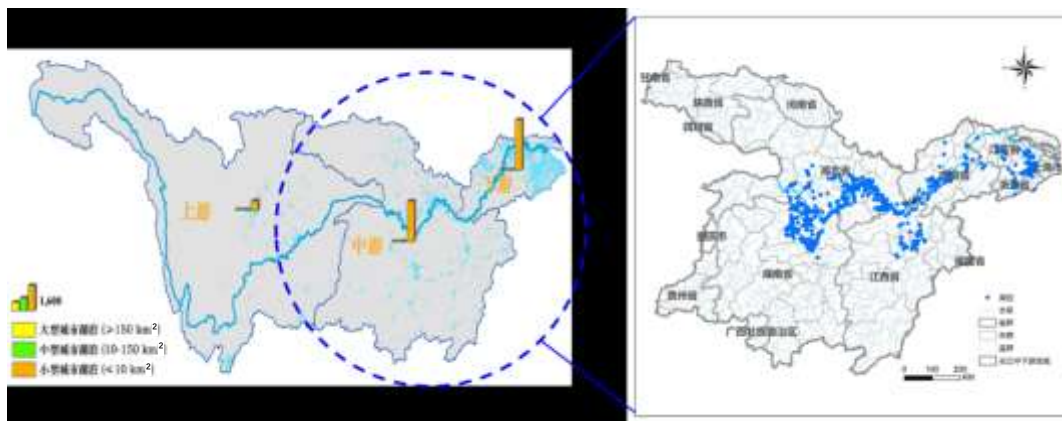


图1 长江流域城市湖泊分布图<sup>[2]</sup>

Fig.1 Distribution of Urban lakes with an Area of Over 1 km<sup>2</sup> in the Yangtze River Basin<sup>[2]</sup>

## 1 国内外城市湖泊水环境-水生态协同治理研究进展

针对城市湖泊现存的入湖污染负荷大、生态补水污染风险大、流域系统治理不全面等关键问题，本研究所指的城市湖泊水环境-水生态协同治理，是在源-网-厂-河-湖多尺度耦合背景下，通过源头减排、过程调控与生态修复的综合集成，实现水质改善与生态功能恢复同步提升的系统治理过程。其内涵主要体现在五个方面：一是城市面源污染控制，通过雨污分流、径流削减、初期雨水调蓄与快速净化等措施，降低进入城市湖泊的面源污染负荷；二是生态补水风险保障，加强补水水量-水质双重约束和全过程风险评估，避免“以水治水”引发二次污染和生态失衡；三是生态系统修复重构，通过滨岸带建设、底栖环境改善等，增强湖泊生态系统结构稳定性与功能完整性；四是水量水质优化调配，实现水资源、水环境与水生态目标的统筹平衡；五是源-网-厂-河-湖一体化智慧管控，构建跨要素、跨尺度的协同治理与智能管控决策体系。围绕这些关键环节，国内外已在理论探索与实践应用方面积累了丰富成果，本文将系统梳理国内外研究进展，以为长江流域城市湖泊水环境-水生态协同治理研究提供思路、方向和经验指导。

### 1.1 城市面源污染溯源与控制

随着国家对城市工业点源污染治理成效显著，城市湖泊污染问题的主要症结从点源污染逐渐转向面源污染<sup>[12]</sup>。城市面源污染泛指雨水径流从非特定地点携带污染物质，通过地表漫流经分流制雨水管网或合流制管网系统进入水体而引发的污染。近年来，气候变化导致的极端降雨事件频发，使得城市面源污

染负荷进入水体的比例逐年增加，城市面源污染问题日益突出。由此，对城市面源污染进行精准溯源与调控，已成为改善提升城市湖泊水环境状况和保护城市湖泊水生态系统稳定的主要途径<sup>[13]</sup>。

城市面源污染溯源方法主要分为定性溯源与定量溯源两类。定性溯源方法中，常用的技术包括同位素溯源法和荧光指纹图谱法。自 20 世纪 70 年代以来，同位素追踪方法被广泛应用于有机污染源解析<sup>[14]</sup>。例如，Barbara Deutsch 等<sup>[15]</sup>使用氮氧稳定同位素示踪技术对德国东北部梅克伦堡的 Wamow 河进行了量化分析硝酸盐的污染源。Astrid Johannsen 等<sup>[16]</sup>利用稳定同位素技术研究了德国汇入北海的五条河流中的硝酸盐来源。而在国内，清华大学吴静等研发的荧光指纹图谱技术已普遍用于水质异常的快速预警和污染类型的诊断<sup>[17]</sup>。定量溯源方法则主要集中在水环境模型以及受体模型研究上。水环境模型反演法基本是围绕 SWMM、InfoWorks ICM、SWAT 等分布式模型<sup>[18-20]</sup>，构建模型正向模拟污染物的迁移传输，然后反演识别与定量溯源污染负荷。受体模型法则以污染接纳水体为研究对象，忽略污染物输移过程中污染物之间的化学反应，即受体中的污染物是各个来源贡献的线性总和<sup>[21]</sup>。在实际应用中，结合定性定量溯源方法，可以全面了解污染物的来源及各风险源的贡献，为源头负荷削减提供精准指导。

目前关于城市面源污染负荷削减的研究主要集中在源头削减、过程控制和末端控制三个环节（图 2）。面源污染的源头削减通常是在污染较为严重的下垫面布设下凹式绿地、透水铺装等海绵措施，通过截流、过滤和净化来降低初期雨水的污染<sup>[22]</sup>。如 ReginatoM 等人<sup>[23]</sup>运用模型估算出内华达州拉斯维加斯谷的面源污染物浓度高于之前公布的半干旱地区的污染物浓度值，可对前端 BMP 的位置以控制面源污染物负荷提供建议。在过程控制方面，研究重点是提高雨水管网内污染物的削减效率，主要通过清淤方法，如水冲刷、高压水射流和现在较为热门的管道机器人等技术，来减轻管道内的污染<sup>[24, 25]</sup>。末端控制研究则聚焦于末端排口的初雨截流和原位净化，包括研究旋流分离器、初雨调蓄池以及人工湿地等技术方案的模拟与优化。如 JungJW 等人<sup>[26]</sup>研究了韩国某公共公园的面源污染径流特征，发现公园内的 TN 和 TP 的初期冲刷效应要比其他污染物明显，并提出了进行初期雨水末端截留工程来管理水质的建议。胡等人研究表明，人工湿地和水力旋流分离器在去除污染物方面表现良好，多种特征污染物的去除率可达到 80% 以上<sup>[27]</sup>。整体而言，当前研究为城市面源污染控制提供了多样化的技术方案，未来需要更加注重综合管理和多措施的协同应用，发展适应性强、经济有效的面源污染控制技术。同时，加强政策支持与公众参与，将有助于提升城市面源污染负荷削减的整体效果。

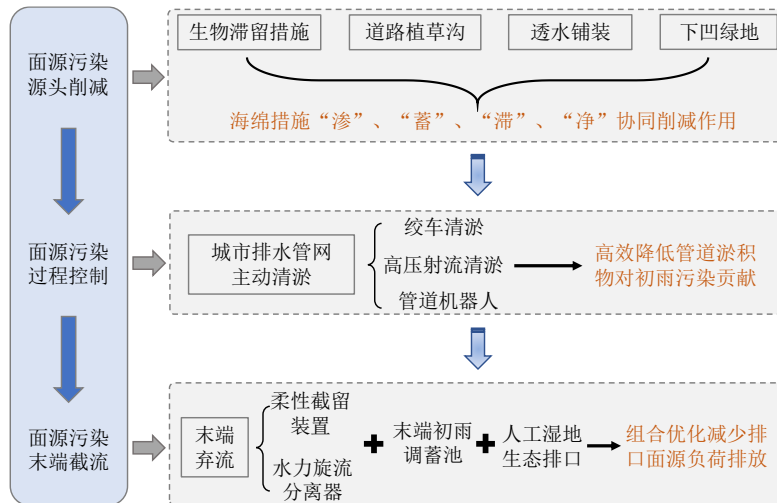


图 2 源头-过程-末端全过程初雨面源污染调控技术

Fig.2 Source - Process - Terminal Whole-Process of Initial Rainfall Surface Pollution Control Technology

