



突破城市水生态治理卡点的经验与路径

谢铮铮¹, 胡斌^{2,3}, 刘刚^{2,3,✉}

1. 中持新概念环境发展宜兴有限公司, 宜兴 214200; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 生态治理的要点即是用自然的方法和过程实现生态修复。然而, 目前我国多数环境治理工程是非自然方法, 也未能达到生态修复的目标。因此, 本研究系统在总结城市水生态治理的国际经验基础上, 梳理出我国城市水体生态治理存在的3个卡点: 即缺少生态目标; 缺乏生态手段; 造成生态损伤。围绕上述卡点提出了3个解决路径: 明确建立生态目标; 合理强化生态手段; 综合管理流域空间。并通过我国城市水生态治理的典型案例分析进一步验证了相关解决路径的可靠性。此外, 本研究还提出了城市水环境生态治理的策略与展望, 以期构建质优量足、韧性防灾、生态平衡、优美宜居的城市水环境提供支撑。

关键词 水生态; 卡点; 治理路径; 生态治水; 城市

城市水体生态治理的卡点通常指在城市水体生态治理过程中遇到的困难、阻碍或瓶颈, 这些问题阻碍了水生态治理工作的顺利推进, 影响了水体的生态健康和整体环境质量。通常来说, 城市水体生态治理涉及包括技术、管理、资金、政策、社会参与等多个方面, 由此可知, 城市水体生态治理是复杂的环境管理过程, 需要针对各地区面临的突出问题针对性的形成治理策略。尽管在全球范围内都有关于水体生态治理的成功案例, 但在实际操作中, 许多城市的治理项目仍面临诸多挑战。因此, 探究城市水体生态治理的卡点对于改善城市水环境具有重要意义, 识别城市水体生态治理的卡点可有效解决在城市水体治理过程中存在的障碍, 改善治理工作的质量和效率, 实现城市环境的长远健康发展, 保障城市水体成为宜居、可持续发展的生态系统。

随着城市化进程的快速推进、人口的持续增长和气候变化的不断加剧, 世界各地的城市都面临着前所未有的水污染控制、水资源管理和水生态恢复等多重挑战。传统的水环境与水生态治理多采用非自然的方法, 利用工程技术手段解决环境问题, 如建设混凝土河道、人工湖泊、水库、集中式污水处理厂等^[1-2]。上述传统的环境治理工程虽然可以有效解决部分水生态问题, 但也存在局限性。首先, 单一且局部的治理路径, 无法从根本上改善整个水生态系统; 其次, 大规模工程技术通常具有高能耗、高投入等特点^[3]; 最后, 人类工程干预过程中所导致的残余药剂污染、动物栖息地破坏、生物多样性丧失等会引发新的环境问题^[4-5]。近年来, 依赖自然系统的自净能力和生态功能进行城市水生态治理受到越来越多的关注。将自然基础设施(包括湿地、河岸带、自然河道等)融入环境治理和城市规划, 不仅可以提升水质和抗洪能力, 还可以改善城市整体环境质量^[6]。将城市融入绿色空间和自然水体, 增强了城市的美观性和宜居性, 为居民提供休闲场所, 也为各种植物和动物提供栖息地和生态位。此外, 自然水管理技术的长期成本效益显著, 一旦建立需要较少的人为干预和维护, 有助于减轻财政负担, 确保生态效益的持久性。

因此, 为实现城市水生态根本好转, 本研究在分析国际生态治水经验基础上, 解析我国水生态治理所面临的卡点, 倡导用自然的方法和过程实现生态修复的技术路径, 并提出针对性的解决路径, 结合国内优秀案例进一步论证相关解决路径的可靠性, 最终提出我国城市水环境生态治理的策略, 并对未来发展进行展望, 以期构建质优量足、韧性防灾、生态平衡、优美宜居的城市水环境提供支撑。

收稿日期: 2024-03-21 录用日期: 2024-05-16

第一作者: 谢铮铮(1978—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向为概念污水处理厂与污水资源化, chengchengxie@sina.com

✉通信作者: 刘刚(1983—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为绿色水过程、水系统生物安全, gliu@rcees.ac.cn

1 城市水生态治理的国际经验

1.1 生态治水的主要方法

湿地恢复保护。湿地是自然的生态系统,具有重要的生态功能和价值,对水质具有天然的净化和调节作用,可以去除污染物和富营养化物质,在改善水质、保持生物多样性、防洪调蓄和碳存储等方面均有显著的效益。例如,美国的恢复湿地计划旨在修复佛罗里达州的湿地,净化水体,恢复湿地生态系统^[7]。

