



北京城市再生水景观及工业利用技术集成与工程示范

廖日红¹ 胡秀琳¹ 许萍² 李军³ 赵立新¹ 吴晓辉² 许志兰¹ 李垒¹

(1 北京市水利科学研究所,北京 100048; 2 北京建筑工程学院,北京 100044; 3 北京工业大学,北京 100124)

摘要 针对北京市再生水用于城市河湖存在的富营养化风险以及用于工业面临的腐蚀、结垢和黏泥生成加速问题,完成了城市河湖原生净化系统修复与重建、城市河湖水系原位强化处理、城市河湖循环过滤高效旁路净化、磁技术为核心城市河湖水质改善、循环冷却系统腐蚀结垢微生物化学协同控制、热力系统补水膜污染控制等关键技术研究开发,初步构建了再生水用于城市河湖景观及替代传统水源作为典型工业行业用水的集成技术体系,研究成果应用于陶然亭湖、朝阳公园、通惠河等河湖水体水质改善工程和北京京能热电股份有限公司再生水利用改造工程等。

关键词 河湖景观 典型工业 再生水回用 技术集成 工程示范 水专项

1 拟解决的关键技术问题

根据海河流域水环境治理战略目标,结合北京对再生水利用和城市水环境整治的迫切需求,针对再生水补给北京城市景观河湖水系导致水体富营养化与夏季水华暴发等问题,研发再生水补给型城市河湖水体的原位净化和旁路净化关键技术与治理方案,形成良性循环的城市河湖生态系统;根据北京市再生水工业利用的需求,通过典型工业行业再生水利用关键技术研究,初步建立优质再生水工业利用集成技术体系;基本解决再生水用于河湖景观及工业的技术与管理问题。

2 技术路线

通过对北京城市再生水回用现状和发展趋势的调研和分析,开展再生水构成、再生水补水型城市河

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07314-009)。

致谢: 天津市环境保护科学研究院、北京大学、天津大学、南开大学、中国科学院生态环境研究中心、天津工业大学、中海油天津化工研究设计院、天津膜天膜科技有限公司等单位完成课题关键技术研究及示范应用。

参考文献

- 1 苏媵,董贝,杨平. 工业园区废水集中治理方法分析. 环境科学与技术 2011, 34(5): 187~192
- 2 天津市工业经济发展“十二五”规划. <http://www.tjzxxgk.gov.cn/tjep/ConInfoParticular.jsp?id=30436>

湖水水质变化规律、再生水水质对典型工业用水系统影响研究,识别再生水回用于城市河湖景观与典型工业利用的主要问题,研发再生水补给型城市河湖水体的原位净化和旁路净化关键技术及工业用水优质再生水替代关键技术,构建北京城市再生水分质利用及水环境整治集成技术体系,建立示范工程,提高北京市的再生水利用和工程化应用水平。技术路线见图1。

3 主要研究成果与应用示范

3.1 再生水补水型城市河湖水体原生净化系统修复与重建关键技术

针对城市河湖原生净化系统受到严重破坏、生态系统不健全的问题,在分析外来先锋物种生态安全性的基础上,研究水生植被恢复技术、生物链构造和建群技术,恢复城市河湖水生植被,构建水系良性

- 3 周岳溪,宋玉栋,蒋进元,等. 工业废水有毒有机物全过程控制技术策略与实践. 环境工程技术学报 2011, 1(1): 7~14
- 4 徐祖信,屈计宁,傅威,等. 工业区污水治理路线和政策探讨. 环境保护 2005, 1(1): 30~32
- 5 邹家庆主编. 工业废水处理技术. 北京: 化学工业出版社 2003