### 1.2 城市湖泊生态补水风险保障

污水厂尾水作为城市湖泊生态补水的重要来源，其水质安全性备受关注。尽管已达到废水排放标准，但污水厂尾水中仍含有较高浓度的氮磷及其它有机/无机污染物，直接回补城市湖泊存在较大生态风险。

因此, 如何通过深度净化技术将尾水转化为安全的生态补水, 已成为当前研究的热点。目前, 污水厂尾水的深度净化技术主要包括物理、化学和生物生态方法。在物理净化技术方面, 活性炭、改性活性炭、活性炭/纳滤联用等吸附技术因材料成本低、比表面积大而被广泛应用, 其对尾水中化学需氧量和溶解性有机碳的去除效率可达 50-70%<sup>[28, 29]</sup>。化学净化技术方面, 朱晓霞采用镧、氮共掺杂 TiO<sub>2</sub> 降解尾水中的有机质, 发现有机质降解效率可到 97%以上, 且污水可生化性提高到 0.37<sup>[30]</sup>。杜尔登<sup>[31]</sup>提出 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 工艺降解污水厂尾水中的荧光有机物质, 发现其对尾水中类蛋白和类腐殖物质的处理效率均可达 92%以上。孔宇提出了一种臭氧氧化工艺降解污水厂尾水中的污染物, 并探讨了温度、pH 值等影响因素对处理效果的影响<sup>[32]</sup>。与物理、化学法相比, 生物生态处理法是近年来污水厂尾水净化处理的主要方法。目前, 研究者陆续提出沉水植物氧化塘、生物砂滤池、垂直流人工湿地、潜流湿地、复合型人工湿地等工艺, 开展了系列工艺对污水厂尾水净化处理效果, 并探讨了相关研究参数如温度、水力停留时间、基质类型、植物类型、微生物群落等对污水处理效果的影响<sup>[33-37]</sup>。例如, Song 等人研究发现表层流人工湿地对污水厂尾水氨氮、化学需氧量和总磷的去除率高达 56.33%、55.64%和 88.44%<sup>[38]</sup>。Qiu 等人研发了一种生态床-微生物电化学耦合系统, 经 96 天运行后发现其对污水厂尾水总氮的平均去除效率可达 59.0±16.6%<sup>[39]</sup>。进一步, Chen 等人采用臭氧牡蛎壳固定床生物反应器-膜生物反应器组合系统去除污水厂尾水中的污染物, 发现在最优工况下该组合工艺对化学需氧量、氨和总磷最大去除率高达 73%、99%和 43%<sup>[40]</sup>。

上述研究为推动污水厂尾水从“工程水”向“生态水”的转变提供了重要的技术储备。然而, 当前在尾水深度净化与生态回用方面仍存在以下突出问题: 1) 已有研究多聚焦于单一或组合技术工艺的效率, 对工艺成本及能源消耗鲜有关注; 2) 已有研究多关注污水厂尾水中的有机质或氮磷等污染物的去除, 对尾水中广泛存在的毒性有机污染物鲜有关注; 3) 已有研究多关注高效技术研发, 对污水厂尾水的生态风险阈值和尾水污染物的迁移转化及生态环境效应鲜有关注; 4) 已有研究多关注污水厂尾水净化技术等局部单元, 对污染物从污水厂-河道-湖泊等水系统量质协同调控鲜有关注。因此, 亟须构建以湖泊生态安全为导向的污水厂尾水低耗高效净化技术体系, 为实现城市湖泊再生水补给的水质安全与风险可控提供理论和技术支撑。

### 1.3 城市湖泊生态系统修复重构

城市湖泊具有人类活动干扰大、硬化程度高、生态系统脆弱等特点。近些年来, 由于人口快速增长和城市持续扩张, 城市湖泊生境退化严重, 导致水体富营养化加剧、生物多样性降低、生态系统功能丧失等一系列生态环境问题<sup>[41]</sup>。湖泊生态系统修复重构主要通过生物和工程等近自然技术手段进行生境组成要素(图 3a)的调整和配置, 优化生态系统内部及外界物质、能量的流动过程, 使一个退化、损伤或被破坏的生态系统结构、功能和服务重新恢复。目前国内外围绕湖泊生态系统重构等方面已经开展了大量工作, 普遍经历了“污染治理-水质改善-生态修复”三个阶段, 重点围绕湖泊滨岸带修复、水动力水质提升、底泥污染控制和水生生物群落恢复等方面开展(图 3b)。

(1) 湖泊滨岸带修复。滨岸带是湖泊生态系统的重要组成部分, 在污染拦截、改善水质、生境营造方面具有重要作用<sup>[42]</sup>。通过开展硬质驳岸近自然改造, 构造生态缓冲带是当前城市湖泊滨岸修复的主要手段。生态缓冲带主要指通过生态拦截沟、绿篱隔离带、下凹式绿地、生态塘及生物滞留带等措施或组合技术措施, 进行污染负荷的拦截阻断, 从而起到水质净化效果。在此基础上, 通过滨岸微地形重塑和水生植物配置等进行滨岸带基底修复与生境营造, 从而提升生境质量。

(2) 水动力水质提升。通过改善水体水动力条件, 可以增加湖泊水环境容量, 恢复水体自净能力。目前常用的水动力提升手段包括水源调度配置和曝气充氧技术等<sup>[43]</sup>, 水源调度配置通过结合闸泵控制来合理疏导、引排和统筹调度供水水源, 从而提升水体自净能力。廖轶鹏等<sup>[44]</sup>通过对苏州古城区河网实施外源引水工程, 实现了城市河道污染物通量的大幅降低。曝气充氧可以快速增加水中溶解氧浓度, 提高水体复氧速率, 通常用于局部水体的动力提升。

(3) 底泥污染控制。清淤疏浚是解决湖泊内源污染的主要工程性措施, 但是清淤成本高、底泥处置困难且可能破坏生态系统<sup>[45]</sup>。因此, 国外多运用覆盖技术进行底泥污染释放的控制, 21 世纪之前原位覆盖材料多采用天然土、沙砾等厚层天然材料, 使用后存在升高河床、降低河流蓄水量、影响河流流速等

缺陷，随后开始利用化学覆盖材料，但存在修复时效短、二次污染风险大等问题，因此该技术在我国应用并不广泛，大多停留在实验室阶段。一些学者利用限氧升温炭化法将芦竹茎、芦苇茎、花生壳及玉米芯烧制成生物炭，从而提高底泥的硝化作用强度，有效削减底泥污染释放，但生物炭的活性与其理化性质有关且长期使用会发生老化现象；近年发展起来的金属改性黏土材料，如镧改性膨润土和硝酸钙，通过“覆盖+吸附/氧化”协同机制，可实现深层磷与砷释放的削减，同时阻断表层营养盐的再释放，表现出更高的修复持久性与靶向性<sup>[46]</sup>。此外，将生态措施与材料修复协同应用成为新的发展趋势，例如将沉水植物（如苦草）重建与磷失活剂（LMC）联合应用，可明显降低沉积物内源磷释放通量，从机制上改善城市湖泊的底泥营养盐负荷，提升整体生态系统稳定性<sup>[47]</sup>。

