

王浩晗, 汤显强, 彭康, 等. 城市河湖再生水生态补水研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 21-32, 56.

WANG H H, TANG X Q, PENG K, et al. Research progress of ecological water recharge with reclaimed water for urban rivers and lakes [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 21-32, 56.

城市河湖再生水生态补水研究进展

王浩晗¹, 汤显强^{1,*}, 彭康¹, 阮英²

(1. 长江科学院流域水环境研究所, 湖北武汉 430010; 2. 武汉市青山区水务局, 湖北武汉 430080)

摘要 【目的】 文章为探究再生水补水对城市水生态和水环境的具体影响,保障再生水安全、高效的利用,为再生水回用于城市河湖的研究提供参考。【方法】 基于再生水在城市河湖生态补水领域的应用实践与研究成果,通过中国知网和 Web of Science 数据库,检索与“再生水”“再生水生态补水”“reclaimed water”“reclaimed water recharge”相关的 4 万余篇文献,从年度发文量、研究焦点、发展趋势与前沿等角度进行研究分析。【结果】 再生水补水将影响其流速和流量等关键参数,其中可能含有营养盐、重金属及新型污染物等成分,会改变受纳河湖水质,影响水生生物的生长速率和群落结构。相关文献统计,受纳水体在增加补水频率、增设补水点或加倍补水量等措施实施后,整体水质有所改善。【结论】 再生水补给河湖能够改善水质,但其对生态环境健康的考虑相对不足,且各项水质标准规范的约束性指标数量和阈值存在差异,这进一步增加了潜在的生态环境风险,并且补水影响因素的设置与调控会影响再生水的补水效果。同时,未来研究应聚焦探索再生水补水改善河湖水环境的机制,提升污水处理技术,完善评价体系及构建智慧管理平台,以管控补水风险、保障生态环境安全和优化补水模式,推进城市河湖生态的健康、和谐与可持续发展。

关键词 再生水 生态补水 城市河湖 水环境 水生态

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0021-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.003

Research Progress of Ecological Water Recharge with Reclaimed Water for Urban Rivers and Lakes

WANG Haohan¹, TANG Xianqiang^{1,*}, PENG Kang¹, RUAN Ying²

(1. Basin Water Environment Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Water Affairs Bureau of Qingshan District, Wuhan 430080, China)

Abstract [Objective] This paper aims to explore the specific impact of reclaimed water replenishment on urban water ecology and water environment, ensure the safe and efficient utilization of reclaimed water, and provide a reference for the research on the reuse of reclaimed water in urban rivers and lakes. [Methods] Based on the application practice and research result of reclaimed water in the field of ecological water replenishment for urban rivers and lakes, through the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science databases, more than 40 000 literatures related to "reclaimed water", "reclaimed water ecological replenishment", "reclaimed water" and "reclaimed water recharge" are retrieved, and research and analysis are conducted from the perspectives of annual publication volume, research focus, development trends and frontiers. [Results] Ecological water recharge with reclaimed water affects key parameters such as flow rate and flow volume, and it may contain nutrients, heavy metals and new types of pollutants, which changes the water quality, and affects the growth rate and community structure of aquatic organisms. Related literature statistics show that the overall water quality of the receiving water bodies has improved after the implementation of measures such as increasing the recharge frequency, setting up additional recharge points or doubling recharge volume. [Conclusion] Ecological water recharge with reclaimed water can improve water quality, but its consideration of ecological health is relatively insufficient, and there are

[收稿日期] 2024-10-28

[基金项目] 中央级公益性科研院所基本科研业务项目(CKSF2024327/SH);2023 年度湖北省住房和城乡建设科学技术计划项目(2023057)

[作者简介] 王浩晗(2000—),女,硕士研究生,研究方向为水环境治理,E-mail:whh13962022@126.com。

[通信作者] 汤显强(1981—),男,正高级工程师,研究方向为流域水环境保护与治理,E-mail:ckyshj@126.com。

differences in the number of binding indices and thresholds of the various water quality standards and norms, which further increase the potential ecological environmental risks. And the setup and regulation of water replenishment factors affect the effect of reclaimed water replenishment. At the same time, future research should focus on exploring the mechanism of reclaimed water replenishment to improve the water environment, upgrading the sewage treatment technology, improving the evaluation system and constructing a smart management platform, to control the risk of water replenishment, guarantee the safety of the ecological environment, optimize the replenishment mode, and promote the healthy, harmonious and sustainable development of urban water ecology.

Keywords reclaimed water ecological water recharge urban rivers and lakes water environment water ecology

随着全球水资源日益紧缺,城市河湖面临着水量短缺、水体污染的严峻挑战。城市水体因深度浅、面积小、流速缓慢及水力停留时间长,自净能力较弱,易出现黑臭现象^[1-2]。生态补水,即通过调配各类水资源至无法满足生态需水量的河湖^[3],帮助恢复河湖生态系统结构和功能,已成为缓解当前困境的重要手段之一^[4]。传统的城市河湖生态补水方法主要依赖水库、河流和地下水等自然水源,成本较高。相比之下,再生水作为一种替代资源,不受气候、地理条件的限制,且供应稳定,可用于农林灌溉、景观美化、工业用水等多种场景^[5],同时也是城市河湖生态补水的重要水源。

目前,欧盟及日本、以色列等国家已将再生水作为城市水体的补给水源,每年再生水补水量超过1.0亿 m^3 ,有效改善了河湖生态环境^[6-8]。在我国,天津、泰安、西安、合肥和石家庄等地河湖生态补水量高达再生水利用总量的60%,显著恢复了河湖生态系统功能。然而,再生水中含有营养盐、重金属和抗生素等污染物^[9-10],其补给城市河湖水体存在潜在风险^[11]。尽管关于再生水安全利用的研究较为成熟,但具体到再生水回补对城市水生态和水环境的效应和机制,这一领域的研究在学术界仍有待进一步探索。

鉴于此,本文旨在通过检索和分析4万余篇国内外相关文献,更全面地理解再生水对城市河湖生态系统的影响机制。使用中国知网和Web of Science数据库,对“再生水”“再生水生态补水”“reclaimed water”“reclaimed water recharge”等关键词相关文献进行检索。分析发现,1919年以来,发文量总体呈现稳步增长的趋势。美国在再生水研究领域起步较早,是最早开展相关研究的国家之一。进入20世纪70年代,再生水研究热度持续上升,全球范围内的文献发表数量不断攀升。21世纪以后,我国再生水刚刚起步,但随后发展较为快速,文献发

表量呈现出迅猛增长的态势,最高年发文量超过700篇。同时,国际上的研究也呈现出快速发展的势头,文献年发文量呈上升趋势[图1(a)]。“景观水体”和“城市河湖”等关键词频繁出现,成为研究焦点。当前研究涵盖补水影响因素、补水效果提升、补水优化模拟等多个方面,“水生态”“水环境”等词则是再生水河湖生态补水研究领域中的关注热点。研究通常依赖于具体的工程实例,探讨再生水水质、补水频率、补水点和补水量等因子对补水效果的影响,以及对再生水回用后的风险进行评估和管控,确保在生态补水过程中的可靠性和有效性[图1(b)]。因此,本文通过综合分析国内外大量文献,概述了城市河湖再生水生态补水的发展现状和潜在应用价值,系统归纳了研究的进展,并提出了未来研究的重点方向,以期进一步促进该领域的科学理解和技术发展。

