

天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善的技术集成与示范

王秀朵¹ 郑兴灿² 赵乐军¹ 黄 鹏²

(1 天津市市政工程设计研究院,天津 300051; 2 国家城市给水排水工程技术研究中心,天津 300074)

摘要 针对天津水体生态需水量匮乏、水体滞缓流、水环境恶化现状,开展了天津中心城区景观水体生态功能恢复与水质维持关键技术的研究开发,着重提高有限水资源的利用率,提升水体的自净能力,形成了多级复合流人工湿地异位修复、大型缓流景观水体流态优化和水动力强化循环、雨水径流污染综合控制技术等关键技术成果,并在外环河、梅江湖等景观河道和居住区景观水体进行了技术集成与示范应用。

关键词 景观水体 功能恢复 示范工程 雨水污染 水专项 天津中心城区

天津市河湖密布,景观水体众多,有一级河道 19 条,二级河道 79 条,总长度 2 458 km;湖泊水面 151 处,水面面积 34.88 km²。但由于淡水资源严重匮乏,长期依靠外调水源解决城市生活和生产用水,生态用水难以保障,加上污染物的侵入、河湖水系之间的割裂,景观水体水质普遍较差,总体上表现为水系循环不畅、水流滞缓、水体自净能力差、水体富营养化突出、水质达不到功能要求。城市景观水体的多水源补水特性,进一步加大了水质保持与提升的难度,工程技术措施的不足也影响了水体循环与水质稳定性。城市降雨形成的地表径流也间接污染了城市景观水体。因此,有必要深入开展城市水体水质保障与水系功能恢复的技术研究与工程应用,为天津中心城区水体环境和水生生态系统的恢复与构建提供依据和技术方法。

1 研究目标与拟解决的关键技术问题

针对北方缺水城市景观水体因水体功能定位及标准不同对补水水质及水源要求不同,城市水体多呈封闭、滞缓流、循环不畅的水文特征,建成区城市河湖景观水系的非生态化改造已成定局、水生生态系统极其脆弱,河湖景观水体普遍存在藻类频繁滋生、富营养化与夏季水华暴发、水体水质极易恶化等共性问题,以“整合连通、保障水源、控制污染、净化水体、功能恢复”为核心目标,结合城市景观水体和排水河道综合整治工程的实施,开展城市水系功能

恢复和水体水质保障的关键技术研究与集成应用,提出集水体循环、水生态系统构建、水环境改善于一体的城市景观水体水质保障与水系功能恢复的解决方案,重点突破城市缓流景观水体水系联通循环、水动力改善的水体自净功能强化技术;景观水体微生物—化学—水生植物复合强化净化与藻类过度生长控制技术;北方缺水地区缓流型景观水体流态模型构建、水力循环系统构建与运行调控技术;景观水体人工湿地净化系统构建技术;缺水地区居住区景观水体水质改善与藻类过度生长控制技术;缺水城市初期雨水污染径流模拟、雨水调蓄与净化关键技术。

2 天津中心城区景观水体生态功能恢复技术集成与示范应用

2.1 城市景观河道水体功能恢复与水质改善技术集成与示范

针对城市景观河道与景观水体生态用水无保障、水流滞缓、水体富营养化突出等问题,开展城市景观河道水量保障、水质改善和生态修复的综合技术研究,选择中心城区代表性河道景观水体为依托工程进行了技术集成与工程示范,强化水体生态自净能力,恢复和提升景观水体的生态功能,研究景观水体运行控制模式和保障监管机制,有效提高城市景观水体的水质保障水平,为消除劣 V 类水体提供技术支持。

城市景观河道水资源配置技术是以河道水位和水质因子为标量,综合分析城市景观河道生态需水量和水质要求,课题确定了天津中心城区景观河道

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07314-010)。

生态需水量计算方法,并以此为基础,构建了重点河道河网水源调配综合模型,形成城区景观河道循环连通工程运行优化技术、基于水位水质目标的城市景观河道水源调配补给技术,并给出了重点河网区域的水体循环方案。其中,多级复合流人工湿地异位修复技术体系是多组分复合流人工湿地、人工湿地管网曝气、人工湿地冰盖保温、喷泉/曝气新型装置研发等多项关键技术突破基础上的系统集成,是城市景观河道水质改善的核心技术之一。