（4）水生生物群落恢复。湖泊稳态转换理论为湖泊富营养化治理提供了基础，其中水生植被的恢复重建的关键，是实现湖泊由藻型到草型稳态转变的基础<sup>[48]</sup>。经过多年的研究和实践，国内外许多小型的富营养化浅水湖泊已经成功恢复了沉水植物群落，水质得到明显改善。例如十三五期间在蠡湖开展浅水湖泊生态修复与草型生态系统重构示范实践，遵循“控源截污-生境改善-生态恢复”策略，促进水生植被修复，使湖区透明度显著提升，沉水植被面积扩大，浮游植物密度下降，成为国内城市湖泊生态系统重构的成功范例之一<sup>[49]</sup>。在南京市玄武湖的研究中发现，沉水植物恢复在改善营养结构基础上，还可通过降低底泥产甲烷潜势与增强甲烷氧化过程，使水-气界面  $CH_4$  排放降低至未恢复区的约 1/4，体现了湖泊生态修复与温室气体减排的协同效益<sup>[50]</sup>。但是由于城市湖泊污染浓度高、透明度低，大面积沉水植物重建往往较为困难。

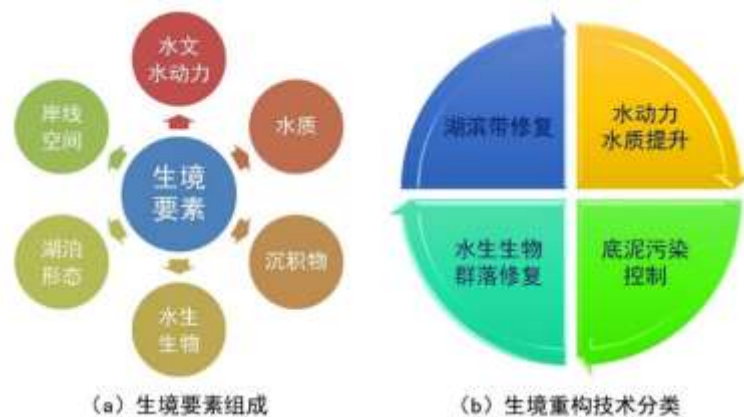


图3 城市湖泊生境要素组成与生境重构技术分类

Fig.3 The composition of habitat elements in urban lakes and the classification of habitat reconstruction techniques

#### 1.4 城市水系统配置与调度

城市湖泊是城市水系统的有机组成部分，以生态系统整体性和流域系统性为准则，突破城市水系统多目标协同优化调配技术集成是湖泊水环境-水生态协同治理的关键。多年的湖泊治理实践表明，只有系统思维统筹各涉水单元，才能解决全局性城市水问题<sup>[35]</sup>。国内外在城市水系统的建设方法、调度技术等方面已开展大量探索<sup>[51-53]</sup>，基于城市水系统多要素耦合、多尺度交互、多变量驱动的特点，国际上提出了“综合城市水管理”<sup>[54]</sup>、最佳管理实践、可持续排水系统<sup>[55]</sup>等多种概念，国内也建立了中国特色的“自然-人工”二元水循环技术体系与城市水循环理论<sup>[56]</sup>。

在方法体系方面，城市水系统配置与调度研究逐渐从单目标、多阶段控制转向多目标、多情景、多约束的综合优化。多目标优化模型将供水可靠性、水质改善、生态需水满足程度、资源利用效率、洪涝风险控制与水土资源匹配性纳入统一优化框架，构建多维耦合的调度约束体系<sup>[57]</sup>。基于协同理论的水资源配置模型通过刻画不同用水单元间的互动关系，将社会、经济与生态效益进行综合量化，使系统整体调度策略更加科学化与协调化<sup>[58]</sup>。在多目标求解方法上，粒子群优化、遗传算法、模拟退火算法以及多目标进化算法等智能优化工具已广泛应用于区域供水调度、跨区域调水运行、城市供水网络优化与水资源

源紧缺区域的配置任务中,在求解复杂耦合模型方面表现出较高的效率与鲁棒性<sup>[59]</sup>。

随着研究的深入,空间均衡理论、多源数据驱动技术以及情景模拟方法被逐步纳入城市水系统优化配置研究,以增强调度策略对不确定性条件的响应能力。例如,区域尺度的水资源多目标配置研究中引入空间均衡约束,有助于解决区域间水资源配置不均衡问题<sup>[60]</sup>;在气候变化情景下的城市水资源调控研究中,通过将降雨时变、不确定需求及生态需水基线纳入模型,可显著提升配置策略的稳健性<sup>[61]</sup>。与此同时,数字孪生逐渐成为城市水系统调度的重要技术工具,通过融合传感数据、机理模型与智能算法,实现城市水系统的实时映射、优化预测与韧性评估,为复杂系统的精细化调度提供重要支撑<sup>[62]</sup>。在雨洪系统管理方面,多标准仿真-优化框架的引入使暴雨情景下的系统调度效率显著提升,并为解决排水网络超负荷、径流污染与城市内涝风险提供了有效途径。

未来城市水系统调度与配置研究有望在多源数据融合、机理模型与数据驱动模型耦合、数字孪生体构建、生态约束下的多目标协同调度、自然基解决方案集成以及人工智能辅助决策等方面形成突破。通过上述技术体系的综合应用,可逐步实现城市水系统的高韧性、高效率与高生态价值运行,为未来城市的可持续发展提供坚实基础。

### 1.5 源网厂河湖一体化智慧管控

目前源网厂河湖一体化综合管理平台已进入快速发展阶段,与之紧密相关的监测预警、数据融合及平台构筑等技术研发也得到各界关注<sup>[63, 64]</sup>。尽管已有了一定的研究成果,但目前源网厂河湖体系内监测物联网系统构建过程往往依赖工程经验,仅通过比选已有方法来确定思路,缺乏充足理论支撑的优化设计与改扩建方法<sup>[65]</sup>。现有数据融合主要侧重于多源异构数据资源梳理、采集与清洗,为平台搭建、监测预警提供高精度数据基础,例如,数据融合研究通常关注多源遥感产品、模型模拟数据与观测数据的校准与融合。在数据层面,利用单一物理模型(包括 EFDC、Delft-3D 等)或深度学习模型整合多源数据、实现区域性河流、湖泊水质模拟也可以精准重建污染物迁移的时空规律特征<sup>[66]</sup>。在融合算法层面,卡尔曼滤波、三维变分同化是传统的数据融合方法<sup>[67, 68]</sup>,而随着时代发展,深度学习算法让数据之间的融合方式、效率和精度都有了更大的提高<sup>[69, 70]</sup>。然而,对大数据的整合研究不足,且缺乏针对稀疏、异构、不确定、不完整数据的局部学习与模型融合技术,严重影响了城市水系统管理效率。作为设备与数据支撑的监测预警系统普遍存在规划不足、功能单一、应用困难等问题<sup>[71, 72]</sup>,其深层次原因主要为以下几个方面。首先是部门之间数据壁垒以及共享机制的缺失。环保、水利、气象等不同部门的数据在格式、标准方面存在差异,以及缺乏制度化的共享渠道,导致跨部门数据难以实现有效的整合<sup>[73]</sup>;然后是跨学科之间的协同机制不畅。水环境预警涉及环境科学、流体力学、数据科学、气象学及公共卫生等多学科领域,但当前缺乏稳定的跨学科合作平台与激励机制,致使模型构建与实际管理需求之间出现脱节<sup>[74]</sup>;因此,现有监测预警体系尚处于事故发生后报警修复的被动阶段,难以实现主动预测报警与调控功能<sup>[75]</sup>。