1 城市河湖再生水生态补水概况

1.1 城市河湖再生水生态补水发展历程

20世纪初期,国外率先在加利福尼亚、亚利桑那和佛罗里达等地建立了污水回用系统,开展再生水的利用^[12]。到了1970年,各国再生水利用量快速增加,并且到了21世纪初期,美国、日本、澳大利亚、新加坡和以色列等国的城市污水再生利用已经广泛普及。这些国家的再生水利用量每年达到了2亿 m^3 以上,主要应用于农业灌溉和工业用水,而用于河湖补水的比例相对较少。进入21世纪以来,随着城市河湖水生态环境问题的凸显,再生水回补城市河湖开始逐渐得到重视并发展^[13-14]。韩国仁川的谷浦川受到再生水补给后,枯水期因断流导致的水质恶化与生态退化问题可得到显著改善,生化需氧量(BOD)浓度下降了约30%,溶解氧(DO)浓度上升了12%。此外,随着生态环境和人居环境的改善,该地区的旅游收入显著增长^[15]。同样,美国芝加哥河因长期城市工业化及缺乏保护措施而逐渐渠

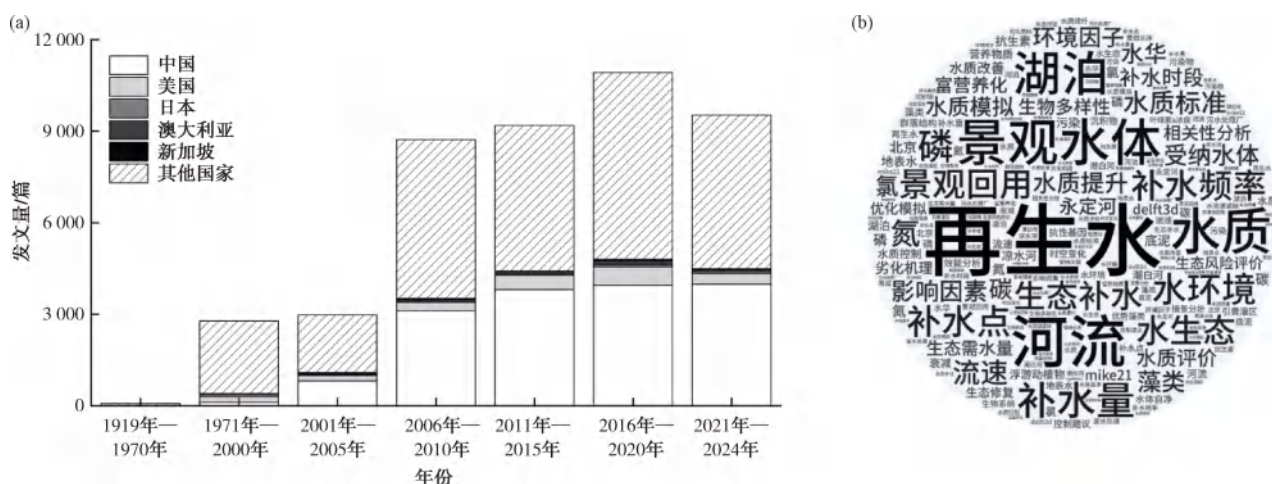


图 1 (a) 检索文献各国家发文量和(b)关键词检索结果

Fig. 1 (a) Number of Publications by Countries in the Retrieved Literature and (b) Keywords Search Results

化,河岸老化严重。通过再生水补给,芝加哥河的水质显著改善,水体透明度明显提升,河中的鱼类和水生无脊椎动物的多样性和数量显著增加,促进了生态环境的恢复^[16]。近些年,日本在城市河湖补水中使用再生水的比例高达 60%,北欧和南非约为 50%,而在南欧及美国、以色列,这一比例相对较低,在 20%~40%^[17]。

我国再生水利用研究始于 20 世纪 80 年代,起步较晚。然而,自 2015 年国务院印发《水污染防治行动计划》以来,许多城市将再生水循环利用纳入城市规划。根据《2023 年中国水资源公报》,2023 年我国再生水利用量已达 177 亿 m^3 ,相比 2022 年增长了 19%,并且是 2010 年再生水利用量的 5 倍

(图 2^[18])。其中,广东、北京、山东、江苏和河南尤为突出,年均利用量均超过 10 亿 m^3 。

补给城市河湖是国内再生水利用的首要途径。例如,北京市圆明园、龙潭湖、清河等公园湖泊和河道均已采用再生水补给,2023 年河湖生态补水量高达 11.5 亿 m^3 ,占再生水利用总量的 90.3%^[19]。具体而言,北京市的清河受到再生水补给后,水质得到了显著改善,化学需氧量(COD)和总磷(TP)浓度分别降低了 44%和 73%^[20]。永定河因干旱和城市化发展一度导致部分河段干涸,生态系统严重退化。补水后,部分河段水质显著提升至Ⅳ类甚至Ⅲ类标准,沿线地下水位平均回升 3.35 m,鱼类、鸟类、植物数量持续增长^[21]。在合肥市,每年再生水利用量

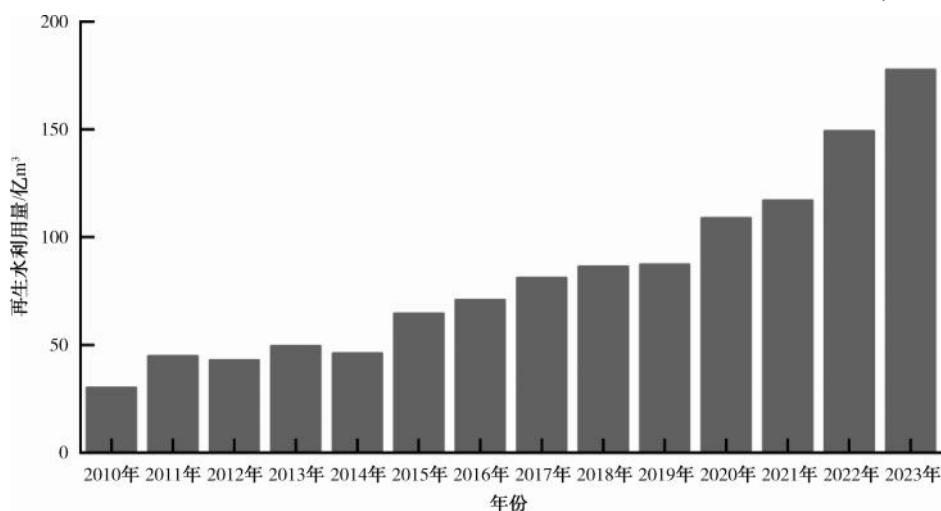


图 2 我国再生水年利用量^[18]

Fig. 2 Annual Utilization Capacity of Reclaimed Water at Home^[18]

约为 2.0 亿 m^3 ,主要用于河湖生态补水。再生水补给使南淝河和板桥河原本的黑臭水体得到明显改善,主要污染物浓度显著降低,生物多样性显著提升。此外,再生水还可以置换董铺水库、大房郢水库和张桥水库的千万吨级优质水资源,实现了水资源综合效益的最大化^[22]。西安市则将再生水用于护城河、汉城湖、未央湖等河湖的补给,年补给量约为 4 亿 m^3 。在 2019 年—2022 年,昆明市为采莲河等 11 条流入滇池的河道补充了约 10 亿 m^3 的再生水,不仅有效缓解了城市水资源的紧张局面,还为改善滇池水环境提供了重要支持^[23]。