外环河水体功能恢复与水质改善技术示范工程,设计处理水量 4 000~8 000 m³/d,包括水生生态系统(沉床和浮床)、湿生生态系统(人工湿地)和强化复氧系统(喷泉曝气)。沉床和浮床示范区位于总长度约 450 m 的河道内南北两侧,各占地 4 000 m²,设计处理水量各为 2 000 m³/d。潜流湿地位于外环河南侧,总占地面积 24 703 m²,其中水量调节池 100 m²,湿地处理单元 9 615 m²,总控室 82 m²,出水池 1 268 m²,道路及绿化景观占地 13 638 m²。喷泉曝气设在人工湿地的进水池和出水池内。总体平面布置见图 1。

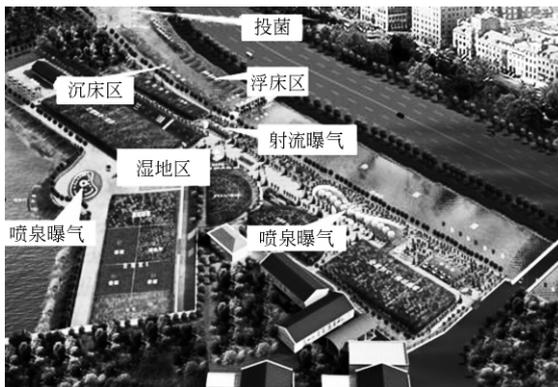


图 1 外环河水体功能恢复与水质改善示范工程平面位置示意

该示范工程从 2009 年 3 月建成后开始运行,在进水水质劣于设计指标的情况下,出水 COD、TN、TP 浓度均达到 IV 类水质标准,稳定运行阶段去除率分别可达 70%~80%、80%~90% 和 70%~80%。同时,河道水体透明度明显提高,浮萍及藻类生长得到有效抑制,沉水植物开始自我恢复,示范段河道内水生动物(如鱼类、底栖动物)数量也明显增多。按处理水量 4 000 m³/d 计算,每年净化水体 144 万 m³,削减 COD158.8t, TN19.24t, TP1.23t,

起到良好的节污减排和改善水环境质量的作

2.2 生态型居住区景观水体水质保障技术集成与工程示范

依据系统优化、统计分析、计算流体力学等理论方法,建立了城市大型缓流景观水体流态优化的评价指标和数学模型,经与水体网格建模与进口边界实时设定、多目标遗传算法寻优、并行计算技术及各软件程序流的设计编程等集成,形成水体流态优化设计新技术。开发了适合城市大型景观水体流态优化的流态模型和计算方法,研究提出基于水体水质保持的生态型居住区大型复杂水体的循环系统构建与运行调控技术。针对生态型居住区景观水体生态系统脆弱、水流缓慢、自净能力差的特点,以区域水资源优化配置、水质恢复和水生态改善为目标,开展微污染景观水体人工湿地净化系统的构建技术、基于藻类控制的生物栅净化技术、大水面水生植物体系构建技术等的集成研究,形成城市生态型居住区景观水体水质保障集成技术。针对生态居住区景观水体水环境容量和水生态特征,结合地表水、再生水、雨水的水质特点,研究提出居住区景观水体人工湿地净化与藻类控制技术,并进行人工湿地中试示范性研究的设计与建设。

针对城市居住区水资源缺乏、水体流动性差、置换周期长、水质易污染、水环境极易恶化,以“水流顺畅、水景秀美、生态宜居、人水和谐”为核心目标,基于引水循环、水质处理、植被维护、功能恢复等方法,结合再生水、雨水利用为主的景观补水方式,通过景观水体流态模型构建、运行调控、生态塘及人工湿地等物理—生物生态相结合的旁路修复技术的集成,构建了集水量调控、生态净化、景观构建于一体的景观水体水质保障技术方案,开展城市大型生态型居住区景观水体构建与生态净化示范性试验研究,建立了天津梅江生态湖水水质改善示范工程(见图 2),形成自然、人文和生态环境的和谐统一。

梅江景观湖位于天津市中心城区南部,水面面积为 42 万 m²,水深 2.5~5 m,水量约为 147 万 m³。风场对于景观湖的流动影响比较大,景观湖的自然流动动力主要是风生流。全年 65% 左右的降水集中在 7、8 月份,期间最适合植物生长,而冬季过于寒冷,植物无法生长。梅江景观湖秉承绿色、生态、人