河道自然修复。与修建堤坝、规整河道、疏浚清淤等传统河道修复工程不同,河道自然修复是通过还原河道的自然形态和生态特征,恢复自然河床和岸线的特性,以及增加湿地和植被等方式,通过自然生态过程来改善河道的生态系统,提高其自净能力和生态功能。例如,澳大利亚的墨尔本市河水健康项目,通过植被恢复、河岸加固和河道改建,改善雅拉河的生态系统^[8];德国的鲁尔河修复案是成功的河流生态修复案例^[9]。

自然净化技术。自然净化技术是一种生态友好的方法,旨在通过自然过程的相互作用和生态系统的循环来去除水体中的污染物,减少对化学药剂和能源的依赖。这种技术使用了植物、微生物和水生生物的活动,从而将污染物分解、转化或去除。在该技术中,植物与微生物扮演了重要角色,其中,通过光合作用产生氧气,有助于维持水体中的溶解氧含量,支持微生物和其他水生生物的生长;微生物通过降解过程,可有效去除特征污染物,降低污染风险。例如,荷兰的“自然净化”技术利用生物群落来净化城市污水,提高水体质量^[10]。

人工生态工程。人工生态工程是一种融合了生态学原理与工程技术的创新方法,旨在通过结合自然生态原理和人工手段来进行水资源管理和生态修复,改善水资源管理、促进生态修复以及提升环境质量。现有的人工生态工程主要包括人工湿地、生态护岸、生物滤池等。其中,人工湿地在城市污水处理、工业废水处理和河流湖泊生态修复中具有广泛应用;生态护岸可有效防止水体侵蚀,有助于恢复河流和湖泊的生态系统平衡,促进生物多样性;生物滤池一种利用生物过滤作用进行水体净化的人工生态工程,广泛应用于污水处理、工业废水处理和城市雨水管理等领域。

蓝绿基础设施。蓝绿基础设施是一种综合性的城市生态治理策略,结合了水管理和生态治理两个方面的手段,通过自然和半自然的方式来处理城市的水资源和环境问题,旨在增强城市的水资源管理和生态系统功能^[11],主要包括蓝色基础设施(如雨水收集与利用、蓄洪池等)、绿色基础设施(如湿地、花园等)、蓝绿融合设施(如将雨水收集与利用系统与植物人工湿地相结合等)。例如,丹麦哥本哈根的雨水管理是一个典型的基于蓝绿基础设施的城市雨水治理案例^[12]。

1.2 生态治水的国际经验

各国针对水环境中面临的突出问题积累了丰富的水生态治理经验,对我国突破城市水生态治理卡点问题有重要参考价值。

1) 法国塞纳河。20世纪60年代,塞纳河面临非常严重的水污染问题,污染成因包括农业污染、工业污染、生活污染和雨污溢流等。在开展相关治理工作之前,塞纳河河水中DO含量低于 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量最高可达 $9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且有大量鱼类死亡,水生态环境治理恶劣^[13]。为此,法国政府在推动行政立法(《水法》《水域分类、管理和污染控制法》等)、设立管理机制(塞纳-诺曼底河流域管理局)、采用经济手段(调控用水费和排污费)和加大节水宣传(民众参选水管理代表)等四方面开展了大量工作,并通过建设公共污水处理措施、安装“鱼类生存岛”、地下存储污水、拆除小型水利构筑物的技术措施,有效改善了塞纳河溢流发生时河水中氧气耗尽而导致的生态问题。经过数十年的治理,至21世纪初,塞纳河水的中DO含量提升至 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量不高于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水体磷负荷显著降低,水生态系统明显改善且生物种类显著增加。

2) 德国埃姆舍河。埃姆舍河一直是德国鲁尔地区的污水渠,难闻的气味和河面垃圾泛滥一直困扰着当地居民,是当时欧洲污染最严重的河流之一。其污染成因主要为流域人口过密、煤炭产业迅速发展、管网设施缺乏等。埃姆舍河的水环境治理属于典型的“先污染后治理”模式。政府通过四个阶段,逐步实现了埃姆舍河综合整治及滨水空间发展转型,分别为卫生条件改变阶段(1906—1981年)、综合治理第一阶段(1981—1991年)、第二个生态治理阶段(1991—2006年)、综合治理规划改造阶段(2006—2020年),并于2020年完成了综合治理计划,实现埃姆舍河生态重塑以及改善该流域内的居民生活。同时,德国政府通