在源网厂河湖一体化综合管理平台技术研发方面,主要侧重底层技术框架构建,欠缺快速开发与部署能力<sup>[76]</sup>,未将平台与湖泊修复工程等内容建立联系。从平台的具体实践应用来看,针对城市湖泊水环境水生态管理,目前已建成许多管控平台,如千岛湖水质水华预测预警系统、太湖流域水生态智慧监管平台<sup>[77]</sup>,但根据湖区自身特点和需求出发所建设的管控平台普遍局限于单一体系中,缺乏整合集成源网厂河湖全过程的一体化综合管理平台与协同治理应用<sup>[78, 79]</sup>。另外,目前国内具备水务平台开发能力的机构主要是大型设计院以及少数水务科技公司,相对成熟的平台技术往往仅针对供水管网、排水管网防汛防旱,面向源网厂河湖一体化系统综合开发的管控平台较为有限,且已有平台的调度决策功能单一。

综上,针对当下源网厂河湖管理平台的困境,亟需研发城市水系统物联网监测预警及多元异构数据治理技术,构建源网厂河湖一体化综合管理平台,形成可复制推广的城市湖泊水环境-水生态协同治理模式,是保护城市湖泊水生态环境的迫切需求。

## 2 城市湖泊水环境-水生态协同治理现存问题与挑战

基于上述国内外研究进展,前期研究多针对天然湖库,对以景观功能为主的城市湖泊研究还较为缺乏,尤其是城市湖泊水环境-水生态协同治理领域仍存在诸多问题和挑战,突出表现在:

(1) 部分城区存在旱季“藏污纳垢”、雨季“零存整取”的突出问题，亟需突破面源污染溯源时空分辨率不足、雨水管涵初雨调控技术碎片化等难点问题。在面源污染传输机制与溯源解析方面，缺乏对“地面-管道-河道-湖泊”全过程污染物迁移转化机理剖析，且多采用污染物“指纹”图谱等定性方法，难以实现多种类污染物同步溯源的时空精准性。在污染调控方面，当前碎片化、粗放型的面源污染调控技术，难于应对不同口径管涵、污染源强复杂、时空异质性强的控制需求。因此，亟需研发城市湖泊污染高精度溯源与初雨面源高效精准调控技术，为长江流域城市湖泊污染防治提供支撑。

(2) 城镇污水处理厂尾水补充湖泊生态用水的关键在于，实现进入湖体的再生水与受纳水体的水质与水生态融合，促进工程水向生态水的有效转化。目前，生态补水研究多集中于补水水源的深度处理与净化、基于水龄和水质的补水方案优化等。缺乏基于生态风险阈值的入湖污染物多界面迁移行为研究，如何利用量质协同调控，破解水质提升与风险控制响应关系，研发保障生态安全的尾水低耗高效净化技术仍存在诸多难题。因此，亟需建立基于湖泊生态安全补水的污水厂尾水低耗高效净化与水系统量质协同调控技术，为实现城市湖泊再生水补给水质保障、风险可控提供重要支撑。

(3) 雨水与再生水补给是对城市湖泊环境和生态需水的必要补给，通过滨岸-水体-底栖多层次生境重构技术，实现入湖多源补给与受纳水体的水质与水生态融合是当前提升生态系统韧性的关键举措。目前，围绕湖泊滨岸带生态修复等方面已有大量研究实践，但效果均受限于城市湖泊狭小的生态空间。常见的水质提升絮凝/吸附材料和采用底泥污染控制疏浚、清挖、锁磷剂抛洒覆盖等方式，均存在生态风险较高、效果持续性差等问题。水生植物群落恢复面积及类型仍缺乏有效的技术支撑，且恢复效果难以有效量化。因此，围绕城市湖泊生境重构技术碎片化严重、协同度不高的问题，建立多层次立体生境重构和韧性提升技术，是构建绿色、安全和韧性的可持续城市水系统的关键手段。

(4) 城市水系统具有多要素耦合、多尺度交互、多变量驱动等特点，受城市水系统优化调配理论有限、模型效率不高等技术限制，需突破城市水系统多单元组合交互下污染源强传输路径与负荷通量未明确、城市湖泊本底水环境容量及其与污染负荷通量的互馈响应过程不明晰等壁垒，核算城市湖泊环境容量与多源强叠加的水系统全路径入湖污染负荷通量，甄别容量与通量的动态互馈响应过程。且现有城市水系统调配缺乏系统单元间调蓄联动，对河湖水质、水生态，城市韧性等多目标协同调度的考虑不足，业务化应用中所需的实时调度难以实现，亟需构建面向韧性提升的城市水系统优化配置理论与方法，集成城市水系统水动力-水环境-水生态多目标协同的综合调度技术。

(5) 破解源网厂河湖水环境-水生态监测预警效率滞后、智慧化决策能力不足难题，是指导城市湖泊精准治污、科学治污、依法治污的必由之路。现有城市湖泊物联网管理平台缺乏源网厂河湖一体化治理理论与技术支撑；数据融合多侧重于采集清洗、计算存储等单一应用；且平台技术研发多聚焦底层技术框架构建，支持源网厂河湖全过程“监测-评价-决策”全链条业务化运行与智能管理平台尚未形成。因此，亟需突破多源数据融合应用能力低下、管理平台一体化拓展优势欠佳、辅助决策与调控程度薄弱等多技术集成壁垒，开发具有良好可移植性的源网厂河湖一体化水生态环境综合调度和管理平台，支撑长江流域城市湖泊水环境-水生态协同治理能力显著提升。

### 3 未来研究重点与实施路径

#### 3.1 坚持精准治污，提升城市面源全过程精准溯源与综合调控能力

##### (1) 城市面源污染物全过程迁移转化机制

面源污染精准溯源的关键在于明晰面源污染产生和输移的过程机理。研究应重点探讨三个机理：降雨过程中城市面源污染负荷的产生与陆面输移、污染物路面-管道量质交互迁移以及城市雨水管涵中污染物沉积迁移。未来可通过物理模型实验、原位观测、数值模拟等手段，揭示城市面源特征污染物在“地面-管道-河道-湖泊”中的迁移转化机制。

##### (2) 城市面源污染全过程精准溯源

针对城市小流域用地类型多样且复杂，污染源种类繁多且难以辨析等问题，在深入剖析不同口径雨水管涵污染物迁移转化规律的基础上，可结合 ArcGIS、卫星遥感等 3S 技术与元胞自动机、光滑粒子法等

数值方法<sup>[80, 81]</sup>, 创新建立精准高效的城市面源污染分布式模型, 以实现城市面源污染物高时空分辨率的溯源解析。

### (3) 城市面源污染全流程综合调控

如何实现精细化与智能化调控是高效削减城市面源污染的核心。基于高时空分辨率的溯源研究, 未来需创新开发更具针对性和高效的初雨面源污染负荷前端消减技术。同时, 应探究管涵沉积物主动调控技术, 例如优化污水泵站的调度运行, 实现管涵沉积物的主动冲刷。在末端控制方面, 根据不同排口水量水质响应特性, 优化截流控制措施(如智能分流井)的运行效能和稳定性, 以实现针对不同口径雨水管涵末端的精准截流, 解决初雨冲刷污染量差异导致的末端污水收集浓度问题。最终, 统筹考虑不同的城市面源污染控制技术的运行效能与协同效果, 形成全流程-多目标协同优化调控技术, 真正实现贯通“源-网-站-厂”的“前端消减-过程优化-末端拦截”面源污染全过程综合调控。

## 3.2 推动绿色转型, 加强尾水低耗高效与量质协同调控技术研发

### (1) 基于城市湖泊生态安全的补水水质指标构建及风险效应解析

污水厂尾水富含氮磷等营养物质及毒性污染物, 可显著影响城市湖泊的水环境及水生态健康<sup>[82]</sup>。应从污染物毒性及生态风险出发, 筛查污水厂尾水中影响城市湖泊生态安全的目标污染物, 明确城市湖泊生态补水中典型毒性污染物和营养盐物质阈值; 进一步结合城市湖泊的不同功能特点, 构建满足湖泊生态安全的城市湖泊补水水质指标体系, 阐明补水对城市湖泊污染物生消赋存的影响机制及潜在风险。