& 通讯处: 300074 天津市南开区水上公园西路 44 号
420 室

电话: (022) 23545365

E-mail: necw@vip.sina.com

收稿日期: 2013-02-28

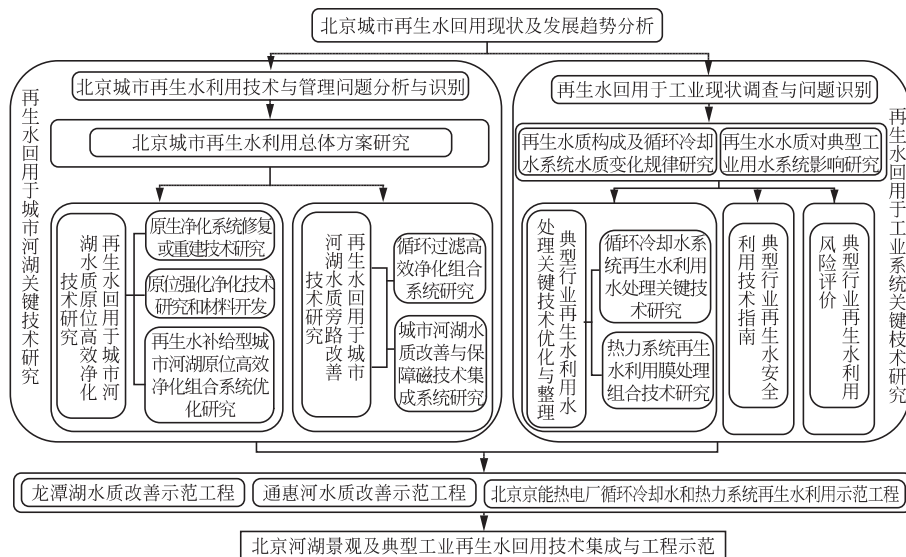


图1 课题技术路线

循环的生物链体系。提出适宜北京城市河湖水生植被恢复的沉水植物3种,挺水植物2种,适宜水生动物2种;探讨了适宜物种的栽种或投放时机和密度。现场原位围隔试验表明,水生生物链构造数月后,透明度提高5~10cm,水体感官效果明显改善,见图2、图3。该技术在解决和应对再生水用于城市河湖后面临的诸多问题时,改变了传统的一味强调水体处理、水质提高的做法,提高水质的同时,在肯

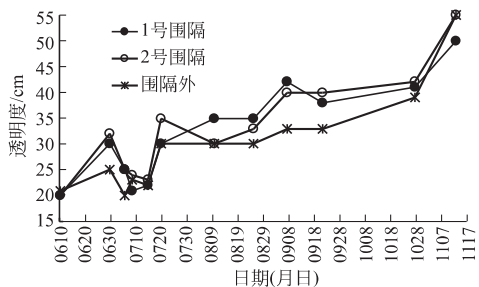


图2 现场原位围隔试验透明度变化情况



图3 现场原位围隔试验水体感官效果对比

定河湖水系原有生态结构和功能作用的前提下,采取人为措施加以干预,恢复和健全水系生态结构,提高水体自净能力,实现河湖水系健康发展和良性循环。

3.2 再生水补水型城市河湖水体原位强化处理关键技术

针对城市河湖原生净化能力有限、水体流动缓慢及污染物逐渐累积的问题,研究缓流水体强化循环流动技术和生物接触氧化技术,强化水体流动,削减水中污染物质和营养盐含量,从而改善水质。提出了不同流速对2种常见水华藻

类和混合藻类的影响(见图4),并提出当流速高于2cm/s时,可明显抑制水华发生;研发了潜水推流充氧设备(见图5),克服了目前常见水体扰动和曝气设备存在的能量损耗高、工作效率低的问题,且溶氧充分、使用寿命长。研发了新型人工水草填料,对浊度、TP、氨氮、叶绿素a和UV₂₅₄的去除率为50%~89%,基本与陶粒相当,对TP和UV₂₅₄净化效果好于陶粒;该种填料布置安装方便,应用形式灵活,不影响行船和行洪,非常适合于城市河湖水体应用。研发了柔性载体生物接触氧化原位强化处理装置并用于实际工程。该技术通过人为措施强化了河湖水系本身的物理和生物特性,提高其自净能力,从而实现水质恢复。