过改善流域排水系统、建设污水处理厂与地下隧道系统、修复河道生态、建设绿色雨水基础设施的技术措施,显著改善水体质量,形成“蓝绿色生态网络”^[14]。

3) 美国奥农多加湖。尽管 1973 年美国政府通过了《清洁水法》,并于 1986 年关闭了主要的工业污染源,但奥农多加湖仍然是当时美国污染最严重的湖泊之一。该地区生活和工业废水等各类废弃物排放使湖泊生态环境严重退化,湖水存在汞等重金属以及氯化物、钠、钙等污染物,湖水透明度低,生物栖息地极少。从 1990 年开始,针对奥农多加湖严重的水污染问题,当地政府积极采取相应治理路径,包括:禁止使用高磷酸盐洗涤剂、增加对锡拉库扎市的联合下水道系统的维护、减少重金属及其他污染物负荷、建设三级污水处理厂^[15]。同时,美国国会成立了奥农多加湖管理会,并于 2007 年批准了奥农多加湖的整治计划,要求相关企业负责实施湖水清污工作。在治理过程中主要采取了底泥疏浚、沉积物固结区域的处置处理、低温加氧等工程措施,以及铺沙、建立鱼类栖息地的生态修复措施等^[15]。虽然目前奥农多加湖的治理工作仍在进行,但其水质污染状况已经得到了显著改善,湖泊重金属浓度显著降低,生物多样性显著提升,水体透明度大幅度提高。

4) 日本霞浦湖。1970—2000 年,河道恶臭与水体富营养化是霞浦湖主要环境问题。其间,霞浦湖水生植物面积减少了 50%,沉水植物几乎完全消失,水体透明度从 1.5 m 下降到 0.3 m。其水质污染原因主要为流域水系复杂,周边排湖管网老旧、出水波动大;流域污染源较多,入河污染负荷大,湖水底泥释放大量污染物等。1995 年,日本政府确立行动指南《霞浦湖宣言》,围绕点源、面源、内源污染控制“三位一体”的目标,陆续开展了霞浦湖富营养化防治基本计划”、“霞浦湖泊水质保护计划”等,于 2007 年实施了《茨城县霞浦水质保护条例》。在霞浦湖治理过程中,日本政府将传统技术、新型控制手段并施,包括湖岸芦苇丛养护,加强入湖河流河口的建设,涵养湖内植被等^[16]。同时,同步进行流域生态修复,包括改善湖泊流域地区稻田自净功能,建设大规模的人工湿地及生态园,充分利用河流及池塘的自然净化功能等。2010 年后,霞浦湖水水质得到明显改善,COD、TP、TN 的含量分别为 8.7、1.3、0.1 mg·L⁻¹,藻类显著减少且水质稳定。

1.3 生态治水的治理成效

如表 1 所示,基于湿地恢复保护、河道自然修复、自然净化技术、人工生态工程、蓝绿基础设施等系列生态治水方法,前述生态治水国际案例的治理成效显著,水体清澈度与生物多样性大幅提升,特征污染物浓度显著下降,相关治理经验、技术与管理模式可以为我国城市水环境生态治理工作提供借鉴意义。

表 1 生态治水国际案例的治理成效统计		
Table 1 Statistics for governance effectiveness of international cases of ecological water management		
治理对象	治理前	治理后
塞纳河	DO≤3 mg·L ⁻¹ , NH ₃ -N 最高为 9 mg·L ⁻¹ , 大量鱼类死亡	DO≈8 mg·L ⁻¹ , NH ₃ -N≤2 mg·L ⁻¹ , 生物多样性明显增加 ^[17]
埃姆舍河	河道淤积, 臭气熏天	形成“蓝绿色生态网络”, 有效增加生物多样性 ^[18]
奥农多加湖	存在 Hg 等重金属污染, 湖水透明度低, 生物栖息地极少	湖泊重金属浓度显著降低, 生物多样性显著提升, 水体透明度大幅度提高 ^[19]
霞浦湖	氮磷、COD 含量高, 有毒藻类泛滥	COD 8.7 mg·L ⁻¹ 、TN 1.3 mg·L ⁻¹ 、TP 0.1 mg·L ⁻¹ , 藻类显著减少, 且水质稳定 ^[20]