目前,我国再生水生态补水处于快速发展阶段,并作为水质改善和生态修复的重要措施,其应用前景极为广阔。随着城市化进程加速,污水排放量急剧增加。2022 年,我国共处理 895 亿 m^3 污水,但再生水利用量仅占污水处理量的 1/6,这显示出再生水回用量具有巨大的增长潜力。在水质方面,已有的再生水处理技术,如混凝、膜处理、高级氧化等,能确保再生水水质满足回用要求。在补水需求方面,尽管各项治理措施使得城市河湖 V 类、劣 V 类水体占比降至 2%,但 IV 类水体占比却从 9% 上升至 18%,表明城市河湖生态状况仍需进一步改善,而生态补水是一项有效措施。此外,相较于远距离调水,依托城市污水处理厂的再生水输送工程造价较低,大幅降低了实施成本,有助于再生水在城市水资源管理中广泛应用。

1.2 城市河湖再生水生态补水水质要求

再生水水质是生态补水的核心要素。许多国家针对再生水的使用场景,从卫生安全、感官舒适度、环境适应性和技术经济可行性等方面综合制定了适用于城市河湖的再生水水质标准(表 1)。在这些水质标准中,pH、浑浊度、微生物、余氯是国际上普遍关注的指标。此外,欧盟和以色列在其标准中还特别强调了石油类化合物和阴离子表面活性剂等毒性指标。欧盟进一步将内分泌干扰物(EDCs)、药物残留、个人护理产品及全氟化合物等新型污染物纳入了考量范围,以确保再生水回用的广泛安全性和环境兼容性。

近 20 年来,我国陆续制定和实施了多项国家标准,以规范城市污水再生利用的水质标准、设施建设和配置规划。这包括《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)、《城市污水再生利用分

类》(GB/T 18919—2002)、《污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2002)及《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)(表 2)。相比国际标准,这些规范特别关注氮、磷营养盐的控制,为不同排放或回用场景设定了氨氮和 TP 的具体限值。《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)标准尤为重要,因为它专门针对城市河湖及其他景观水体中的再生水水质而设定(表 3)。尽管此标准未包含毒理指标,但它要求对受纳水体中的潜在污染物进行持续监测,以确保再生水在景观环境中的安全使用。

然而,适用于河湖生态补水的再生水水质标准仍待完善。我国各项水质标准规范尚未有效衔接,现行国家标准、行业标准的约束性指标数量和阈值存在明显差异。例如,《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)中对河湖用水水质的氮、磷指标要求,显著低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 V 类水质标准。而且,各项水质标准对再生水中的重金属、新型污染物等指标限制不足,这可能影响水体的长期生态安全。此外,现有生态补水模式主要侧重于满足水量与水质的基本需求,对于维护生态环境的健康考虑相对不足。这些模式未能充分遵循流域的生态水文过程,限制了河湖生态系统服务功能的发挥。例如,在补水过程中未能考虑河湖水生动植物生存所需的水位及水流波动的自然节律,这种做法可能干扰了敏感性水生动植物的生境。

2 再生水对河湖生态的影响

2.1 水文过程

再生水补水将调整河湖的水动力特性,影响其流速和流量等关键参数。当前,许多城市河湖面临水量短缺和流速缓慢,甚至出现停滞不流的情况,易导致黑臭水体的形成。例如,针对青岛李村河和昆明滇池流域的研究^[24-25]显示,再生水的补充增强了河湖流动性,显著改善了受纳水体的水动力条件。这种水流速度的增加,不仅增强了污染物的稀释和扩散能力,而且也加快了 DO 与污染物的反应速率,从而提升了河湖的自净能力。此外,再生水补水还直接影响河湖的水位。在干旱季节或水位较低时,适时补水可以有效提升水位,维护河湖生态系统的基本功能。而在降雨期间,由于雨水径流会增加污

表 1 不同国家或组织再生水生态补水回用标准对比
Tab. 1 Comparison of Ecological Water Recharge Standards for Reclaimed Water in Different Countries or Organizations

国家或组织	标准分类	pH 值	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	总悬浮物/ (mg·L ⁻¹)	浑浊度/ NTU	余氯/ (mg·L ⁻¹)	粪大肠杆菌/ (个·L ⁻¹)	毒理指标	其他
新加坡	城市用水	6.0~9.0	<5	/	<2	0.5~2.0	/	没有明确规定	/
约旦	城市河湖	6.0~9.0	≤30	≤50	≤10	/	≤1 000	没有明确规定	/
以色列	河流	7.0~8.5	≤10	≤10	/	/	≤2 000	对砷、铜等金属, 氰化物、氟化物、碳氢化合物以及石油类和阴离子表面活性剂有规定	/
美国	公众接触性娱乐性	6.0~9.0	≤10	/	≤2	≥1	/	没有明确规定	/
	非公众接触性娱乐性	6.0~9.0	≤30	≤30	/	≥1	≤2 000		
欧盟	非公众接触性娱乐性	6.0~9.5	10~20	10~20	/	0.05	/	对砷、铜等金属, 三卤甲烷、农药、五氯苯酚、石油类和阴离子表面活性剂等有毒物质有规定	EDCs 等新污染物都有规定; 采用总细菌数作为微生物指示物
日本	观赏性	5.8~8.6	/	/	<2	/	≤10 000	没有明确规定	采用大肠杆菌群数作为微生物指示物
	娱乐性	5.8~8.6	/	/	<2	游离余氯>0.1 或结合余氯>0.4	/		
中国	观赏性	6.0~9.0	≤6	/	≤5	≥0.05	≤1 000	没有单独规定, 执行 GB 18918—2002	氨氮、总氮(TN)、TP、色度均有限值
	娱乐性	/	≤6	/	≤5	/	≤1 000		
澳大利亚	娱乐性蓄水	/	/	/	/	/	≤10 000	没有明确规定	采用耐热大肠杆菌
	河流补充				视具体情况而定			/	作为微生物指示物

表 2 国内城市河湖再生水生态补水相关标准
Tab. 2 Domestic Standards for Ecological Water Recharge with Reclaimed Water for Urban Rivers and Lakes

标准或规范	类别	总大肠杆菌数量/(个·L ⁻¹)	浑浊度/ NTU	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	总悬浮物/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)
《地表水环境质量标准》 (GB 3838—2002)	Ⅲ类	≤10 000	/	≤4	≤1	≤0.2	/	≤1
	Ⅳ类	≤20 000	/	≤6	≤1.5	≤0.3	/	≤1.5
	Ⅴ类	≤40 000	/	≤10	≤2	≤0.4	/	≤2
《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)	观赏性景观 河道类	≤1 000	≤10	≤10	≤5	≤0.5	/	≤15
	环境用水 湖泊类	≤1000	≤5	≤6	≤3	≤0.3	/	≤10
	娱乐性景观 河道类	≤1 000	≤10	≤10	≤5	≤0.5	/	≤15
	环境用水 湖泊类	≤1 000	≤5	≤6	≤3	≤0.3	/	≤10
《水回用导则 再生水分级》 (GB/T 41018—2021)	B2 景观环境利用	≤1 000	≤5	≤6	≤3	≤0.3	/	≤10

