

浑河沈抚区域重污染支流河治理技术研究

彭剑峰^{1,2}, 宋永会^{1,2}, 高红杰^{1,2}, 任兆勇^{2,3}, 李蕊^{1,2}, 于会彬^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院城市水环境研究室, 北京 100012;

2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012;

3. 山东科技大学化学与环境工程学院, 山东青岛 266510)

[摘要] 针对浑河沈阳—抚顺(沈抚)区域重污染支流污染源及水质变化特点, 优化筛选出潮汐流人工湿地强化脱氮技术、多层组合生物浮岛净化技术, 以及傍河藻类塘与水生植物塘联用等支流河修复技术; 分析了各项技术的基本原理、处理效果, 提出了最佳工艺运行参数, 验证了技术在示范工程中的应用效果。结果表明, 相关技术对于北方地区重污染支流具有较好的治理效果, 具有较高的推广价值。

[关键词] 重污染支流; 沈抚区域; 潮汐流湿地; 适用性

[中图分类号] X522 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)03-0103-04

1 前言

随着我国城市化及农村经济的快速发展, 支流河逐渐演变为区域水循环体系的“静脉”系统, 成为生活源、工业源、径流源、畜禽养殖源等的主要收纳水体, 其水环境质量随着经济快速发展呈急剧恶化趋势^[1-3]。尤其自 20 世纪 90 年代以来, 支流河污染已成为我国区域水环境质量改善的顽疾。如何实现支流水质快速恢复成为构建区域健康水循环体系的核心之一^[4-6]。

浑河是辽河流域最重要的河流之一, 而沈阳—抚顺(沈抚)区域是浑河流域的主要城市集聚区, 也是浑河污染的主要来源^[7]。沈抚区域聚集了浑河流域 60% 以上的支流, 支流水系普遍存在重污染行业密集、自然补水季节差异明显、补水水质差, 河水环境容量低、自净能力低下以及河道维护与管理欠缺等区域特征, 导致大部分支流河化学需氧量(COD)和氨氮(NH₄⁺-N)指标属于劣 V 类(见图 1)。支流污染源分析显示, 其污染主要来自于城市生

活源(占 COD 和 NH₄⁺-N 入河量的 53% 和 63%)和工业污染源(均占 COD 和 NH₄⁺-N 入河量的 27%)。由于缺乏稳定的自然补水, 沈抚地区支流在枯水期绝大部分补水来自于城市排水, 这是导致支流水质差的最根本原因。

根据补水来源差异, 沈抚地区支流水系表现出两类不同的污染特征。第一类以抚顺海新河为代表, 支流补水仍以工业、生活点源污染为主, 有机物和悬浮物成为主要污染物, 河水水质极度恶化, 水生态系统被完全破坏。第二类以沈阳细河为代表, 补水以城市污水处理厂排水为主, 氮磷营养物成为特征污染物, 水质相对较好, 但菹草等水生植物大量滋生。“十一五”期间, 依托国家重大水专项, 针对浑河沈抚区域重污染支流水系补水来源、经济条件、河流功能定位差异, 研究中按照“控源优先、生态修复为主、景观性与经济性并重”的理念, 通过“问题诊断→源头削减→水质净化→生态环境改善→生态恢复”的工作思路, 开展了多项技术的研发和应用工作。

[收稿日期] 2012-11-13

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-003, 2012ZX07202-005)