2 我国城市水环境生态治理的卡点与解决路径

2.1 城市水体生态治理的卡点

1) 缺少生态目标。由于前期对城市水体生态治理认知存在片面性,治理方案设计缺少明确的生态目标,方案设计的全面性与科学性不足又导致治理过程的标准不清、依据模糊、系统性不足等问题,造成对后续方案制定、管理机制完善等方面的支撑性不够。相关治理方案也因此无法因地制宜地达到预期目标,导致水体治理效果不佳。如果在治理前未能结合区域实际情况,不明确具体生态目标,会影响城市水体生态治理的顶层设计效果,进而导致水体生态治理理念不健全,并最终严重影响相关治理方案的实施效果。

2) 缺乏生态手段。当前的城市水体生态治理方案过度依赖于基础设施建设,缺乏对基于自然过程的生

态手段的合理利用。大规模工程技术措施虽然可以显著的水质改善效果，但是对水生态系统的过度干预，可能引起新的环境问题与风险，有待进一步评估。同时，如何界定必要性工程与非必要性工程，如何评估环境自修复能力等问题仍有待进一步研究。因此。城市水体生态治理过程中生态手段的缺乏，是当前所面临的卡点之一。

3) 造成生态损伤。通常城市水体生态治理的自然边界是基于流域空间所划分，由于发展不协调和治理方案考虑不全面，上游流域空间开展的生态治理措施易对下游的生态环境造成损伤。受制于流域内各地区经济发展水平、环境保护进程和环境治理需求等方面的显著差异，流域在各行政区的分割下各地区合作共治与管理难以推进，导致上游流域空间单元的生态环境治理会无形地造成下游地区的生态环境变化与损伤，如何破局当下跨界面城市水体生态环境治理协调，减少相邻流域空间因生态治理造成的生态损伤，是当前所面临的卡点之一。

2.2 突破生态治水卡点的路径解析

1) 明确建立生态目标。基于区域水体生态环境的问题诊断与区域经济发展水平，明确建立具体且针对性强的生态目标，是长期保持水生态治理成效，实现“长制久清”目标的重要基础。同时，明确生态目标可有效避免治理过程中技术路线模糊、管理机制混乱等问题，并有效保障资金投入与效果产出的一致性。

2) 合理强化生态手段。城市水体生态治理需要“从人工化到生态化”的转变，在尊重水体自然属性的前提下，合理利用水生态系统的自组织和自修复能力，减少人为干预，不仅可以有效改善水体综合水质，还可以减少过度施工的次生影响。

3) 综合管理流域空间。全盘考虑流域空间单元上下游间的城市水体生态环境保护进程与环境治理需求的异同点，在生态治水方案顶层设计层面强化协同发展与长效运行的理念，在保障实现本流域空间生态治水目标的同时，兼顾对上下游邻近流域单元的环境影响，进而降低治理过程中产生的生态损伤。

3 城市水生态治理的典型案例

3.1 济南小清河

小清河是山东省渤海水系的重要河流，发源于济南西郊睦里庄，全长 237 km，其中济南段共 70.5 km，是典型资源型缺水的季节性河道，其水环境治理的难点包括无完整有效的雨污分流排水系统、污水处理厂处理能力不足、水体自净能力和环境容量严重不足等。为解决小清河严重污染问题，济南市人民政府按照“治用保”模式对小清河流域开展科学整治（图 1）。

1) 生态治水卡点。济南小清河的生态治水卡点主要表现在缺少生态目标。由于前期济南市缺少完整有效的雨污分流排水系统，污水处理厂处理能力不足，与小清河水体自净能力和环境容量严重不足相叠加，导致小清河水体治理生态目标不明确且治理效果不佳，水质难以长效达标，进一步加剧了小清河生态治理的难度。因此，缺少进一步明确且细化的水体生态治理目标是济南小清河面临的生态治水主要卡点。

2) 解决路径。济南市政府通过完善污水收集系统，对城中村、老旧社区、城乡结合部、城市支路及城区支流河道棚盖下的合流管线进行雨污分流，削减溢流污染。同时，政府推进城区污水处理设施改扩建，实施污水处理厂之间污水管网连通工程，加快了小清河流域内村镇污水处理设施及配套管网建设。针对污染源方面，相关部门开展工业企业与农业面源污染综合管控，在工业企业方面，从严审批高耗水、高污染建设项目，对造纸、焦化、印染行业实行减量置换；在农业面源方面，加大高剧毒农药禁用管理，引导调整种植结构，严格控制污水灌溉，引导畜禽养殖业向规模化、标准化发展。最后，开展了管网河道清淤、水系连通和生态补水等举措，其中，对小清河城区段 30 km 河道进行生态清淤（工程量 200 余万 m^3 ），并对雨水斗及雨污水管线进行全覆盖清淤疏浚，同时完善河道保洁管理标准和河道保洁考核办法；通过生态补水增加了小清河支流生态基流，此外还实施了“五库连通”工程，构建济西湿地、华山湿地等小清河沿线湿地系统，进一