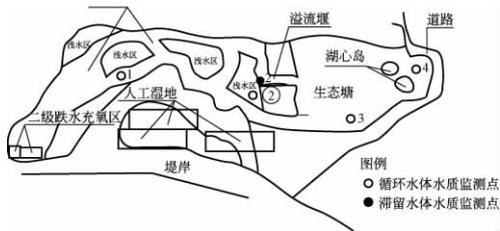


图2 天津梅江生态湖水水质改善示范工程循环系统取样点示意

文的主题,水面形式上,充分结合水体水形,通过筑堤造岛来丰富水系,以产生“涧、池、湾、河、塘”不同形态水体的变化;在通过利用“潭、溪、瀑、泉、流、泻、溢”等手段,产生各种不同流态和声景。

湖底和护岸采用生态方法,生态浮岛与生态护岸结合,开发沿岸植物和水生植物配置技术,强化水体自净能力使植物能够产生对水体的自净化作用。绿地与渗水沟结合,削减雨水径流污染对湖体的冲击;人工水体循环流态与实施技术,提升泵与闸相结合,充分利用喷泉、跌水形成湖体循环;同时通过促进蒸发、渗漏、植物蒸腾作用与再生水补充和浇灌的结合,形成水圈循环。完善水位控制,水位下降时进行补水,保持最好的水面景观效果;通过设置排水口和溢水口便于清洗或换水和溢流。生态处理设施稳定运行期间,主要水质指标可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类标准,单位水量处理成本 0.05~0.08 元/ m^3 。该示范工程对城市景观水体的水质保障具有运行成本低、经济效益好的优点,总结而成的集成技术应用于天津会展中心梅江生态园景观湖的水质改善及水体保持,为夏季达沃斯论坛的顺利召开提供了良好的生态环境保障。

3 城市雨水径流污染控制技术集成与示范应用

3.1 城市地表雨水径流污染控制与消减的关键技术

针对北方缺水城市降雨量小、降雨集中而径流峰值高、径流污染严重的特点,研究了缺水城市地表径流形成机制、污染特性与降雨历时、降雨强度的关系,开展了降雨过程的污染径流模拟,研究了降雨产生的径流对地表水污染的定量关系与分布特征,建立了雨水径流模型和汇水面污染物冲刷模型,了解了雨水污染物输送的基本特征:路面、屋面、草坪的径流污染浓度依次减少;雨水径流的 10~20 min 污染物浓度变化最大;各径流污染中 SS 和 COD、

BOD₅、TN 有较好相关性;DO 和 COD、BOD₅ 具有良好线性相关性。

工业区径流污染中 SS、TN、NH₃-N、Cd 为其他功能区的 2~5 倍;商业区径流污染物中 COD、BOD₅、粪大肠菌群和阴离子表面活性剂浓度最高;居民区和文教区径流污染物浓度相对较低。降雨结束后,城市河流中溶解氧显著降低;本底值高的,其 BOD₅、总氮、总磷、硫酸盐、氯化物、色度、氰化物、叶绿素和金属铜、汞、铁、锰等浓度有不同程度降低;而本底值低的,其 COD、锌、砷、镉、铅、Cr⁶⁺、挥发酚、阴离子表面活性剂和粪大肠菌群的浓度有不同程度增加。

通过排水系统溢流消减及生态系统联合污染控制技术、雨水净化及利用技术研究,为城市地表径流污染控制与雨水综合利用提供技术依据与方法,主要包括:

(1) 植草沟技术:建立了径流、污染消减和渗透模型,模拟了绿地、渗透地面、植草沟、岸生植物对径流污染的消减,得到了针对最大径流量和污染物削减的最佳技术组合。

(2) 浓度控制雨水调蓄策略:中峰型、后峰型预期降雨,调蓄效果明显好于传统截流方式(提高 20%左右);建立了初期雨水污染控制综合运转模式,即源头控制、蓄水池调蓄、污水管网截流、污水处理厂调蓄和河湖调蓄,得到最佳消减组合构建方法和其对雨水径流污染的消减规律和比例。

(3) 降雨径流对接纳水体污染估算技术:计算被地下水径流冲刷的各种下垫面的污染物对接纳水体污染物浓度和污染总量的变化;通过对径流水样监测和模拟计算,可确定不同降雨事件污染物的种类。

(4) 城市雨水渗透及净化集成技术:针对非透水面面积逐年增加,雨水径流峰值增大及内涝,初期雨水污染强度大等问题,研发了强化雨水渗透及净化的渗透浅沟和渗透路面构建技术、泵站雨水强化混凝沉淀过滤净化处理技术,建立了适用于天津土壤地质特点的渗透路面对雨水径流削减的数学模型。