染物负荷,再生水的补充可以有效稀释污染物浓度,降低污染风险。然而,如果在雨季补水过量,可能导致水位波动幅度过大,超出河湖的承载能力,这不仅会影响城市的排涝系统,还可能对防洪措施造成不

利影响^[26]。

2.2 水质

由于再生水水质标准与《地表水环境质量标准》中河湖水质要求存在差异,再生水的水质组分

表 3 我国再生水生态补水回用相关标准对比
Tab. 3 Comparison of Domestic Standards for Ecological Water Recharge with Reclaimed Water for Urban Rivers and Lakes

名称	发布时间	发布机构	主要内容
《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)	2019-06	国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会	规定了城市污水再生利用景观环境用水的水质指标、利用要求、安全要求、取样与监测
《城镇污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2016)	2003-01	中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局	适用于以景观环境用水、工业用水、城市杂用水、绿地灌溉用水、农田灌溉用水和地下水回灌用水等为污水再生利用途径的新建、扩建和改建的污水再生利用工程设计
《城市污水再生利用 分类》(GB/T 18919—2002)	2002-12	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局	规定了城市污水再生利用分类原则、类别和范围, 适用于水资源利用的规划, 城市污水再生利用工程设计和施工, 并为制定城市污水再生利用各类水质标准提供依据
《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)	2002-12	国家质检总局	分年限规定了城镇污水处理厂出水、废气和污泥中污染物的控制项目和标准值

与自然水体不同,当再生水补给于城市河流和湖泊时,会改变受纳河湖水质。在深圳茅洲河流域的再生水生态补水工程中,补水后的河道水质由劣 V 类水提升到 V 类水,水质在旱、雨季均较为稳定^[27]。然而,这种补水也可能导致受纳水体中氮磷浓度升高、DO 增加和浑浊度升高等现象。在北京潮白河和西安丰庆湖的再生水生态补水工程中,补水后的受纳河湖出现氮磷污染问题^[28-29]。再生水中的营养盐和内源氮、磷释放会打破受纳水体中原有的氮、磷限制,城市河湖多为缓流水体,其有限的纳污容量和自净能力导致藻类及其他浮游生物迅速繁殖,易引发水体富营养化风险。西安思源湖和汉城湖在长期接受再生水补给后,水体叶绿素 a、氮、磷浓度明显升高,藻类暴发风险随之增加^[30]。同时,由再生水引起的水华发生周期通常比自然水体中的水华更短,严重的水华甚至可能在一夜之间发生^[31]。为有效防控水体富营养化风险,应通过提升再生水水质、优先选择水动力较强的区域进行补水以减少营养盐局部积累,同时定期清除污染底泥,这些措施对于控制富营养化至关重要。同时,再生水可能含有的持久性有机污染物、消毒副产物(DBPs)、EDCs、微塑料等新污染物,以及重金属和病原微生物,也可能随着再生水的补给流入受纳河湖中^[32]。这些污染物不仅会进一步影响水质,而且还可能威胁水生生态系统的健康和平衡^[33]。

2.3 水生生物

2.3.1 水生动物

再生水补给河湖后,水环境中营养盐、有机质、DO 等变化会影响浮游动物的群落结构与生长状

况。这种变化通常促使对食物要求较低且种类繁多的小型浮游动物大量繁殖,其多样性指数可提升 60% 以上^[34]。

同时,补水过程对底栖动物群落结构也有显著影响。水位波动和流速的变化有助于改善河湖底质,从而影响底栖动物在水体中的聚集和分布,创造适宜其繁衍生息的生境^[35-36],进而丰富底栖物种多样性,增加物种数 50% 以上^[37]。

鱼类的群落结构也可随补水过程发生变化,多样性指数最高可提升一倍以上^[38]。然而,再生水补水也可能带来潜在威胁,其中残留的新污染物可能引发生态风险。例如,再生水中可能残留的 DBPs 可能导致斑马鱼胚胎出现卵黄囊异常、孵出延缓和卷尾等现象^[39],精神药物奥沙西泮可导致鲈鱼出现兴奋、不合群等异常行为^[40],而 EDCs 如壬基酚则可能干扰青鳉鱼和虹鳟鱼的性分化^[41]。因此,应着力提高再生水处理中对新污染物的去除效率,以确保再生水的安全性和稳定性。

2.3.2 水生植物

氮、磷、钾是植物生长发育的关键元素,但不同植被的需求存在差异。在北京永定河的再生水生态补水工程中,补水后的滨岸带植物平均株高和总盖度升高,而灌木和半灌木等植物的生长发育受到抑制,导致总体植被多样性降低^[42]。此外,补水过程改变了河湖的水位和流量,水生植物的生长情况与水位波动密切相关。在植物萌发期,较高的水位可能阻碍沉水植物萌发,而适当的低水位有助于控制荷花、睡莲等植物的生长^[43]。同时,再生水补水通过增加氮、磷营养盐的扩散速率,能够提高河湖中水

生植被的覆盖率^[44-45]。

水体氮、磷含量和氮磷比是影响藻类生长速率和群落结构的关键因素^[46-48],不同藻类生长的最适氮磷比存在差异,例如铜钱草在氮磷比为 16 : 1 时生长最佳^[49],而蓝藻门和绿藻门为 29 : 1^[50]。当再生水为河湖水环境额外补充氮、磷并改变氮磷比时,藻类生物量可提高 40% 以上,多样性指数可以增加一倍以上^[51]。此外,盐度也是影响藻类分布的重要因子,其变化还会影响藻类的平均比生长速率,高盐度水体对藻类生长具有显著的抑制作用。同时,盐度升高对水体中藻类的优势种群结构表现出明显的调控效应^[52-53]。微生物群落再生水中氮、磷等营养盐同样可以为微生物群落提供额外的营养物质,从而显著影响微生物群落的结构和多样性^[54-56]。在珠江某支流河段实施的再生水生态补水工程中观察到,再生水补给引起的水位波动和水体扰动增强了营养物质的扩散^[57-58],促进了受纳水体中细菌的生长繁殖,其中变形菌门和放线菌门成为了优势菌种^[59]。此外,再生水补给也改变了微生物分布的空间差异,使得补水口及其上下游微生物群落的物种丰富度指数可提升至一倍以上^[60]。再生水中的有毒有机微量污染物和重金属还可以增加河湖中耐受菌群的相对丰度,如残留余氯可能使耐氯菌属的相对丰度增加 5%^[61]。

3 城市河湖再生水生态补水方案的影响因素

在实施河湖生态补水时,再生水的出水水质达到标准要求,因此,在此基础上,还需要综合考虑再

生水补水频率、补水点和补水量等因素,以优化补水效果。

3.1 补水频率

根据相关文献统计[图 3(a)],增加补水频率后,水质改善的效果普遍超过了 30%。这说明在同等补水条件下,提高补水频率可以增强补水效果。数值模拟研究^[62]结果显示,大流量、间歇补水的方式优于小流量、连续补水,对 COD、氨氮、TN 和 TP 的降低效果可达到 50% 以上。补水频率还会影响水体的换水周期,即水体完全更换所需的时间。较短的换水周期有助于抑制藻类的大量繁殖,对于城市河湖,夏季、春秋季节、冬季的适宜换水周期在 3、10、20 d 内^[63]。