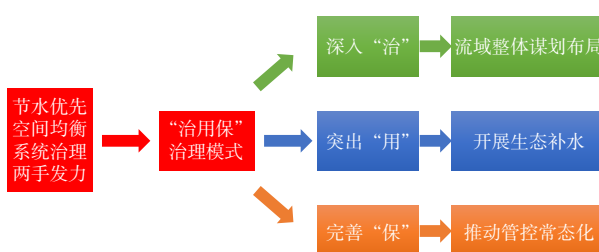


图1 济南市小清河治理模式

Fig. 1 Governance model of Xiaoqing River in Jinan

步改善水环境、修复水生态。

3) 治理成效。通过实施综合治理, 2018—2021 年, 小清河济南段水质从劣 V 类提升至均值Ⅲ类水。2016—2021 年, 小清河济南段浮游植物生物多样性指数从 1.26 增长至 2.23; 水生生物从 73 种提高到 230 种; 清洁水体指示物种占比从 40% 提高到 66.2%。本土物种逐步恢复, 中华鲟的发现是小清河济南段水生态改善、水生生物多样性恢复的有力证明。

3.2 上海市苏州河

上海市苏州河全长 125 km, 上海市境内长度 53.1 km, 因人口增加和中国近代工业的兴起, 大量生活污水和工业废水排入苏州河, 水质逐渐遭到污染, 1978 年, 苏州河市区段已全线黑臭。为彻底解决苏州河的黑臭问题, 1996 年上海市政府开始实施苏州河环境综合整治工程, 1998 年启动苏州河环境综合整治一期工程, 此后又相继实施苏州河环境综合整治二期、三期、四期工程, 消除了长达 70 多年历史的黑臭, 水质持续稳中向好(图 2)。

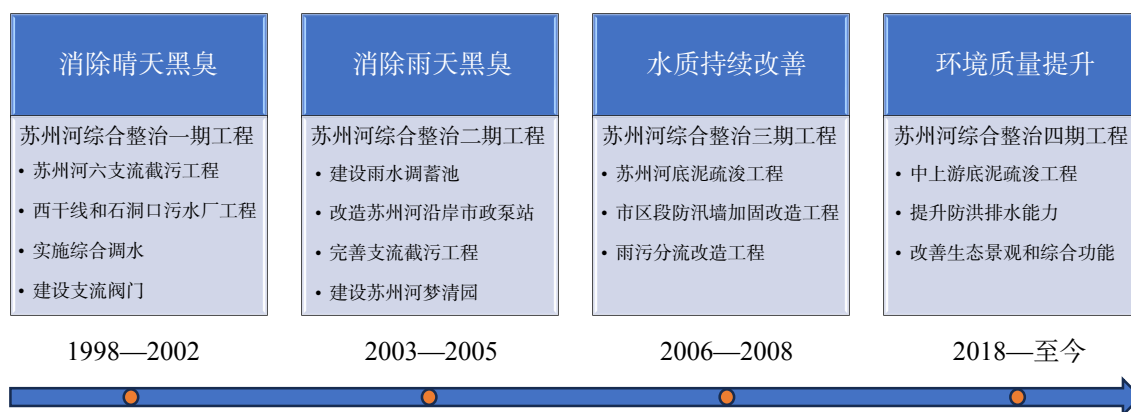


图2 上海市苏州河治理模式

Fig. 2 Governance model of Suzhou River in Shanghai

1) 生态治水卡点。上海市苏州河的生态治水卡点主要表现在缺少生态目标和缺乏生态手段两方面。其中, 在缺少生态目标方面, 20 世纪 80 年代上海市虽然实施了合流污水治理一期工程, 但仍未有效解决苏州河干流和支流同步截污的问题, 加上潮汐往复回荡造成污染累积效应, 苏州河干流仍然存在黑臭现象。在缺少生态手段方面, 虽然工程技术措施通过前三期的工作已经有效改善了苏州河水质状况, 但其对水生态系统的干预影响也伴随着潜在生态风险, 缺少利于自然过程的生态手段的运用, 一定程度上限制了环境质量提升的可持续性。