(5) 城市绿地生态系统对雨水径流量削减:绿地系统的植被盖度与径流产生密切相关,可有效延

缓径流产生时间 30 min。绿地系统植被盖度为 30% 时削减 46.8%~59.4% 的径流, 植被盖度为 60% 时可削减 55.7%~65.5% 的径流, 植被盖度达到 90% 时可以削减 64.74%~72.7% 的径流。绿地生态系统削减雨水径流技术要同时考虑降雨强度、降雨时间、植被类型、植被盖度, 绿地坡度、外界水文气象参数和人类活动等因素。

3.2 城市地表雨水径流污染控制技术的集成应用

在天津市南开区清华祠雨水泵站进行了中试规模的雨水径流污染控制技术应用(见图 3), 该泵站为分流制雨水泵站, 服务区域主要是居民生活区、学校、商业服务区, 无大型工业企业, 对初期雨水采取弃流措施。但区域内存在临街商户向雨水口排污现象; 且临近区域边缘的旧城区为合流制, 存在雨污混接, 造成非雨水入流, 浊度、悬浮物、氨氮、总氮和总磷严重超标。应用基于“浓度控制”的初期雨水径流污染的源头控制、输送、调蓄、处理的联合运转模式进行模拟研究, 地表径流污染物削减约 30%。



图 3 雨水径流污染控制中试设备

采用强化混凝沉淀过滤工艺, 滤速 15 m/h, 浊度去除率 85%~96%; COD 去除率 40%~60%; 总氮去除率 10%~25%; 总磷去除率 75%~90%。高效澄清—纤维过滤工艺, 滤速 15 m/h, 浊度去除率 70%~80%; COD 去除率 40%~55%; 总氮去除率 15%~25%; 总磷去除率 65%~80%。微絮凝—纤维过滤工艺, 滤速 10 m/h, 浊度去除率 80%~95%; COD 去除率 30%~50%; 总氮去除率 10%~45%; 总磷去除率 70%~75%。泵站雨水经净化处理后水质达到城市杂用水标准, 微絮凝纤维过滤处理成本约 0.39 元/m³。

针对天津地区排水系统溢流水淹现象严重, 缺

乏对排水系统溢流消减措施的系统研究, 从工程角度提出排水管网溢流、水淹现象的解决措施, 在赤龙河雨水示范泵站进行了溢流消减技术集成应用研究。该泵站服务区域排水系统概化为 27 个子汇水区, 每个面积在 1.4~8 hm²; 雨水管道 21 条, 全长约 4 800 m; 管网节点 42 个, 雨水排放口 1 个。

通过对溢流严重节点和过载的管道进行改造, 并用软件 SWMM 模拟, 结果显示改变节点高程缓解管网溢流的程度相对较小, 需要配合管道定期清淤; 增大管径改造后的排水管网, 由于管道充满度不高, 管道淤积对下游节点溢流造成的影响不大, 因此, 不需要对管网进行频繁清淤; 而改变地表特性, 增加透水地面可以明显的缓解洪峰流量以及减小系统的总溢流量。

提出了优化排水管网系统、提高排水能力和减少节点溢流的策略, 采取增大“瓶颈”管径、管网清淤、改变地表特性、合理划分汇水区等技术措施, 并研究对于减少节点溢流和系统总溢流的程度, 在 $P=5$ a 时, 增大“瓶颈”管道管径和改变部分汇水区出流点, 可分别减少溢流量 5.4% 和 6.38%; 不改变管网情况下, 增加地表透水面积 10% 和 20%, 分别减少溢流量 24.6% 和 47.0%; 管道清淤对于排水能力有较大影响。

4 结语

在天津城区景观河道水质改善技术、大型生态居住区景观水体水质改善技术和雨水径流污染综合控制技术研究的基础上, 课题形成了景观水体水质改善及长期保持的多级复合流人工湿地异位修复技术、大型生态居住区景观湖体的水质保障集成技术以及城区雨水径流污染控制与净化技术, 初步构建了天津中心城区景观水体水质改善及功能恢复技术体系, 为北方缺水城市景观水体功能恢复与水质改善提供技术支持。

致谢: 天津市市政工程设计研究院、天津市水利科学研究院、天津大学、南开大学、天津城市建设学院、天津水工业工程设备有限公司、天津市城市规划设计研究院、天津市排水管理处等单位完成本课题研究。

✉ 通讯处: 300074 天津市气象台路 99 号

电话: (022) 23545369

E-mail: necw@vip.sina.com

收稿日期: 2013-02-07