3.2 补水点

根据相关文献统计[图 3(b)],增设补水点后,水质改善效果通常在 30% 左右。这表明再生水补给河湖后,在受纳水体中产生了尽可能大的影响范围,通过增加补水点的数量和调整位置,可以最大化扩大水动力条件的影响范围,从而优化补水的效果。多点补水策略能有效提升水体的流动性,改善水质,并有助于缓解水体富营养化的问题^[64]。与集中式单点补水相比,每增加一个补水点,受纳水体的水质提升幅度可达 15%^[65]。此外,位于上游的补水点相对于下游的补水点能更有效地促进污染物的降解,整体水质改善幅度可达 7%^[66]。

3.3 补水量

根据相关文献统计[图 3(c)],当补水量加倍后,约 52% 的研究显示,水质改善效果在 0~30%。增加再生水补给量会改变补给点附近的流速,从而

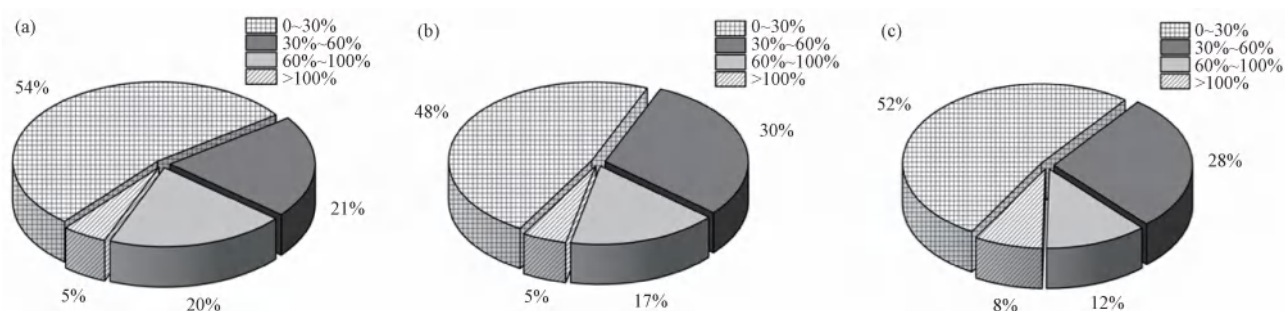


图 3 (a) 提高补给频率后水质改善效果(共 126 篇);(b) 增设补水点后水质改善效果(共 153 篇);

(c) 增加一倍补水量后水质改善效果(共 186 篇)

Fig. 3 (a) Improvement of Water Quality after Increasing the Recharge Frequency (126 Papers); (b) Improvement of Water Quality after Installing Additional Recharge Points (153 Papers); (c) Improvement of Water Quality after Doubling the Recharge Capacity (186 Papers)

影响受纳水体中营养盐的运移与混合过程,间接调节藻类的生长和繁殖动态。在流速小于 0.1 m/s 的条件下,低速水流有利于藻细胞对营养盐的吸收和利用,从而促进藻类的大量繁殖^[67]。相反,当流速超过 0.1 m/s 时,水流的剪切力将破坏藻细胞,抑制藻类生长并减缓水华的形成^[68]。此外,增大流速还能促进水体的循环和流通,例如,在补水流量增至4倍时,复氧系数可以提高近3.5倍^[69],显著增强受纳水体的复氧能力和自净效果,有助于改善城市河湖中的黑臭水体问题。在昆明翠湖的再生水补水数值模拟研究中,补水流量增至3倍时,COD和TP的减少量提升了30%^[70]。此外,年降水分布影响受纳水体的污染物浓度,地表径流污染随降雨量增加,因此,在雨季增加补水量可以有效稀释受纳水体中的污染物浓度,从而改善水质^[71]。

4 结论与展望

4.1 结论

再生水河湖生态补水有助于改善水环境质量,缓解水资源短缺问题。本文归纳总结了再生水补给河湖时对受纳水体水文过程、水质和水生生物的影响,以及补水频率、补给点、补水量对补水效果的优化作用,得出以下结论。

(1)再生水补给河湖后,河湖的水动力条件得到改善,水体自净能力得以提升。此外,再生水补水还有助于改善城市河湖的黑臭水体问题,并影响水生动植物及微生物群落的结构与生长。

(2)提高补水频率、增设补水点和提升补水量均能加强再生水补水效果,然而,在选择补水方案

时,应综合考虑实际条件和经济可行性,以确定最优的补水方案。

(3)再生水中的营养元素虽然为河湖生态提供必要的营养,但过量可能导致藻类过度繁殖和水体富营养化。因此,必须定期监测再生水的水质,评估其污染水平,并不断优化再生水的处理工艺,降低氮、磷等营养盐浓度,减轻潜在的环境风险。

4.2 展望

城市河湖再生水生态补水正稳健发展,展现出巨大的应用潜力和发展前景(图4)。未来研究应集中于探索再生水补水改善河湖水环境的机制,并鉴于再生水即便经过净化处理仍可能存在部分有机物、氮、磷以及新污染物等潜在污染问题,进一步加大技术研发力度。例如,加快新型高分子混凝剂的开发、自主研发低能耗滤膜技术以及推进污水再生深度处理技术(如高级氧化工艺)的应用,以降低技术成本,去除风险因子,提升再生水水质,降低补水风险。此外,还应完善再生水利用的优惠政策,出台价格激励措施,同时加强公众宣传,提高再生水生态补水的社会认知度。在此基础上,还需完善再生水生态补水的评价体系并构建河湖一体化的智慧管理平台,有效管控再生水补水的生态风险,推动其在城市河湖管理中的可持续发展。

4.2.1 探究再生水生态补水改善河湖水生态的机理

受纳水体生态系统对再生水中多种组成成分具有复杂的响应机理,其中敏感生物或生物群落的演替过程尚不明晰。现有研究多聚焦于某些指标对河湖水环境的直接影响,忽视了生态系统整体相互作

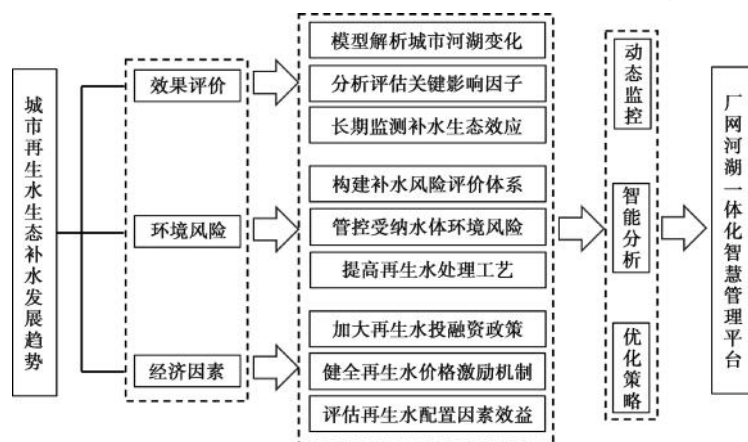


图4 城市再生水生态补水发展趋势

Fig. 4 Development Trend of Ecological Water Recharge with Reclaimed Water

用的机制。因此,应跟踪分析再生水生态补给城市河湖的实际案例,揭示城市河湖生态系统核心生物群落结构、组成及与环境因子的响应关系,探究改善水生态的物理、化学及分子生物学过程,构建水动力水质模型精准解析生态补水后的河湖变化,采用水质指标评价体系,评估受纳河湖生态环境变化的关键因子,建立监测网络覆盖补给河湖的关键区域,持续监测再生水在补水实践中的生态效应,形成动态的监测-评估-反馈机制,为制定科学合理的生态补水策略提供坚实依据。