2) 解决路径。首先, 苏州河全流域进行了系统性截污治污。其中, 在上游村镇地区污水收集处理以小型污水处理厂和分散处理相结合; 中游城市化地区继续完善收集系统, 加大收集管网覆盖率; 下游地区因地制宜、全水系规划、分片建设的原则进行截污治污。其次, 苏州河利用闸门群调度方案增加流量、提高流速、修复水质, 将干流和支流由潮汐往复流改变成为单向流动, 消除潮汐顶托作用, 溶解氧增加、水体自净能力得到提升。第三, 围绕雨水溢流污染控制, 通过建设初期雨水调蓄池, 疏通泵站的过苏州河倒虹管, 建设南岸截流总管, 全面实施雨水管网末端的旱流污水截流, 对区域内的雨水混接状况实施排查和雨污混接改造, 增加监控措施。此外, 采用提高生物多样性的生态重建技术, 设计景观水体水生态系统, 利用水生生态系统各种功能提高水质和景观效果。最后, 对苏州河真北路桥段至河口 16.4 km 长的河道进行底泥疏浚(总土方量约 130 万 m^3), 在改善水质的同时, 疏浚断面设计充分考虑防汛要求, 增加河道槽蓄容量, 提升防汛除涝能力。

3) 治理成效。通过实施综合治理, 苏州河消除了长达 70 多年的黑臭。2021 年上海市生态环境状况公报显示苏州河 6 个断面水质为Ⅲ类, 1 个断面水质为Ⅳ类。苏州河环境综合整治工程被命名为“国家环境友好工程”, 其环境综合整治显著改善城市水环境, 提升上海综合竞争力和软实力, 产生了可观的经济社会效益。

3.3 深圳市茅洲河

茅洲河是深圳市第一大河，干流长 41.69 km，流域内电镀、线路板、印染等重污染企业聚集，污水处理设施缺乏，导致水体持续恶化，是全国污染最严重的黑臭河流之一。因此，针对茅洲河流域水环境综合治理，创新提出“流域统筹、系统治理”治水理念，提出以地方政府为主导、以优势设计为引领、以大型央企为保障的“政府+大 EPC+大央企”水环境治理工程项目管理模式（图 3）。

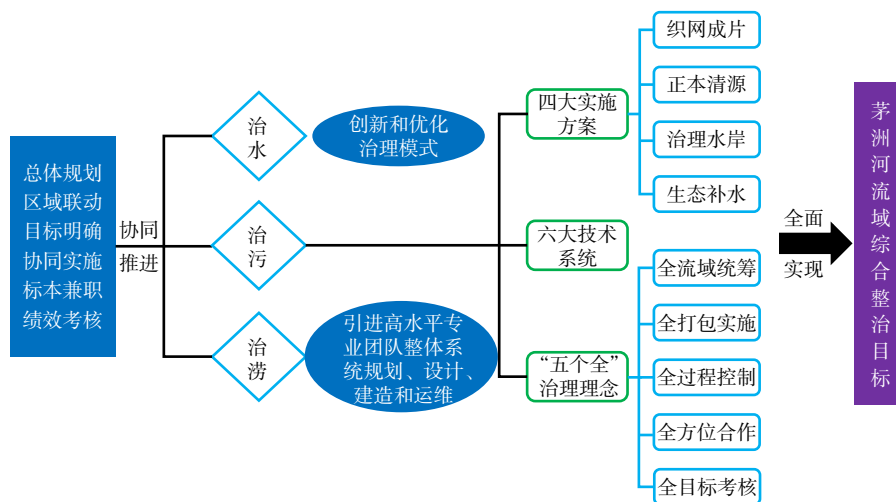


图3 深圳市茅洲河治理模式

Fig. 3 Governance model of Maozhou River in Shenzhen

1) 生态治水卡点。深圳市茅洲河的生态治水卡点主要表现在造成生态损伤方面。由于茅洲河上下游水体运动状况不同，上游流域空间单元已形成的生态环境治理方式无法有效应对下游地区水体交换动力不足的问题，影响了下游界河段治理效果，同时，河流生态功能明显退化，生态基流不足，水生生物栖息地遭到严重破坏。因此，如何破局当下跨界面城市水体生态环境治理协调，减少相邻流域空间因生态治理造成的生态损伤是当前深圳市茅洲河的生态治水主要卡点。