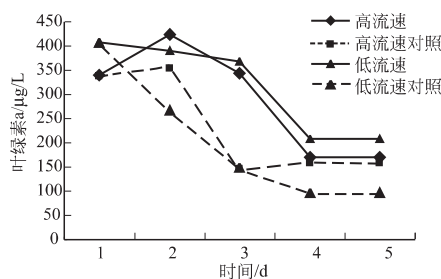


图4 流速对混合藻类生长影响

3.3 城市河湖循环过滤高效旁路净化关键技术

针对城市河湖原位净化能力有限且水体流动性差的问题,研发了以循环过滤技术为主的高效旁路



图5 潜水推流充氧设备

净化系统。研究确定了高锰酸盐复合药剂 (PCC) 与聚氯化铝 (PAC) 联合投加量; 对五种滤料进行筛选, 确定粒径 1.3 ~ 2.2 mm 的活性炭为最佳滤料; 确定循环过滤工艺滤料最佳填充高度为 0.6 ~ 0.8 m, 最佳水力负荷为 5 m/h。通过模拟试验确定了组合滤池最佳运行参数: PAC 投加量 20 mg/L, PCC 投加量 0.6 mg/L, 混凝池水力停留时间 10 min, 斜板沉淀池水力停留时间 20 min, 生物滤池滤速 5 m/h。组合工艺在 3 个循环周期后 (42 h 为 1 个周期) 对原水中浊度、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、色度、藻类和叶绿素 a 去除率在 77% ~ 96%, 见图 6、图 7。该技术克服了现有混凝沉淀、单一滤池技术在处理微污染河湖水净

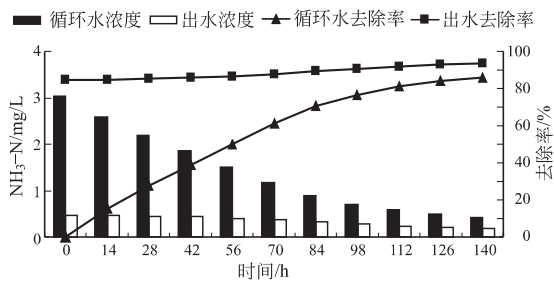


图6 循环过滤工艺对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果

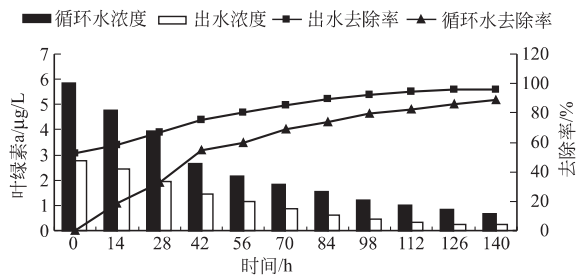


图7 循环过滤工艺对叶绿素 a 去除效果

化过程中技术性和针对性的不足, 提供了一种受污染地表水组合式循环过滤净化工艺, 保证了有机物、氮、磷和藻类物质的高效去除率。

3.4 以磁技术为核心的城市河湖水质改善集成技术

针对城市河湖水体交换周期长、污染物质累积问题, 研发了磁处理集成技术。将磁技术与常规混凝工艺结合, 开发出强化磁絮凝工艺; 研究了磁载体特性及不同工况条件的磁絮凝去除效能, 解决了混凝剂和助凝剂种类及混凝条件, 提高了一般絮凝的去除效果; 确定最佳投加量为: 磁粉 176 mg/L、PAC 51 mg/L、PAM 0.1 mg/L, 该条件下浊度、磷和 COD 去除率分别达到 95%、85%、50% 以上。该工艺可以显著缩短沉淀时间、提高处理负荷和污染削减负荷; 能高效去除水中污染物等, 有效削减后续生物反应器的污染负荷。优化集成碳纤维生态草反应器技术, 研发了以磁技术为核心的集成处理工艺系统 (见图 8), 对 COD 和磷处理效果良好。该技术处理效果好, 用于河湖水系水体治理, 占地小, 灵活性强, 应用性强。