[作者简介] 彭剑峰(1977-), 男, 山东泰安市人, 副研究员, 研究方向为水环境整治及风险控制; E-mail: pjf1995@163.com

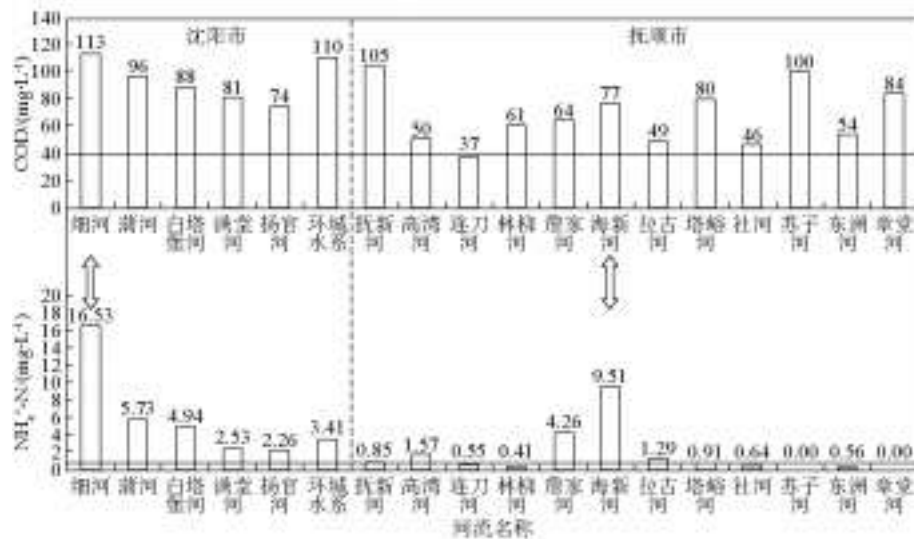


图1 沈抚地区浑河支流COD和NH₄⁺-N分布

Fig.1 The distribution of COD and NH₄⁺-N in Hunhe River of Shenyang—Fushun Zone

2 重污染支流生态治理技术研究

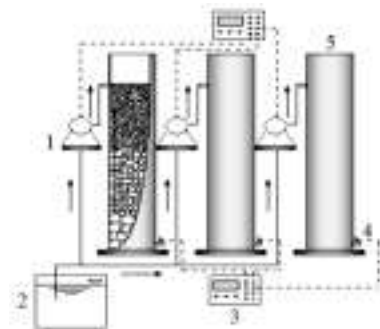
针对浑河沈抚区域重污染支流水环境特征,开展了13项单项技术的研发,筛选出潮汐流人工湿地强化脱氮技术、多层组合生物浮岛净化技术,以及傍河藻类塘与水生植物塘联用这三项支流水修复技术。

2.1 潮汐流人工湿地强化脱氮技术

常见的人工湿地类型有水平潜流和垂直流人工湿地。然而,在水平潜流人工湿地中,其基质长期处于淹没状态,液面扩散复氧和植物根系泌氧能力有限^[8,9],床体表现为缺氧环境,不利于大量NH₄⁺-N的氧化去除^[10]。而在垂直流人工湿地中,虽然水流因重力作用在基质中非饱和流动时能够增强湿地床体的氧扩散能力^[11],然而其复氧量仍不能满足硝化细菌对氨氧化去除的需求^[12]。因此,湿地内溶解氧(DO)的提高成为提升湿地脱氮效果的关键^[8, 13]。

潮汐流人工湿地是一种新型人工湿地,它是通过将湿地按时间序列周期性地充水和排干,使得湿地内部不断形成好氧—厌氧过程,这种交替的进水和空气运动,使得氧的传输速率和消耗量大大提高,强化了湿地的处理效果,反应器构型如图2所示。通过11个月的连续运行研究表明,在水力负荷为0.2 m³/(m²·d)条件下,3周期/d的潮汐流人工湿地(反应4 h, 闲置4 h)出水DO值为0.61 mg/L,高于潜流人工湿地的0.22 mg/L;其对NH₄⁺-N的年平均去除率达到37%,比潜流人工湿地提高了约

30%,且其在低温条件下(水温9~13℃)对NH₄⁺-N仍具有较好的净化效果,去除率可达34%^[14, 15](见图3)。



1—蠕动泵;2—配水箱;3—可编程逻辑控制器;4—电动阀;
5—湿地床体

图2 潮汐流湿地装置图

Fig.2 Schematic of the tidal-flow wetland

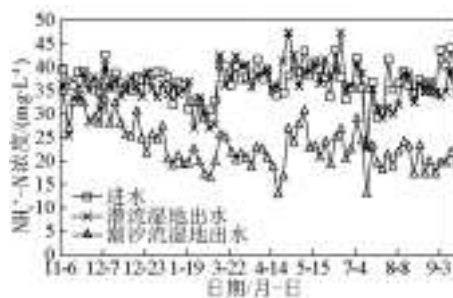


图3 潮汐流湿地对NH₄⁺-N的去除

Fig.3 NH₄⁺-N removal in the tidal-flow wetland reactors

2.2 多层组合生物浮岛净化河水技术

传统生物浮岛一般采用浮床载体形式,其在低覆盖率下净化效率低,高覆盖率下阻断DO进入水体且抑制硝化作用及水生生物生长。多层组合生物浮岛将传统浮岛改为两层的立体结构(见图4),通过添加填料挂膜增加了生物附着面积;通过将植物净化、生物膜和跌水富氧技术相结合,可有效削减水体中的COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和磷酸盐,同时改善浮岛景观效果^[16,17]。