4.2.2 完善再生水补水风险监管和评价体系

我国现行的再生水水质标准与河湖水环境质量标准之间并没有完全匹配,其指标阈值设定相对较低,当其补给河湖时可能带来潜在的水生态环境和人体健康风险。因此,再生水水质标准应充分考虑河湖生态环境需求,确保补水措施在保障合理生态水量基础上,有效提升河湖水质,从而持续改善河湖水生生物完整性指数,并推动城市河湖生态系统服务功能的恢复。同时,鉴于河湖 TN 考核的差异性,可通过建立水量水质数学模型等方法计算补给后入湖河流的 TN 限值,从而确保其 TN 指标符合湖泊 TN 考核要求。此外,还亟需以污染物毒性与富营养化风险为核心筛选确定控制指标,构建适用于城市河湖再生水生态补水的风险评价体系,对城市河湖的生态健康状况进行及时有效评估。在此基础上,提出适合于城市河湖生态补水特点的监测技术和指标综合性分析方法,通过健康风险评价来识别受纳河湖面临的主要风险源和风险途径,量化河湖风险等级,管控环境风险,以确保再生水生态补水过程的安全性和有效性。

4.2.3 构建厂网河湖一体化智慧管理平台

整合多源数据,建立智慧管理平台是各行业未来发展的必然趋势。因此,未来可整合水厂、管网、河流和湖泊等各个环节,构建厂网河湖一体化的智慧管理平台,通过物联网技术,将河湖水体信息进行即时监控并动态记录,通过云计算将各个环节数据整合,实现流量、水位、水质等数据的实时传输和智能分析,基于河湖生态系统的实际需求,模拟优化城市河湖再生水生态补水的调配策略,构建科学合理的监测体系与评估机制,实现再生水的合理配置与高效利用,保障生态补水工程的稳定运行。

参考文献

- [1] TWILLEY R R, RICK S, BOND D C, et al. Benthic nutrient fluxes across subtidal and intertidal habitats in Breton sound in response to river-pulses of a diversion in Mississippi River Delta [J]. *Water*, 2021, 13(17): 2323.
- [2] AO D, CHEN R, WANG X C, et al. On the risks from sediment and overlying water by replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 488-497. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.01.105.
- [3] LIU S H, LI Y, GE Y X, et al. Analysis on the impact of river basin ecological compensation policy on water environment pollution[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): 13774.
- [4] DOU X, MA X F, HUO T C, et al. Assessment of the environmental effects of ecological water conveyance over 31 years for a terminal lake in Central Asia[J]. *Catena*, 2022, 208: 105725. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105725.
- [5] CAI Y N, BI Y Z, TIAN B W, et al. Water quality characteristics and ecological risk evaluation of a landscaped river replenished by three reclaimed water sources in Qingdao, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2024, 31(24): 35609-35618.
- [6] CHEN J, QIAN H, GAO Y Y, et al. Insights into hydrological and hadrochemical processes in response to water replenishment for lakes in arid regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124386. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124386.
- [7] QI Y R, ZHONG Y X, LUO L L, et al. Feasibility analysis of reclaimed water reuse based on water quality data and microbial community structure study [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 174781. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174781.
- [8] LI Q, WANG W J, JIANG X H, et al. Analysis of the potential of reclaimed water utilization in typical inland cities in northwest China via system dynamics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110878. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110878.
- [9] MA Y J, MODRZYNSKI J J, YANG Y X, et al. Redox-dependent biotransformation of sulfonamide antibiotics exceeds sorption and mineralization: Evidence from incubation of sediments from a reclaimed water-affected river [J]. *Water Research*, 2021, 205: 117616. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117616.
- [10] WANG R M, JI M, ZHAI H Y, et al. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in WWTP effluent-receiving water bodies and reclaimed wastewater treatment plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148919.
- [11] DENG S X, YAN X T, ZHU Q Q, et al. The utilization of reclaimed water: Possible risks arising from waterborne

- contaminants [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 113020. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113020.
- [12] KESARI K K, SONI R, JAMAL Q M S, et al. Wastewater treatment and reuse: A review of its applications and health implications[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2021, 232(5): 208. DOI: 10.1007/s11270-021-05154-8.
- [13] SANCHÍS J, PETROVIĆ M, FARRÉ M J E. Emission of (chlorinated) reclaimed water into a Mediterranean River and its related effects to the dissolved organic matter fingerprint [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143881. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143881.
- [14] BAI L, BAI Y J, HOU Y, et al. Ecological water replenishment to the Yongding River, China: Effects of different water sources on inorganic ions and organic matter characteristics [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 39107–39120. DOI: 10.1007/s11356-022-25017-x.
- [15] JANG D W. Analysis of the water quality improvement in urban stream using MIKE 21 FM [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(19): 8890.
- [16] 马圣玥, 范力瑾, 朱佳, 等. 芝加哥水污染治理策略[J]. *环境与发展*, 2019, 31(2): 245–247.
MA S Y, FAN L J, ZHU J, et al. Water pollution control strategy of Chicago [J]. *Environment and Development*, 2019, 31(2): 245–247.
- [17] 北京市水务局. 2023 年北京市水资源公报[R]. 北京: 北京市水务局, 2023.
Beijing Water Authority. Beijing water resources bulletin(2023) [R]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Water Affairs, 2023.
- [18] 中华人民共和国水利部. 2023 年中国水资源公报[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2023.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin(2023) [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2023.
- [19] CHEN W P, BAI Y, ZHANG W, et al. Perceptions of different stakeholders on reclaimed water reuse: The case of Beijing, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(7): 9696–9710.
- [20] AN S Q, SONG Y, FU Q, et al. Reclaimed water use improved polluted water's self-purification capacity: Evidenced by water quality factors and bacterial community structure[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 386: 135736. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135736.
- [21] 吕红霞, 张森, 王东水, 等. 永定河北京段生态补水回顾与思考[J]. *北京水务*, 2024(4): 40–46.
LÜ H X, ZHANG M, WANG D S, et al. Retrospect and reflection on ecological water replenishment in Yongding River of Beijing section[J]. *Beijing Water*, 2024(4): 40–46.
- [22] 陶志佳, 王斌, 张勤, 等. 基于再生水利用的合肥市中心城区河湖生态需水量优化配置[J]. *给水排水*, 2020, 46(10): 52–58.
- TAO Z J, WANG B, ZHANG Q, et al. Optimized allocation of ecological water requirement for rivers and lakes in the downtown area of Hefei City based on recycled water utilization [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(10): 52–58.
- [23] 杜吉灿. 昆明市再生水利用回顾与展望[J]. *水科学与技术*, 2023(2): 1–3.
DU J C. Review and prospect of the related works on reclaimed water in Kunming [J]. *Water Science and Engineering Technology*, 2023(2): 1–3.
- [24] 李晋, 辛克刚, 王磊, 等. 基于 MIKE 11 的城市雨源型河流再生水补水方案研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(s1): 681–686.
- LI J, XIN K G, WANG L, et al. Research on the scheme of reclaimed water supplement for urban ephemeral river based by MIKE 11 [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(s1): 681–686.
- [25] 陈刚, 桑学锋, 顾世祥, 等. 多源水联合调度重构滇池流域健康水循环模式[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 57–69.
CHEN G, SANG X F, GU S X, et al. Joint disposals of multi-source water resources for rehabilitating healthy water cycle in Lake Dianchi Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 57–69.
- [26] 张雪. 再生水修复河道的蓄水变化及河岸带土壤理化特性研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
ZHANG X. Change in water storage of river restored by reclaimed water and study on riparian soil physical and chemical properties [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [27] 赵思远, 唐颖栋, 唐晓斌, 等. 茅洲河流域再生水补水方案研究与实践[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(12): 128–136.
ZHAO S Y, TANG Y D, TANG X B, et al. Research and practice of reclaimed water replenishment in Maozhou River Basin [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(12): 128–136.
- [28] 李海云, 邸琰茗, 李东青, 等. 北京市潮白河再生水补水河段水质时空变异[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(10): 1542–1552.
LI H Y, DI Y M, LI D Q, et al. Spatial and temporal variations of water quality in a wetland-reclaimed water-supplied purification urban river: Case study in Chaobai River of Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(10): 1542–1552.
- [29] ZHAO H J, WANG Y, YANG L L, et al. Relationship between phytoplankton and environmental factors in landscape water supplemented with reclaimed water [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 113–121. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.03.033.
- [30] 刘轩, 陈荣, 雷振, 等. 再生水补水条件下底泥对藻类生长影响作用[J]. *环境工程*, 2018, 36(7): 37–41.
LIU X, CHEN R, LEI Z, et al. Effect of sediment on the growth of algae under recycled water supplement conditions [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(7): 37–41.