2) 解决路径。首先，通过确定合理的排水体制，有序开展新建、调整或修复各级排水管路，形成衔接合理、排放通畅的雨污水干支管网联通系统，对存量管网进行全面检测修复，打通系统，织网成片；其次，开展正本清源工作，通过对工业企业区、公共建筑小区、居住小区、城中村等错接乱排的源头实施雨污分流改造，完善建筑排水小区的雨污水分支管网，提高区域雨污分流率；第三，以城市雨水管网末端为起点，通过对范围内水体的外源和内源污染调查分析，提出初期雨水治理、河岸生态、溢流防控、河道清淤、湿地景观等系统性治理路径；最后，开展生态补水，坚持生态补水应以城市河湖控源截污作为基础，制定各级生态补水方案，并与内源治理、防洪治涝、水质改善、生态修复、景观构建等工程设计相协调。

3) 治理成效。通过实施综合治理，深圳市茅洲河生态环境面貌得到根本性改观，其中，2017—2018 年达到不黑不臭标准，通过国家考核；2019 年实现干流和深圳侧一级支流全部消除黑臭；2020 年各河道水质持续改善，共和村国考断面全年基本稳定达到地表水Ⅳ类标准。此外，流域水生生物多样性指数明显提高，国家濒危植物野生水蕨被首次发现。

4 城市水环境生态治理的策略与展望

4.1 城市水环境生态治理策略

针对我国城市水体生态治理存在的 3 个卡点及其相应的解决路径，结合前述国内外成功案例，未来我国在城市水环境生态治理策略主要包括以下 4 个方面。

1) 制定水体污染要素管理清单。结合国内外典型案例先进经验，针对导致水体污染因素管理问题，建立清单化管理制度。

2) 构建全流域精细化治理体系。针对各控制单元采用精细化生态治理，重塑流域生态，兼顾针对性与

有机整体性,构建治理方案,强化治理成效。

3) 拓展污水处理再生利用潜力。持续推进污水资源化循环利用,考虑设置再生水生态缓冲区,抵御、缓解与降低再生水对环境受纳水体的生态影响。

4) 构建多层次系统化运营体系。从全生命周期角度,融合城市水系统特征,整体构建城市水环境生态治理工程多级运营体系。

4.2 城市水环境生态治理展望

在生态治理工程系统性实施方面,通过美国奥农多加湖、法国塞纳河、山东小清河等治理经验可知,水体生态修复应包含有限且有选择性和原则性的工程措施,既要支持水体生态系统重建,兼顾水生态系统自组织与自修复能力,又要减少对现有生态系统的破坏。在恢复水生态健康方面,通过德国埃姆舍河、上海市苏州河等治理案例可知,应对转变当前以水质优劣为评价依据的治水理念和治理模式,重新审视和构建以水生态系统健康保障为核心的水体治理方案、技术等,进而建立以生态健康改善和可持续保障为目标的治理体系。在深度挖掘人文和社会价值方面,根据日本霞浦湖以及深圳市茅洲河等治理经验可知,除了水质提升与环境改善等环境价值外,城市水环境生态治理成果应进一步挖掘治理工程的人文与社会效益,通过科普宣传、城市景观、滨水公园等实现多元价值产出,为居民创造更多的亲水机会。

5 结论

城市水体环境治理的发展方向应基于我国当前面临的城市水体生态突出问题,结合国际经验与主要方法,针对缺少生态目标、缺乏生态手段、造成生态损伤的我国城市水体生态治理卡点,分别从明确建立生态目标、合理强化生态手段、综合管理流域空间3个方面实现路径突破,并提出制定水体污染要素管理清单、构建全流域精细化治理体系、拓展污水处理再生利用潜力、构建多层次系统化运营体系的综合治理策略,逐步实现“长制久清”、“为民所用、维民所止”的城市水体生态环境治理目标。未来应以城市水环境生态治理为起点,重点围绕生态治理工程系统性实施、恢复水生态健康以及深度挖掘人文和社会价值等领域,在实现“水生态健康、水经济活跃的协调发展”,在强调城市优美宜居的同时,保障水生动物栖息地与植物生态位,支持城市经济、人文、社会发展,实现环境、经济、人文、社会效益的统一,推动城市与城市群可持续、高质量发展。