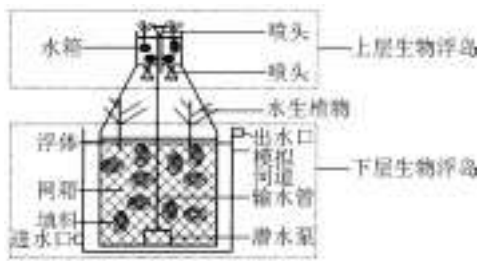


图4 多层生物浮岛结构图

Fig.4 Schematic of the multi-layers floating island

在实验模拟体系中,夏秋季在水力停留时间(HRT)为2 d时,多层生物浮岛中填料挂膜持续进行23 d后完成挂膜,多层生物浮岛对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和COD的去除率可达73%和71%,比单层浮岛分别提高约40%和15%。填料生物膜上先出现大量的丝状菌,而后逐渐出现钟虫、轮虫和线虫等原生动物。通过植物筛选实验结果表明,沈抚区域植物对水体净化效果由高到低的顺序为:芦苇>美人蕉>千屈菜。工程条件探索显示,芦苇生物浮岛适宜于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除,最佳HRT为12 h,进水适宜浓度为15~17 mg/L;美人蕉生物浮岛适宜COD去除,最佳HRT为8 h,适宜浓度为120~140 mg/L^[18]。

2.3 傍河藻类塘与水生植物塘联用净化技术

高效藻类塘依靠塘系统内生长的大量藻类实现水体中N、P污染物的有效去除,这种工艺在我国主要应用于南方地区^[19]。但在沈抚地区支流河中发现水流缓慢区域内也生长着大量藻类,因而研究中探索了藻类塘在北方地区的实际应用效果。采用两级高效藻类塘与水生植物塘联用的方式(见图5),探索了该系统与城市水体景观结合的可行性。

研究显示,在30 d内可以完成两级高效藻类塘的启动,塘内叶绿素a浓度可以达到2.0 mg/L左右。联用工艺最佳运行参数为:HRT为4 d,水深为50 cm。在进水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、总氮(TN)和总磷

(TP)浓度分别为70~100 mg/L、1.6~2.9 mg/L、2.3~4.5 mg/L和0.6~1.2 mg/L的条件下,联用工艺出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP浓度分别为35.40 mg/L、0.66 mg/L、1.51 mg/L和0.16 mg/L,分别达到地表水环境质量标准中规定的V、Ⅲ、V和Ⅲ类标准^[20]。图6为联用工艺进出水中COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的变化。

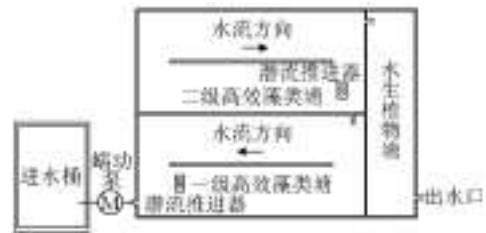


图5 藻类塘与水生植物塘联用工艺平面图

Fig.5 The combined process of algal pond and hydrophyte pond

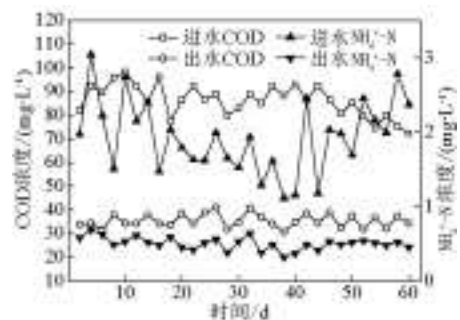


图6 联用工艺进出水COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化

Fig.6 Variations of COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations of practical river water by multi-stage pond

3 河流生态治理技术工程验证

在关键技术研发的基础上,通过与沈阳细河及抚顺海新河综合整治工程结合,将塘-湿地组合技术及多层浮岛技术在示范工程中进行了应用。

3.1 抚顺城市河道和城市综合废水治理示范

浑河支流海新河中、下游由于棚户区较密集,城市段基础设施不完善,针对由此导致的河水浊度高、污染严重等问题,利用距浑河河口2 km、占地 $1.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的废弃场地,采用物化(絮凝沉淀)和生化(塘-人工湿地)集成技术,建立海新河污水处理厂和表面流人工湿地示范工程(见图7)。示范工程包括改造一座日处理能力为 $6 \times 10^4 \text{ t}$ 的一级污水处理装置和一块占地 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的人工湿地,湿地栽植芦苇、蒲草、茭白等水生植物。示范工程出水COD可