- [31] SUN D Y, LIN X H, LU Z B, et al. Process evaluation of urban river replenished with reclaimed water from a wastewater treatment plant based on the risk of algal bloom and comprehensive acute toxicity[J]. *Water Reuse*, 2022, 12(1): 1–10.
- [32] CHEN R, AO D, JI J Y, et al. Insight into the risk of replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 324: 573–582. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.028.
- [33] TEKLEHAIMANOT G Z, GENTHE B, KAMIKA I, et al. Prevalence of enteropathogenic bacteria in treated effluents and receiving water bodies and their potential health risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 518/519: 441–449. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.03.019.
- [34] 李智, 王怡, 王文怀. 不同水源补给对景观水体水质及浮游动物的影响[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(5): 91–96, 105.
- LI Z, WANG Y, WANG W H. Effects of different water sources supply on water quality and zooplankton in landscape waters[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(5): 91–96, 105.
- [35] ZHANG Y R, YIN Z Q, WANG Y, et al. Zooplankton structure and ecological niche differentiation of dominant species in Tahe Bay, Lushun, China[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19): 8590.
- [36] 林海, 王源, 李冰. 北京市妫水河浮游动物群落结构与水质评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7583–7591.
- LIN H, WANG Y, LI B. Evaluation of zooplankton community structure and water quality of Guishui River, Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7583–7591.
- [37] 渠晓东, 余杨, 张敏, 等. 城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 783–791.
- QU X D, YU Y, ZHANG M, et al. Relationship between macrophyte communities and macroinvertebrate communities in an urban stream[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 783–791.
- [38] 孟婷婷, 董月群, 闻丞, 等. 生物多样性导向的再生水补给型城市河道水生态修复效果[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1552–1561.
- MENG T T, DONG Y Q, WEN C, et al. Biodiversity-oriented water ecological restoration effect in urban river with reclaimed water supply[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1552–1561.
- [39] 白娟娟, 唐天乐, 余芬芳, 等. 利用斑马鱼胚胎研究污水处理工艺中 DOM 与 DBPs 的关系[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(6): 146–150.
- BAI J J, TANG T L, YU F F, et al. Study on relationship between DOM and DBPs in the wastewater treatment process based on zebrafish embryos[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 38(6): 146–150.
- [40] ZHAO X H, WANG X F, LANG H, et al. Effects of reclaimed water supplementation on the occurrence and distribution characteristics of antibiotic resistance genes in a recipient river[J]. *Processes*, 2024, 12(8): 1717.
- [41] 王培京, 胡明, 孙德智. 再生水补给河道中内分泌干扰物壬基酚变化特征分析[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(7): 1645–1652.
- WANG P J, HU M, SUN D Z. Analysis on the variation characteristic of endocrine disrupting chemicals nonylphenol in the reclaimed water supply river[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(7): 1645–1652.
- [42] 张羲, 于一雷, 李胜男, 等. 再生水补水的北京典型河流滨岸带植被分布特征及多样性研究[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(4): 45–55.
- ZHANG Y, YU Y L, LI S N, et al. Riparian vegetation distribution and diversity characteristics of typical rivers supplemented with reclaimed water in Beijing[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(4): 45–55.
- [43] 孙泽悦, 姜翠玲. 基于水生植物修复的玄武湖生态水位研究[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 49–54, 76.
- SUN Z Y, JIANG C L. Study on ecological water level of Xuanwu Lake based on aquatic plant restoration[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3): 49–54, 76.
- [44] LÜ X M, ZHANG J, LIANG P, et al. Phytoplankton in an urban river replenished by reclaimed water: Features, influential factors and simulation[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106090. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106090.
- [45] SHAN X, LI C G, LI F M. Water quality variation of a typical urban landscape river replenished with reclaimed water[J]. *Water Cycle*, 2023, 4: 137–144. DOI: 10.1016/j.watcy.2023.04.001.
- [46] SONG K Y, LU Y, DAO G H, et al. Reclaimed water for landscape water replenishment: Threshold nitrogen and phosphorus concentrations values for bloom control[J]. *Algal Research*, 2022, 62: 102608. DOI: 10.1016/j.algal.2021.102608.
- [47] DU W R, WANG J W, ZHAO X H, et al. Algal or bacterial community: Who can be an effective indicator of the impact of reclaimed water recharge in an urban river[J]. *Water Research*, 2023, 247: 120821. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120821.
- [48] TISON-ROSEBERY J, LÉBOUCHER T, ARCHAIMBAULT V, et al. Decadal biodiversity trends in rivers reveal recent community rearrangements[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153431. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153431.
- [49] 刘鑫, 胡淑恒, 张择瑞, 等. 氮磷比对铜钱草浮床处理富营养化水体的影响[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(7): 978–985.
- LIU X, HU S H, ZHANG Z R, et al. Effect of nitrogen to phosphorus ratio on the treatment of eutrophic waterbody by