参考文献

- [1] 黄钰铃,莫晶,骆辉煌,等.长江大保护试点城市水环境治理模式及成效[J].环境工程学报,2024,18(1):286-297.
- [2] 罗小林,尹长文,张国新,等.北京市水环境现状及流域综合治理措施[J].水资源保护,2021,37(5):140-146.
- [3] 王殿常,赵云鹏,陈亚松,等.我国城市水环境治理的现状与困境分析[J].给水排水,2023,59(11):25-31.
- [4] 张博,李永峰,姜霞,等.环境治理工程对太湖水体中磷空间分布的影响[J].中国环境科学,2013,33(7):1271-1279.
- [5] 熊鸿斌,周凌燕.基于PSR-灰靶模型的巢湖环湖防洪治理工程生态环境影响评价研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):1977-1987.
- [6] 邱佩璞,范华,徐玉裕,等.杭州城市河道生态治理实践及成效[J].水生态学杂志,2018,39(2):34-40.
- [7] 肖协文,于秀波,潘明麒.美国南佛罗里达大沼泽湿地恢复规划、实施及启示[J].湿地科学与管理,2012,8(3):31-35.
- [8] ERGUSON B C, FRANTZESKAKI N, BROWN R R. A strategic program for transitioning to a water sensitive city[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 117: 32-45.
- [9] 徐律涂.鲁尔河的水资源开发与保护[J].水资源保护,1992(1):47-50.
- [10] DONATI G F A, BOLLIGER J, PSOMAS A, et al. Reconciling cities with nature: Identifying local blue-green infrastructure interventions for regional biodiversity enhancement[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 316: 115254.
- [11] 袁秋玲,孟凡鑫,李芬,等.食物—能源—水关联视角下蓝绿基础设施提升城市韧性的概念框架[J].城市发展研究,2022,29(8):20-27.
- [12] 徐海韵,刘栗,丁鹏,等.基于生态系统的适应在气候变化适应性城市多尺度合作雨洪管理中的实践——以哥本哈根为例[J].风景园林,2022,29(10):53-66.
- [13] MEYBECK M, LESTEL L, CARRE C, et al. Trajectories of river chemical quality issues over the longue durée: The Seine River (1900S-2010)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(24): 23468-23484.
- [14] GERNER N V, NAFO I, WINKING C, et al. Large-scale river restoration pays off: A case study of ecosystem service valuation for the Emscher restoration generation project[J]. Ecosystem Services, 2018, 30: 327-338.
- [15] MATTHEWS D A, EFFLER S W. Assessment of long-term trends in the oxygen resources of a recovering Urban Lake, Onondaga Lake, New York[J]. Lake and Reservoir Management, 2006, 22(1): 19-32.
- [16] DUNNE E J, COVENEY M F, MARZOLF E R, et al. Efficacy of a large-scale constructed wetland to remove phosphorus and suspended solids from Lake Apopka, Florida[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 90-100.

- [17] 由文辉, 顾笑迎. 国外城市典型河道的治理方式及其启示[J]. 城市公用事业, 2008(4): 16-19.
- [18] PERINI K, SABBION P. Urban sustainability and river restoration: Green and blue infrastructure[M]. The Bronx River, USA, 2017.
- [19] 兰德斯, 马元珽. 美国奥农多加湖的污染治理[J]. 水利水电快报, 2007(4): 17-21.
- [20] 赵解春, 白文波, 山下市二, 等. 日本湖泊地区水质保护对策与成效[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(6): 126-134.

(责任编辑: 陶雪)

Experience and pathways to overcome bottlenecks in urban water ecological management

XIE Chengcheng¹, HU Bin^{2,3}, LIU Gang^{2,3,*}

1. Yixing Branch, HD Institute of Environment Observation, Yixing 214200, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Science Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

*Corresponding author, Gang Liu, E-mail: gliu@rcees.ac.cn

Abstract The essence of ecological governance is to employ natural methodologies and processes for ecological restoration. However, in China, the majority of environmental management projects currently use anthropogenic methods, which fail to achieve the objectives of ecological restoration. Therefore, this study systematically synthesized international experiences in urban aquatic ecological governance to identify three critical bottlenecks in China's urban water ecological management, including lacking ecological goals, insufficient ecological methods, and resultant ecological damage. To address these issues, the study proposed three strategic solutions, including defining ecological objectives clearly, enhancing ecological methods appropriately, and managing watershed spaces comprehensively. The reliability of those three solving paths were validated through case studies of urban aquatic ecological governance within China. Furthermore, the paper outlined strategic directions and future prospects for urban water environmental governance, aiming to facilitate the development of urban water environments that were abundant, resilient, ecologically balanced, and aesthetically conducive.

Keywords water ecology; bottleneck; governance pathway; ecological water management; city