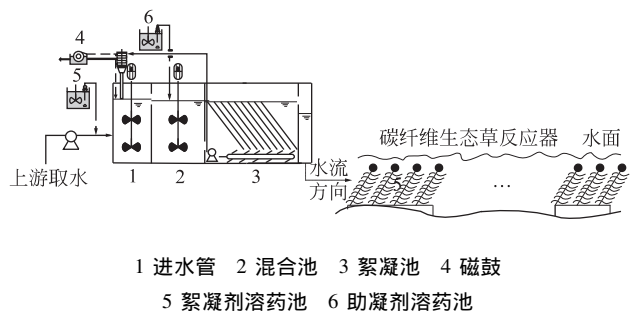


图8 以磁技术为核心的集成处理工艺系统流程

3.5 基于再生水补水的循环冷却系统腐蚀结垢微生物化学协同控制技术

通过典型化学控制技术中缓蚀剂、阻垢剂、杀菌剂协同工作机理与控制效果研究, 研发出高浓缩倍率下循环冷却系统再生水替代腐蚀结垢微生物化学协同控制技术: 选用碳钢缓蚀剂、铜缓蚀剂、复合阻垢剂 B-17 以及氯锭等化学药剂协同工作, 共同控制循环冷却系统的腐蚀、结垢和微生物问题 (见图 9、图 10)。中试结果以及示范工程运行结果表明, 在氯锭为 150 mg/L、碳钢缓蚀剂为 6 mg/L、黄铜缓蚀剂为 6 mg/L、复合阻垢剂 B-17 为

8 mg/L 的投加量 浓缩倍率为 4 倍的条件 下 再生水补水的循环冷却系统的年污垢热阻为 $1.937 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 换热器和进出口管道的污垢沉积率分别为 $14.103 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{月})$ 、 $13.078 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{月})$ 和 $13.770 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{月})$,碳钢的腐蚀速率在 $0.01 \text{ mm}/\text{a}$ 以下 ,黄铜腐蚀速率在 $0.002 \text{ mm}/\text{a}$ 以下 ,悬浮和附着态微生物杀菌率均维持在 90% 以上。该技术安全可靠 ,且便于对现有系统实施再生水利用改造 ,可为再生水补水的循环冷却系统在高浓缩倍率下安全稳定运行提供技术支持。

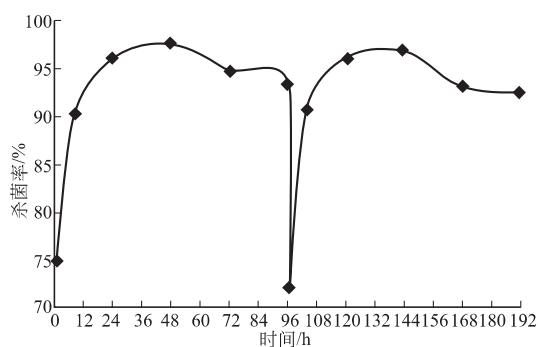


图 9 悬浮微生物控制效果

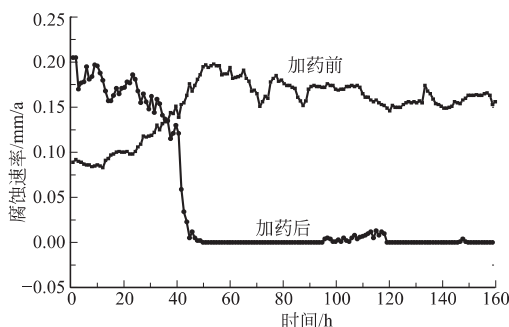


图 10 碳钢腐蚀速率变化

3.6 基于再生水-循环排污水的热力系统补水膜污染控制技术

该关键技术包括再生水用于热力系统补水膜组合工艺处理技术、机械加速澄清池强化混凝技术及 RO 膜化学清洗方法。通过试验确定了 RO 膜的最佳预处理工艺为机械加速澄清池 + 多介质过滤 + UF 图 11、12 为最佳预处理工艺条件下 RO 膜前后压力及 RO 回收率。优化机械加速澄清池中混凝剂的投加量并采用污泥回流技术强化混凝效果 ,确定 PAC 最佳投加量为 $11 \text{ mg}/\text{L}$,污泥回流比为 20% ~ 30% ;通过 RO 膜污染机理及控制技术研究 ,确定膜