- Hydrocotyle vulgaris* L. floating bed [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 46(7): 978–985.
- [50] 杨震, 张会强, 陈静, 等. 不同氮磷比对北洛河中藻类生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2069–2076. YANG Z, ZHANG H Q, CHEN J, et al. Effects of nitrogen/phosphorus ratios on algae growth in the Beiluo River [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(9): 2069–2076.
- [51] 侯颖, 李信, 白灵, 等. 不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5616–5626. HOU Y, LI X, BAI L, et al. Phytoplankton community structures and their relationship with environmental factors in rivers supplied with different water sources [J]. Environmental Science, 2022, 43(12): 5616–5626.
- [52] 张扬, 熊家晴, 王晓昌, 等. 盐度对再生水补水水体水质变化影响的研究[J]. 环境科技, 2016, 29(6): 17–21. ZHANG Y, XIONG J Q, WANG X C, et al. Effect of salinity on water quality variations of the pond replenished by reclaimed water [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 29(6): 17–21.
- [53] 许洪斌, 王文东, 王楠, 等. 再生水补水景观湖浮游藻类群落结构特征及与环境因子的关系[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6416–6424. XU H B, WANG W D, WANG N, et al. Phytoplankton community structure and its relation to environmental factors in landscape lake supplemented with reclaimed water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6416–6424.
- [54] LI Z X, SUN Z Y, ZHANG L, et al. Investigation of water quality and aquatic ecological succession of a newly constructed river replenished by reclaimed water in Beijing [J]. Heliyon, 2023, 9(6): e17045.
- [55] ZHANG C M, XU P C, WANG X C, et al. Bacterial viability and diversity in a landscape lake replenished with reclaimed water: A case study in Xi'an, China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(26): 32796–32808.
- [56] WANG J W, CHEN Y, CAI P G, et al. Impacts of municipal wastewater treatment plant discharge on microbial community structure and function of the receiving river in northwest Tibetan Plateau [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423: 127170. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127170.
- [57] XIE E, ZHAO X H, LI K, et al. Microbial community structure in the river sediments from upstream of Guanting Reservoir: Potential impacts of reclaimed water recharge [J]. Science of the Total Environment, 2021, 766: 142609. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142609.
- [58] LI J, SUN Y J, WANG X Y, et al. Changes in microbial community structures under reclaimed water replenishment conditions [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(4): 1174.
- [59] 刘德荣, 闻钟. 再生水补水对城市河流水体细菌群落的影响研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(10): 101–105, 117. LIU D R, WEN Z. Study on the influence of reclaimed water supplementation to the bacterial community in city river water [J]. People's Yellow River, 2023, 45(10): 101–105, 117.
- [60] GAO H, YANG L H, SONG X F. Effect of reclaimed water recharge on bacterial community composition and function in the sediment of the Chaobai River, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 23(1): 526–538.
- [61] 邱超超. 青岛市李村河再生水补水河段微生物群落多样性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023. QIU C C. Study on microbial community diversity in the reclaimed water reclaimed water section of Licun River in Qingdao [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023.
- [62] 周佳波. 生态补水对城市河道水质的改善规律研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(12): 41–46. ZHOU R B. Study on the law of ecological water recharge and improvement of urban water quality [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2022, 28(12): 41–46.
- [63] PAN C Z, GUO Z F, LUO M J. A simulation experiment on quality dynamics of reclaimed water under different flow exchanges [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(20): 13091.
- [64] LUO X, LI X Y. Using the EFDC model to evaluate the risks of eutrophication in an urban constructed pond from different water supply strategies [J]. Ecological Modelling, 2018, 372: 1–11. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2018.01.020.
- [65] 王菲菲, 卿晓霞, 俞思嘉. 河流生态补水工程实施的优化配置方式[J]. 水文, 2021, 41(5): 48–52, 90. WANG F F, QING X X, YU S J. Optimal allocation method for implementation of river ecological water replenishment project [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(5): 48–52, 90.
- [66] 夏高原, 葛军, 柯正辰, 等. 城市内河综合水质对再生水补水的响应[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 136–142. XIA G Y, GE J, KE Z C, et al. Comprehensive water quality of urban river in response to reclaimed water recharge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 136–142.
- [67] 郭中方, 潘成忠, 刘春雷, 等. 再生水补给条件下河流水质及河岸渗滤水质演变试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 126–134. GUO Z F, PAN C Z, LIU C L, et al. Experimental study on the evolution of river water quality and riverbank percolation water quality under reclaimed water supply [J]. South-to-North Water (下转第 56 页)

- [3] ZHANG X H, SANG G Q. Research on water body information extraction and land use status of Nansi Lake based on high-resolution images [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. England: IOP Publishing, 2019.
- [4] 马景,武周虎. 南四湖水质评价及改善效果分析[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(6): 101-105.
MA J, WU Z H. Evaluation of water quality of Nansihu Lake and analysis of improvement effect[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2021, 42(6): 101-105.
- [5] 张志斌, 闫大江, 鞠颂, 等. 平水期/枯水期南四湖溶解性有机物差异特征[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 48-55.
ZHANG Z B, YAN D J, JU S, et al. Differences in characteristics of dissolved organic matter in Nansi Lake during normal and dry seasons [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 48-55.
- [6] 王滨勇, 刘楠, 童力. 南四湖流域硫酸盐来源及管控措施分析[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 119-123.
WANG B Y, LIU N, TONG L. Study on the source and control measures of sulfate in Nansi Lake Basin [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science Edition), 2021, 47(2): 119-123.
- [7] 李双双, 杜强, 杜霞, 等. 湖库型饮用水水源地安全评价新方法探索[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 151-157.
LI S S, DU Q, DU X, et al. Exploration of new methods for security assessment of lake-reservoir-type drinking water resources [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(7): 151-157.
- [8] 朱学武, 成小翔, 谢柏明, 等. 超滤/纳滤组合工艺的运行与优化研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 10-15.
ZHU X W, CHENG X X, XIE B M, et al. Operation and optimization of ultrafiltration/nanofiltration hybrid membrane process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 10-15.
- [9] 李圭白, 梁恒, 白朗明, 等. 绿色工艺——第三代饮用水净化工艺的发展方向[J]. 给水排水, 2021, 47(9): 1-5.
LI G B, LIANG H, BAI L M, et al. Green process: Development direction of the third generation drinking water purification process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(9): 1-5.
- [10] 李圭白, 田家宇, 齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水, 2010, 36(8): 11-15.
LI G B, TIAN J Y, QI L, et al. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of ultrafiltration [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(8): 11-15.
- [11] 王明远. 超滤-纳滤组合工艺处理南水北调微污染源水效能及调控[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
WANG M Y. Ultrafiltration-nanofiltration combined process to treat the water efficiency and regulation of micro-polluted water sources in the south-to-north water diversion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [12] LIU H J, HU C Z, ZHAO H, et al. Coagulation of humic acid by PAC with high content of Al_{13} : The role of aluminum speciation[J]. Separation and Purification Technology, 2009, 70(2): 225-230.

(上接第 32 页)

- Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 126-134.
- [68] LIN X H, LI S Y, SUN D, et al. Assessment and comprehensive evaluation of large-scale reclaimed water reuse for urban river restoration and water resource management: A case study in China[J]. Water, 2023, 15(22): 3909.
- [69] ZHANG X Q, DUAN B S, HE S Y, et al. Simulation study on the impact of ecological water replenishment on reservoir water environment based on MIKE 21——Taking Baiguishan Reservoir as an example[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108802. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108802.
- [70] 吴雪, 何佳. EFDC 模型在城市景观水体生态补水工程设计中的应用——以昆明市翠湖为例[J]. 环境保护科学, 2019, 45(1): 73-78.
WU X, HE J. The application of EFDC model in the design of ecological water supplement project for urban landscape water-case study of the Green Lake in Kunming [J]. Environmental Protection Science, 2019, 45(1): 73-78.
- [71] 王奕博, 郭甜甜, 刘攀, 等. 城市湖泊随季节变化的生态补水数值模拟研究[J]. 人民长江, 2024, 55(7): 44-52, 72.
WANG Y B, GUO T T, LIU P, et al. Numerical simulation on seasonal ecological water supplement for urban lakes [J]. Yangtze River, 2024, 55(7): 44-52, 72.