### (2) 污水厂尾水低耗高效净化技术研发

重点开展污水厂尾水毒性污染物靶向吸附材料开发、污水厂尾水毒性污染物定向催化技术研发、以及吸附催化耦合型污水厂尾水毒性污染物低耗高效消减技术开发等关键任务; 同时, 为降低城市湖泊富营养化风险, 针对性实施信号调控型微藻强化脱氮技术研发、水力增氧多介质湿地强化净化技术研发、以及微藻湿地组合型强化脱氮除磷技术研发等技术集成。

### (3) 基于多单元协作的城市水系统量质协同调控技术集成

从补给城市湖泊污水厂尾水生态风险控制的角度, 围绕尾水补给中目标污染物的高效去除, 从污水处理厂不同单元的功能及污染物减排绩效出发, 考察不同优化参数下目标污染物去除的规律; 利用进化算法、粒子群算法等多目标优化方法, 研发水系统多单元量质协同调控技术, 最终在降低处理能耗、保障出水水质的同时, 实现尾水生态风险的有效控制。

## 3.3 促进生态融合, 创新城市湖泊生态完整性与韧性提升技术体系

### (1) 研发基于自然解决方案的城市湖泊生态系统韧性提升技术

基于自然的解决方案指通过保护、可持续管理和修复生态系统, 可以有效和适应性地应人类活动及气候变化的挑战, 同时为人类福祉和生物多样性带来益处<sup>[83, 84]</sup>。针对当前城市湖泊所面临的人工干扰大、滨岸空间有限等特点, 未来的研究中应当加强湖泊生态系统退化机制及韧性提升机理研究, 研发水质改善与底泥控制生态安全性高效材料及装备, 构建湿地滨岸高效缓冲拦截带, 实现污染负荷高效和绿色处置。

### (2) 形成一套可复制的城市湖泊近自然生境重构技术体系

目前城市水生态修复技术种类繁多, 但是针对典型城市湖泊实践应用时, 仍然缺乏有效的技术参考。因此, 亟需从现有组合式、分散式、碎片化的生境重构技术转变为“滨岸-水体-底泥-生物”多层次的近自然生境重构技术体系, 实现不同维度技术的协同增效。

### (3) 建立城市湖泊生态系统韧性表征指标及其评估方法

生态系统韧性定义为面对外界干扰时维持先前状态的能力, 其能够综合表征生态系统结构和功能的完整性。目前对于城市湖泊生态系统韧性的定义、表征方法及评估方式等尚处于探索阶段, 未来研究应充分考虑生态学、环境学、地理学、管理学等学科的交叉特色, 结合湖泊生态系统定量模拟手段, 进行城市湖泊生态系统韧性的定量表征和评估, 实现生态系统韧性恢复与提升, 让生命与生态回归城市湖泊。

## 3.4 把握三水统筹, 推进城市水系统多目标优化配置与调度集成

### (1) 城市地表-管网-河湖一体化多变量耦合模拟技术研发

在深刻理解“三水统筹”的基础上，应形成一套科学有效的城市地表-管网-河湖一体化多维耦合模拟技术，辅助提升城市水系统的综合调控与管理水平。在后期研究中，综合考虑城市流域水文产汇流、水动力动态交互、污染物输移归趋、水生态要素演变等关键源汇过程，突破流域水文-城市管网-河网湖泊多维度耦合难点，建立多模块水量-水质-水生态动态实时耦合框架；进一步采用不确定性和敏感性分析方法，克服变量传递、尺度匹配难题，提高模型稳健性。

#### (2) 城市水系统多目标协同优化配置与调度技术集成

应构建面向城市水系统的多目标优化模型，通过大数据技术开展数据预处理与特征融合，形成高质量数据基础，并采用遗传算法、粒子群算法等智能优化方法提升求解效率<sup>[58, 59]</sup>。在调度与实施方面，一是基于优化结果制定多情景调度方案，综合考虑极端气候、突发污染等不确定性；二是建设集成管理平台，实现系统运行状态的实时监测与智能决策支持。推动政府与企业深度融合，将调配策略纳入管理流程，并通过试点验证其可行性后逐步推广。总体而言，未来研究应围绕“三水统筹”理念，依托多目标优化与智能算法促进城市水系统调度的科学化、系统化。

### 3.5 强化智慧监管，构建源网厂河湖一体化综合治理与管控新模式

#### (1) 源网厂河湖多场景监测-预警体系构建

源网厂河湖多场景监测-预警体系构建需要解决城市湖泊水系统多源异构数据质量控制问题和数据中心架构问题，突破城市水系统全链条多维度预警技术难题，进而构建源网厂河湖监测-预警体系。因此，未来研究需要识别源网厂河湖动态变化多尺度多维度实景数据，构建基于物联网监测优化布局的多源异构数据治理技术，打通城市水系统数据孤岛，实现数据全生命周期管控。在此基础上，建立多场景下的城市水系统预警关键指标、时空单元和预警阈值，构建水系统全链条多维度预警技术体系，提升城市湖泊的管理效率和应对突发事件的能力。

#### (2) 源网厂河湖一体化智慧管理平台技术研发

在智慧水利与智慧城市建设背景下，推进源网厂河湖一体化智慧管理平台的技术研发，是提升湖泊污染控制与生态调控效率的关键。未来可基于物联网监测、数据驱动分析和过程模型构建等方法，完善湖泊监管的关键技术体系与指标体系。随着大数据、云计算、人工智能和数字孪生技术的发展，通过空-天-地一体化监测、智能学习算法和多场景仿真推演，构建更具时空精度和响应能力的城市湖泊水环境与水生态数字化管理体系，实现污染负荷识别、生态响应评估和调控策略优化的闭环支撑。同时，将数字孪生与人工智能、大数据、虚拟现实/增强现实等技术深度融合，用于复杂水环境过程的可视化、敏感性分析和调度验证，将为城市湖泊智慧管理的拓展提供新的技术路径与研究方向。

## 4 结论与展望

针对目前长江流域城市湖泊面临的入湖污染负荷大、生态补水污染风险大、湖体水生态系统韧性不强、流域系统治理不全面等瓶颈问题。城市湖泊水环境-水生态协同治理应在以下方面加强：在精准治污方面，应深入研究污染物在“地表-管道-河道-湖泊”系统中的迁移转化机制，构建覆盖“源-网-站-厂”全流程的面源污染调控体系，形成“前端削减-过程优化-末端拦截”的系统治理路径；在绿色转型方面，应围绕城市湖泊生态安全补水的水质标准构建与风险效应评估，研发低耗高效的尾水净化技术，推动工程水向生态水的有效转化；在生态融合方面，应发展基于自然解决方案的湖泊生态系统韧性提升技术，建立可推广的近自然生境修复技术体系；在三水统筹方面，应集成城市水系统多目标优化与综合调度技术，实现节水增容、污染控制、生境改善与系统韧性的协同目标；在智慧监管方面，应完善“监测-评估-决策”全链条业务化运行机制，构建源网厂河湖一体化治理与智慧管控新模式，为国家生态文明建设与绿色发展战略提供关键技术支撑。

## 4 参考文献

- [1] Birch S, Mccaskie J. Shallow urban lakes: a challenge for lake management. *Hydrobiologia*, 1999, 395:365-377. DOI: 10.1023/A:1017099030774