表面的污染物主要包括有机物、Si、Al、Fe、Mg 胶体等 ,有机物主要是一些相对分子质量为 $2.5 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$ 的中小分子有机物(腐殖质、色氨酸等) ,进而确定膜化学清洗药剂为 NaOH ,药液浓度为 $1000 \text{ mg}/\text{L}$ 。为回收利用电厂循环冷却排污水 ,国内外热电厂锅炉补给水的预脱盐水多采用以反渗透为主的膜组合工艺对之进行处理 ,预处理形式多样 ,包括:强化常规、微滤、超滤等;本技术中将机械加速澄清池 + 超滤作为反渗透预处理 ,并且采用污泥回流方式强化混凝效果在国内尚属首例 ,具有推广应用价值。

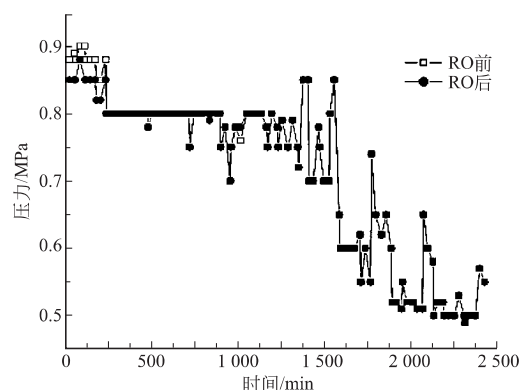


图 11 RO 膜最佳预处理工艺 RO 前后压力

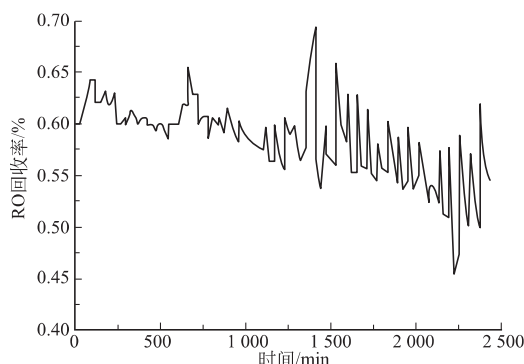


图 12 RO 膜最佳预处理工艺 RO 回收率

3.7 工程应用示范成果

3.7.1 龙潭西湖原位和旁路水质改善示范工程

龙潭西湖水面面积 5.5 hm^2 ,平均水深 1.5 m ,水量 8.25 万 m^3 ,其补水水源主要为市政再生水和园区内雨水。示范工程实施前 ,湖区水体主要污染物 COD、BOD₅ 和总氮超标严重 ,水质处于劣 V 类。示范工程建设内容包括:旁路循环过滤净化工程处理水量 $5520 \text{ m}^3/\text{d}$,柔性载体生物接触氧化工程敷设人工水草 2640 m^2 ,布置潜水推流曝气机 7 台 种植

水生植物面积 1 580 m² ,放养鱼类 0.82 万尾 螺、蚌类 3.3 t; 工程最终维护水面面积 5.5 hm² ,水体总量 8.25 万 m³。

示范工程建设完成后 ,水体生态环境得到明显改善 ,水系生物链系统逐步完善 ,同时水体透明度比工程实施前增加 20 ~ 30 cm。工程运行后 ,对循环过滤净化工程出水和示范工程区域水体水质进行监测 ,结果表明 ,主要考核指标 COD 小于 30 mg/L ,氨氮浓度小于 1.5 mg/L ,均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中 IV 类水体标准。