由 159 mg/L 降至 30 mg/L, 达到河流水质要求, 且部分出水回用至抚顺热电厂, 保障了污水处理设施的长效运转。

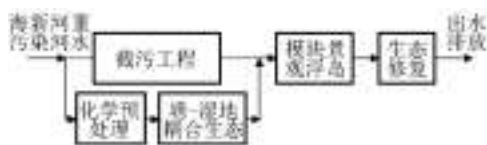


图7 抚顺市海新河废水治理示范工艺流程图

Fig.7 Treatment process in the demonstration project of Haixin River in Fushun City

3.2 细河水质改善与水环境建设示范

针对沈阳细河补水水质差, 河流自净能力低, 水质/水量季节差异大, 水体 COD 和氨氮超标严重, 底泥以 C_d 、 P_b 、 C_r 为代表的重金属污染严重等问题, 按照“污染源控制→底泥环保清淤及安全处理处置→水环境强化改善→水体自净效能提升→水体景观化恢复”的技术路线, 将研发的多层组合生物浮岛和傍河藻类塘与水生植物塘联用等技术进行集成和示范。示范工程建设实现了 13 km 河流的底泥环保清淤, 清淤底泥 150 000 m^3 , 改造了 40 000 m^2 的景观湖, 构建了 1 000 m^2 的水体景观, 实现了河流上游水质的明显改善, 为细河流域消除劣 V 类水体起到了示范作用。图 8 给出了细河水质改善和水环境建设工艺流程图。



图8 细河水质改善与水环境建设工艺流程图

Fig.8 Treatment process in the demonstration project of Xihe River in Shenyang City

4 结语

1) 针对浑河沈抚区域重污染支流水系补水来源、经济条件、河流功能定位的差异, 提出“控源优先、生态修复为主、景观性与经济性并重”的河流治理理念, 通过“问题诊断→源头削减→水质净化→生境改善→生态恢复”的工作思路, 开展了多项技术的研发和应用工作。

2) 模拟研究表明, 潮汐流人工湿地技术对 NH_4^+-N 的净化效果比潜流人工湿地提高了约 30%, 且在低温条件下(水温为 9~13 $^{\circ}C$)对 NH_4^+-N 仍具有较好的净化效果, 去除率可达 34%; 夏秋季多层生物浮岛对 NH_4^+-N 和 COD 的去除率分别为 73% 和 71%, 比单层浮岛分别提高约 40% 和 15%; 高效藻类塘与水生植物塘联用的工艺能够实现净化后河水水质达到地表水 V 类标准。

3) 针对水质/水量季节差异大、外源污染长期存在、河边有闲置土地的典型重污染支流, 通过傍河式高效藻类塘、水生植物塘、潮汐流人工湿地等技术的集成, 可增加水体的自净时间, 扩展水体面积, 实现水体中氮磷营养物的持续高效去除, 提升河道整治工艺的景观效果。

参考文献

- [1] 严立冬, 岳德军, 孟慧君. 城市化进程中的水生态安全问题探讨[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2007(1): 57-62.
- [2] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 辽河流域水生态分区研究[J]. 环境科学学报, 2007(6): 911-918.
- [3] 吴志峰, 胡永红, 李定强, 等. 城市水生态足迹变化分析与模拟[J]. 资源科学, 2006(5): 152-156.
- [4] 陈兴茹. 国内外河流生态修复相关研究进展[J]. 水生态学杂志, 2011(5): 122-128.
- [5] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2002(9): 14-19.
- [6] 钟春欣, 张玮. 基于河道治理的河流生态修复[J]. 水利水电科技进展, 2004(3): 12-14.
- [7] 惠秀娟, 杨涛, 李法云, 等. 辽宁省辽河水生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2011(1): 181-188.
- [8] 吴树彪, 张东晓, 柳青青, 等. 潮汐流人工湿地床处理生活污水的优化研究[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(2): 106-113.
- [9] Lin Y F, Jing S R, Wang T W, et al. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands [J]. Environmental Pollution, 2002, 119(3): 413-420.
- [10] Job G D, Biddlestone A J, Gray K R. Treatment of high strength agricultural and industrial effluents using reed bed treatment systems [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1991, 69(3): 187-189.
- [11] Cooper P. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates [J]. Water Science and Technology, 2005, 51: 81-90.
- [12] 鄢璐, 王世和, 黄娟, 等. 潜流型人工湿地基质堵塞特性试验研究[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 627-631.
- [13] Platzer C. Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3): 257-263.
- [14] 叶捷, 彭剑峰, 高红杰, 等. 低温下潮汐流人工湿地系统对生活污水净化效果[J]. 环境科学研究, 2011, 24(3): 294-300.
- [15] 叶捷, 彭剑峰, 高红杰, 等. 潮汐流人工湿地低温下 NH_4^+-N 去除模型的比较和优化[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1456-1463.

(下转 112 页)