- [2] Song C, Jiang X, Fan C *et al.* High-resolution circa-2020 map of urban lakes in China. *Scientific Data*, 2022, 9(1):747. DOI: 10.1038/s41597-022-01874-6
- [3] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 2006, 313(5790):1068-1072. DOI: 10.1126/science.1128845
- [4] Li Linsen, Wang Han, Liu Kai *et al.* The analysis of spatial distribution pattern of Chinese urban lakes and its influence factors. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(02):587-601. DOI: 10.18307/2024.0242. [李林森, 王涵, 刘凯等. 我国城市湖泊空间分布格局特征分析及影响因素探讨. 湖泊科学, 2024, 36(02):587-601.]
- [5] Zhang Yunlin, Deng Jianming, Zhou Yongqiang *et al.* Drinking water safety improvement and future challenge of lakes and reservoirs. *Science Bulletin*, 2024,69: 3558-3570. DOI: 10.1016/j.scib.2024.06.018
- [6] Zhao Yanhui, Li Tao, Huang Bo *et al.* Water quality and eutrophication evolution characteristics and driving factors of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5):1441-1451. [赵晏慧, 李韬, 黄波, 等. 2016-2020年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1441-1451.]
- [7] Zhu Guangwei, Xu Hai, Zhu Mengyuan *et al.* Changes in eutrophication status of lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River over the past 30 years and their driving factors. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6):15. DOI:10.18307/2019.0622. [朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素. 湖泊科学, 2019, 31(6):15. DOI:10.18307/2019.0622.]
- [8] Zhang Hang, Shen Laiyin, Miao Teng *et al.* Evaluation of eutrophication during the restoration process of urban lakes: A case study of Lake Nanhu in Wuhan. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(6):116 - 121. [张航, 沈来银, 苗滕, 等. 城市湖泊水体修复过程的富营养化评价——以武汉南湖为例. 河南师范大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 116 - 121.]
- [9] Hu Shenghua, Li Xin, Li Xiaohui *et al.* Response of water quality of eutrophic urban lakes to rainfall: A case study of Lake Donghu in Wuhan. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2025, 53(3):50 - 57. [胡胜华, 李鑫, 李小辉, 等. 城市富营养化湖泊水质对降雨的响应——以武汉东湖为例. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 50 - 57.]
- [10] Qin Boqiang, Yang Liuyan, Chen Feizhou *et al.* Lake eutrophication: mechanisms, control technologies and applications. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16):1857-1867. DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2006.16.001. [秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, 51(16):1857-1867.]
- [11] Qin Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3):193-202. DOI:10.18307/2002.0301. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.]
- [12] Pistocchi A. A preliminary pan-European assessment of pollution loads from urban runoff. *Environment Research*, 2020,182:109129. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109129.
- [13] Luo Huan, Chen Xiuhong, Wu Qiong *et al.* Spatio-temporal characteristics of non-point source and sewer overflow pollution and its impacts on water environment in Shenzhen Bay Basin. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12):3018-3028. DOI: 10.31497/zrzyxb.20201216. [罗欢, 陈秀洪, 吴琼等. 深圳湾流域面源与截排溢流污染特征及其对水环境的影响. 自然资源学报, 2020, 35(12):3018-3028.]
- [14] Kohl D H, Shearer G B, Commoner B. Fertilizer Nitrogen: Contribution to Nitrate in Surface Water in a Corn Belt Watershed. *Science*, 1971, 174(4016):1331-1334. DOI: 10.1126/science.174.4016.1331.
- [15] Deutsch B, Mewes M, Liskow I, *et al.* Quantification of diffuse nitrate input into a small river system using stable isotopes of oxygen and nitrogen in nitrate. *Org Geochem[J]. Organic Geochemistry*, 2006, 37(10):1333-1342. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2006.04.012
- [16] Johannsen A, Dähnke K, Emeis K. Isotopic composition of nitrate in five German rivers discharging into the North Sea. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(12):1678-1689. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2008.03.004.
- [17] Lv Qing, Gu Junqiang, Xu Shiqin *et al.* Application of Pre-Warning and Pollution Source Identification Technique Based on Fingerprint in Water Quality Monitoring of Surface Water. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(01):152-156. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6002.2015.01.030. [吕清, 顾俊强, 徐诗琴等. 水纹预警溯源技术在地表水水质监测的应用. 中国环境监测, 2015,

31(01):152-156.]

- [18] Huang Guoru, Wang Xin, Huang Wei. Simulation of Rainstorm Water Logging in Urban Area Based on InfoWorks ICM Model. *Water Resources and Power*, 2017, 35(02):66-70. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2017.02.016. [黄国如, 王欣, 黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟. 水电能源科学, 2017, 35(02):66-70.]
- [19] Chen L, Chen S B, Li S *et al.* Temporal and spatial scaling effects of parameter sensitivity in relation to non-point source pollution simulation. *Journal of Hydrology*, 2019, 571:36-49. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.045.
- [20] Chang T J, Wang C H, Chen A S. A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas. *Journal of Hydrology*, 2015, 524:662-679. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.014.
- [21] Zou Rui, Su Han, Chen Yan *et al.* A numerical source apportionment approach for quantifying the spatial-temporal water quality responses to watershed loadings. *China Environmental Science*, 2016, 36(12):3639-3649. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2016.12.015. [邹锐, 苏晗, 陈岩等. 流域污染负荷-水质响应的时空数值源解析方法研究. 中国环境科学, 2016, 36(12):3639-3649.]
- [22] Liu D S. China's sponge cities to soak up rainwater. *Nature*, 2016, 537(7620):307. DOI: 10.1038/537307e.
- [23] Reginato M, Picchota T C. Nutrient Contribution of Nonpoint Source Runoff in the Las Vegas Valley[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 40(6):1537-1551.
- [24] Montes C, Kapelan Z, Saldarriaga J. Predicting non-deposition sediment transport in sewer pipes using random forest. *Water Research*, 2021, 189. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116639.
- [25] Jia H, Ma H, Sun Z *et al.* A closed urban scenic river system using stormwater treated with LID-BMP technology in a revitalized historical district in China. *Ecological engineering*, 2014, 71:448-457. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.07.049.
- [26] Jung J W, Park H N, Yoon K S, *et al.* Event mean concentrations (EMCs) and first flush characteristics of runoff from a public park in Korea. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2013, 56(5): 597-604.
- [27] Hu Xiaoqing, Li Ruohan, Bai Congli. Application of Hydrocyclone Technology in Control Initial Rainwater Runoff Pollution. *Environmental Protection Engineering*, 2020, 38(2):248-252. [胡晓庆, 李若晗, 白聪莉. 水力旋流技术在初期雨水径流污染控制中的应用. 环境保护技术, 2020, 38(2):248-252.]
- [28] Li Qingxue, Xiao Wei, Wu Wei *et al.* Activated Carbon and Nanofiltration for Advanced Treatment of Tail Water from Sewage Treatment Plant. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(03):100-102. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2010.03.031. [李清雪, 肖伟, 吴伟等. 活性炭/纳滤工艺深度处理污水厂尾水的研究. 中国给水排水, 2010, 26(03):100-102.]
- [29] Jia Biao, Wang Zhanxin, Fu Xiaolin *et al.* Pilot-scale study on treatment of low temperature tail water in wastewater treatment plant by modified activated carbon. *Industrial Water & Wastewater*, 2020, 51(1):55-58, 87. [贾彪, 王占鑫, 伏晓林等. 改性活性炭处理污水厂低温尾水的中试研究. 工业用水与废水, 2020, 51(1):55-58, 87.]
- [30] Zhu Xiaoxia, Hao Ruixia, Fan Rongjin *et al.* Improvement of biodegradability of organics in WWTP tailwater by La, N co-doped TiO<sub>2</sub> process. *Water Purification Technology*, 2018, 37(12):91-97. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2018.12.018. [朱晓霞, 郝瑞霞, 范蓉锦等. 镧、氮共掺杂 TiO<sub>2</sub> 提高污水厂尾水的可生化性. 净水技术, 2018, 37(12):91-97.]
- [31] Du Erdeng, Wang Yulin, Fan Xinxin *et al.* Three Dimensional Fluorescence Analysis of CDOM for Tail Water Treatment by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Process. *Journal of Changzhou University(Natural Science Edition)*, 2018, 30(06):53-58. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.008. [杜尔登, 王聿琳, 樊鑫鑫等. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 工艺处理污水厂尾水 CDOM 的三维荧光分析. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(06):53-58.]
- [32] Kong Yu, Yang Xiaokang, Ren Junjun *et al.* Research progress on influencing factors of ozone oxidation process of effluent of wastewater treatment plants. *Energy Environmental Protection*, 2021, 35(4):1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2021.04.001. [孔宇, 杨笑康, 任军俊等. 污水处理厂尾水臭氧氧化工艺影响因素研究进展. 能源环境保护, 2021, 35(4):1-8.]
- [33] Zhao Anna, Feng Muhua, Guo Xiao *et al.* Experiential study on tailwater purification of wastewater plant with submerged macrophyte oxidation ponds. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(04):538-544. DOI: 10.1002/pola.21438. [赵安娜, 冯慕华, 郭箫等. 沉水植物氧化塘对污水厂尾水深度净化效果与机制的小试研究. 湖泊科学, 2010, 22(04):538-544.]
- [34] Xu Zheng, Wang Yanfei, Li Simin *et al.* Research status and prospect of biological sand filter for advanced treatment of tail water from sewage treatment plant. *Industrial Water & Wastewater*, 2023, 54(2):10-13, 58. [许铮, 王彦飞, 李思敏等. 生物砂滤池深度处理