3.7.2 通惠河磁处理水质改善关键技术示范工程

通惠河来水主要为高碑店污水处理厂出水 ,沿途无较大污水排放口 ,水质常年较稳定 ,属于微污染河流水质。示范工程位于通惠河岸边 ,规模为 1.5 万 m³/d。示范工程工艺为磁絮凝装置与碳纤维生态草反应器集成系统。工程从通惠河直接取水 ,经磁絮凝处理后出水通过出水管重力流至河中 ,在河道中布置碳纤维生态草。

示范工程建成后 ,对运行效果进行监测。示范工程在运行期间进水污染物浓度均值分别为: 浊度 4.6 NTU、COD 40 mg/L、TP 0.7 mg/L、氨氮 4 mg/L ,出水污染物浓度均值分别为: 浊度 0.6 NTU、COD 7 mg/L、TP 0.4 mg/L、氨氮 0.3 mg/L ,出水主要考核指标 COD 和氨氮均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中 IV 类水体标准。

3.7.3 北京京能热电股份有限公司循环冷却和热力系统再生水利用示范工程

北京京能热电股份有限公司企业生产系统原设计水源为永定河地表水 ,于 2007 年 5 月开始采用再生水作为工业生产替代水源后 ,循环冷却水系统金属腐蚀加重 ,浓缩倍数也相应降低; 同时采用循环冷却系统排污水作为补充水水源的热力补水处理系统也出现处理能力下降、膜污染严重、脱盐率降低的现象。

针对上述问题 ,课题在开展大量静态试验和现场动态模拟试验研究基础上 ,提出了“基于再生水利用的循环冷却水系统高浓缩倍数腐蚀结垢微生物协同控制技术”和“基于再生水-循环排污水利用的热力系统膜污染与水质控制最优组合工艺” ,在现有生产系统中予以改造。示范工程主要包括以下两部分内容:

(1) 循环冷却水系统再生水利用示范工程。在

确保系统安全稳定运行前提下 ,使采用再生水补水的循环冷却水系统浓缩倍数不小于 3。示范工程循环水量规模为 2 万 ~ 4 万 m³/d。

(2) 热力系统再生水利用示范工程。针对采用循环冷却系统排污水作为补充水水源的热力补水系统 ,优化膜处理为主的工艺流程 ,控制膜污染 ,提高脱盐率。工程循环水量 4 000 ~ 1.3 万 m³/d。

示范工程建设完成后 ,稳定运行监测结果表明: 在全部采用再生水作为补充水水源(不含其他勾兑水) 情况下 ,循环冷却系统平均浓缩倍数达 3.2; 热力系统在采用循环排污水作为补充水水源情况下 ,氯化物去除率可达 97.5% ,硬度去除率可达到 99.8% ,示范组合工艺运转正常 ,效果好。

4 结论

针对北京市再生水回用于城市河湖存在的富营养化与水华风险问题 ,课题研发了原生净化系统修复与重建关键技术、原位强化处理关键技术、循环过滤高效旁路净化技术和以磁技术为核心的城市河湖水质改善集成技术 ,研究成果已经应用于北京市陶然亭湖、朝阳公园、通惠河等城市河湖水体水质改善工程中 ,为工程设计和运行管理提供了技术工艺参数和指导 ,有效地保证了工程实施效果。

针对再生水工业回用过程中有机物等含量高、腐蚀性强、结垢倾向大等问题 ,课题研发了针对典型工业行业—热电厂再生水利用的循环冷却系统腐蚀结垢微生物化学协同控制技术和热力系统补水膜污染控制技术 ,研究成果已经应用于北京京能热电股份有限公司循环冷却和热力系统再生水利用改造工程中 ,为工程实施提供了技术支持。

课题经过技术研发和工程示范 ,初步构建了再生水回用于城市河湖景观及替代传统水源作为典型工业行业用水的集成技术体系 ,为提高北京乃至全国类似地区和工业的再生水回用工艺技术水平提供了技术支持和参考。

& 通讯处: 100048 北京市海淀区车公庄西路 21 号 A 座
211A 室

E-mail: huxiulinsy@ 126. com

收稿日期: 2013-02-28