污水厂尾水的研究现状及展望. 工业用水与废水, 2023, 54(2):10-13, 58.]

[35] He Qiang, Hu Shushan, Xiang Zeyi *et al.* Study on the nitrogen removal ability of vertical flow constructed wetland treating tailwater of sewage plant. *China Environmental Science*, 2023, 43(8):3956-3965. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2023.08.011. [何强, 胡书山, 向泽毅等. 垂直流人工湿地系统净化污水厂尾水脱氮效果. 中国环境科学, 2023, 43(8):3956-3965.]

[36] Yang Changming, Ma Rui, Wang Mengmeng *et al.* Removal Efficiency of Organic Substances in Effluent from a Municipal Sewage Plant by a Subsurface Constructed Wetland. *Journal Of Tongji University(Natural. Science)*, 2012, 40(8):1210-1216. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2012.08.015. [杨长明, 马锐, 汪盟盟等. 潜流人工湿地对污水厂尾水中有机物去除效果. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8):1210-1216.]

[37] Li Juanhong, Guan Fuzheng, Chen Changqiu *et al.* Evaluation of the Performance and Microbial Communities by a Hybrid Constructed Wetland System for Treating Wastewater Treatment Plant Tail-Water. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(10):104-109. DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2022.10.020. [李娟红, 管福征, 陈长秋等. 复合型人工湿地对污水厂尾水处理效能及微生物群落研究. 水处理技术, 2022, 48(10):104-109.]

[38] Song Siyuan, Liu Benfa, Zhang Wenjuan *et al.* Performance of a large-scale wetland treatment system in treating tailwater from a sewage treatment plant. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69(5): 833-839. DOI:10.1071/MF17203.

[39] Qiu Ye, Feng Yujie, Yan Zhenyu *et al.* Improving performance of pilot-scale ecological bed coupled with microbial electrochemical system for urban tail water treatment. *Science of The Total Environment*. 2023, 86, 161289. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161289.

[40] Chen Junfeng, Liu Shinian, Yan Jia *et al.* Intensive removal efficiency and mechanisms of carbon and ammonium in municipal wastewater treatment plant tail water by ozone oyster shells fix-bed bioreactor – membrane bioreactor combined system. *Ecological Engineering*, 2017, 101: 75-83. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.029.

[41] Tian Wei, Yang Zhousheng, Shao Keqiang *et al.* Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years. *Environmental Science*, 2020, 41(01):183-193. DOI: 10.13227/j.hjck.201906022. [田伟, 杨周生, 邵克强等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近 30 年水质变化为例. 环境科学, 2020, 41(01):183-193.]

[42] Xie, Hongyi, Li, Yumeng. An ecological water replenishment model of urban lake riparian plant restoration based on the groundwater-vegetation interactions. *Ecological Engineering*, 2022, 176: 106510. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106510.

[43] Chen Shiji, Zheng Xiangmin, Zhou Limin *et al.* A Review of Technology of Transporting Clean Water from Outer Watersource to Treat Urban Black-Odors Rivers. *Water Pollution Control*, 2014, 32(2):1-5. DOI: 10.13205/j.hjgc.201402001. [陈诗吉, 郑祥民, 周立旻等. 城市黑臭河网外源调水技术研究进展. 水污染防治, 2014, 32(2):1-5.]

[44] Liao Yipeng, Zhou Yulin, Fan Ziwu *et al.* Study on water quality changes of river work in Suzhou ancient city under summer drainage conditions. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5):18-26. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.003. [廖轶鹏, 周钰林, 范子武等. 夏季引流条件下苏州古城区河网水质变化研究. 水利水运工程学报, 2019(5):18-26.]

[45] Liu Junguo, Cui Wenhui, Tian Zhan *et al.* Progressive ecological restoration theory. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(9):1014 - 1025. [刘俊国, 崔文惠, 田展, 等. 渐进式生态修复理论. 科学通报, 66(9), 1014-1025.]

[46] Lin J, Liu M, Zhuang S *et al.* Effects on the migration and speciation of heavy metals by combined capping and biochemical oxidation during sediment remediation. *Science of The Total Environment*, 2023, 871:0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162055.

[47] Yang C, Wang W, Wang G *et al.* Combination of aquatic plant with phosphorus inactivation material to overcome high internal P loading in eutrophic urban lakes. *Journal of Cleaner Production*. 2024, 450:141919. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141919.

[48] Gao H, Qian X, Wu H *et al.* Combined effects of submerged macrophytes and aquatic animals on the restoration of a eutrophic water body—A case study of Gonghu Bay, Lake Taihu. *Ecological engineering*, 2017, 102:15-23. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.013.

[49] Gao Guang, Zhang Yunlin, Shao Keqiang. Shallow Lake Ecological Restoration and Grass Ecosystem Reconstruction—A Case Study in Lihu of Taihu Lake. *Science*, 2021, 73(03):9-12+4. [高光, 张运林, 邵克强. 浅水湖泊生态修复与草型生态系统重构实践——以太湖蠡湖为例. 科学, 2021, 73(03):9-12+4.]

[50] Fan S, Gu Y, Chen H *et al.* Effects of submerged plant restoration on methane release in Lake Xuanwu, a typical urban lake. *Journal of Lake Sciences*. 2025, 37(3):784-797. [樊施明, 顾于, 陈鹤等. 沉水植物恢复对典型城市湖泊玄武湖甲烷释放的影响. 湖泊科学,

2025, 37(3):784-797.]

- [51] Zhang Wanshun, Wang Hao, Zhou Feng. Application prospects of key technologies for synergistic management of water resource - waterenvironment - water ecology in Yangtze River Basin in context of building ecological civilization. *Yangtze River*, 2023, 54(1):8-13, 23. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.01.002. [张万顺, 王浩, 周奉. 长江流域三水协同调控关键技术应用展望. 人民长江, 2023, 54(1):8-13, 23.]
- [52] Ren Nanqi, Wang Xu. Development history and trend analysis with prospective of urban water system. *China Water Resources*, 2023(7):1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.07.002. [任南琪, 王旭. 城市水系统发展历程分析与趋势展望. 中国水利, 2023(7):1-5.]
- [53] Tao Xiangwan, Mo Li, Gong Daoxiao *et al.* Research on integrated management strategy of urban water system from the perspective of policy tools. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(1):67-71. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.01.014. [陶相婉, 莫罹, 龚道孝等. 政策工具视角下城市水系统全周期管理策略研究. 给水排水, 2021, 47(1):67-71.]
- [54] Gong Daoxiao, Hao Tian, Mo Li *et al.* Methodology of comprehensively promote urban water system governance. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(11):1-8. DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.06.21.0002. [龚道孝, 郝天, 莫罹等. 统筹推进城市水系统治理方法研究. 给水排水, 2022, 48(11):1-8.]
- [55] Yan Xin, Feng Yuanlin. Development and Application of Integrated Management Model of Urban Water Resources in Melbourne. *Construction Economy*, 2020, 41(S1):335-337. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.2020S1335. [闫欣, 冯园林. 墨尔本城市水资源综合管理模式的发展与应用. 建筑经济, 2020, 41(S1):335-337.]
- [56] Wang Hao, Jia Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions. *Shuili Xuebao*, 2016, 47(10):1219-1226. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20151297. [王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法. 水利学报, 2016, 47(10):1219-1226.]
- [57] Wang J, Qin T, Lv X *et al.* Study of Optimal and Joint Allocations of Water and land Resources for Multiple Objectives. *Water Resources Management*, 2023, 37(3):1241-1256. DOI: 10.1007/s11269-023-03427-x.
- [58] Shen X, Wu X, Xie X *et al.* Synergetic Theory-Based Water Resource Allocation Model. *Water Resources Management*, 2021, 35(7):2053-2078. DOI: 10.1007/s11269-021-02766-x.
- [59] Cai Y, Wang H, Yue W *et al.* An integrated approach for reducing spatially coupled water-shortage risks of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China. *Journal of hydrology*, 2021, 603:127123. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127123.
- [60] Li M, An R, Zhang Q *et al.* Multi-objective water resources optimization allocation with spatial equilibrium considerations: A case study of three cities in western Gansu Province. *Sustainability*, 2025, 17(19):8582. DOI: 10.3390/su17198582.
- [61] Nydrioni K, Baltas E, Giannakis E *et al.* Effective management of urban water resources under climate variability: A Mediterranean case study. *Scientific Reports*, 2024, 14:1855. DOI: 10.1038/s41598-024-79938-3.
- [62] Roozbahani A, Zarei A, Besharat M *et al.* Optimization of urban stormwater systems: A multi-criteria simulation - optimization framework. *Water Science & Technology*, 2025, 91(5):654-669. DOI: 10.2166/wst.2025.076.
- [63] Fu B, Horsburgh J S, Jakeman A J *et al.* Modeling water quality in watersheds: from here to the next generation. *Water Resources Research*, 2020, 56(11). DOI: 10.1029/2020wr027721.
- [64] Zhu Z, Li Y, Sun Y *et al.* A decision support framework for pollution source detection via coupled forward-inverse optimization and multi-information fusion. *Water Resources Research*, 2023, 59(6). DOI: 10.1029/2022WR032866.
- [65] Fan Penghui, Jiang Tao, Niu Chaoqun *et al.* Fault Diagnosis Method of Drainage Network Based on Liquid Level Monitoring Data and CNN-SVM. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(23):30-39. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.005. [范鹏辉, 姜涛, 牛超群等. 基于液位监测及CNN-SVM的排水管网缺陷诊断. 中国给水排水, 2023, 39(23):30-39.]
- [66] Cho, K. H., Pachepsky, Y., Ligaray, M *et al.* Data assimilation in surface water quality modeling: A review. *Water Research*, 2022, 186, 116307. DOI:10.1016/j.watres.2020.116307.
- [67] Shao Dong, Wang Zhiwei, Wang Bin *et al.* A water quality model with three dimensional variational data assimilation for contaminant transport. *Water Resources Management*, 2016, 30(13), 4501-4512. DOI:10.1007/s11269-016-1454-z.
- [68] Pastres, R., Ciavatta, S., Solidoro, C. The Extended Kalman Filter (EKF) as a tool for the assimilation of high frequency water

- quality data. *Ecological modelling*, 2023, 170(2-3), 227-235. DOI:10.1016/S0304-3800(03)00236-5.
- [69] Zhang Jie, Cao Cheng, Nan Tian *et al.* A novel deep learning approach for data assimilation of complex hydrological systems. *Water Resources Research*, 2024, 60(2), e2023WR035389. DOI:10.1029/2023WR035389.
- [70] Loos, S., Shin, C. M., Sumihar, J *et al.* Ensemble data assimilation methods for improving river water quality forecasting accuracy. *Water research*, 2020, 171, 115343. DOI:10.1016/j.watres.2019.115343.
- [71] Guo Xiaochen, Li Meng, Zhao Dongquan *et al.* Research and Progress on Optimal Layout of Monitoring Points in Urban Drainage Networks. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(4):26-31. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2018.04.006. [郭效琛, 李萌, 赵冬泉等. 城市排水管网监测点优化布置的研究与进展. 中国给水排水, 2018, 34(4):26-31.]
- [72] Jia Y, Zheng F, Zhang Q *et al.* Foul sewer model development using geotagged information and smart water meter data. *Water Research*, 2021, 204:117594. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117594.
- [73] Chen, G., Zhang, W., Liu, X *et al.* Development and application of a multi-centre cloud platform architecture for water environment management. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344, 118670. DOI:10.1016/j.jenvman.2023.118670.
- [74] Zahir, M., Su, Y., Shahzad, M. I *et al.* A review on monitoring, forecasting, and early warning of harmful algal bloom. *Aquaculture*, 2024 593, 741351. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2024.741351.
- [75] Xu Zuxin, Wang Shijing, Yin Hailong *et al.* Cost-effective Locating Inappropriate RainfallInflow into Urban Sewer Network. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2017, 45(3):384-390. [徐祖信, 王诗婧, 尹海龙等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法. 同济大学学报 (自然科学版), 2017, 45(3):384-390.]
- [76] Baracchini T, Wüest A, Bouffard D. Meteolakes: An operational online three-dimensional forecasting platform for lake hydrodynamics. *Water Research*, 2020, 172:115529. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115529.
- [77] Qin BQ, Li W, Zhu GW *et al.* Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China). *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 287: 356–363. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.047.
- [78] Lian Jijian, Yang Yang, Ma Chao. Research Progress and Frontiers of Comprehensive Regulation of Urban River Network for Water Environment Improvement. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, 2017, 50(8):781-787. DOI: 10.11784/tdxbz201705023. [练继建, 杨阳, 马超. 面向水环境改善的城市河网综合调控研究进展与前沿. 天津大学学报, 2017, 50(8):781-787.]
- [79] Lin C, Hu W, Xu J *et al.* Development of a visualization platform oriented to Lake water quality targets management - A case study of Lake Taihu. *Ecological Informatics*, 2017, 41:40-53. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.07.008.
- [80] Feng Chuhan, Zhang Na, Habiyakare T *et al.* Development of a cellular automata-based distributed hydrological model for simulating urban surface runoff. *Journal of Hydrology*, 2023, 627:130348. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130348.
- [81] Fei Xiaoming, Yan Hexiang, Tao Tao *et al.* Integrated rainfall – runoff process with shallow water model by mass varied smoothed particle hydrodynamics: Infiltration effect implementation. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(6):1190-1201. DOI: 10.1007/s42241-021-0098-5.
- [82] Qu Jiuhui, Zhao Jincai, Ren Nanqi *et al.* Critical Fundamental Scientific Problems in Reclamation and Reuse of Municipal Wastewater. *China Basic Science*, 2017, 1:6-12. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2017.01.002. [曲久辉, 赵进才, 任南琪, 等. 城市污水再生与循环利用的关键基础科学问题. 中国基础科学, 2017, 1:6-12.]
- [83] Raymond C M, Frantzeskaki N, Kabisch N *et al.* A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 2017, 77:15-24. DOI:10.1016/j.envsci.2017.07.008.
- [84] Seddon N, Chausson A, Berry P *et al.* Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 375(1794):20190120. DOI:10.1098/rstb.2019.0120.