

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征 王英, 李令军, 刘阳 (3685)

2008~2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)

沧州市大气污染特征观测研究 王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)

华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)

广州市交通主干道空气中苯系物的测量 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)

基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究 黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)

柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性 胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)

九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)

南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)

天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)

北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)

云阳宗海湖的分布与来源 张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)

南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)

三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)

江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究 单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)

人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)

潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响 魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)

人工湿地处理含盐生活污水的特性研究 高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)

催化湿式氧化法降解水中的 β-萘酚 刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)

ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究 孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)

微波改性 MWNTs/TiO₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究 施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)

腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)

臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究 邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)

复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究 徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)

进水比例对水解反应器出水水质的影响研究 梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究 韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)

我国城市污水处理回用调查研究 郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)

快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征 姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)

黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)

半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)

广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)

酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究 王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)

淋洗条件下砂土和粉土水盐运移过程的监测研究 付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)

空气注射修复苯污染地下水模拟研究 樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)

不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性 张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)

上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应 陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)

耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究 吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)

高效降酚菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究 陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)

四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究 钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)

长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响 尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)

三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究 何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)

多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因子研究 肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)

硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响 刘敬勇, 孙水裕 (3990)

关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究 纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)

第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文

稻田气溶胶 NH₃ 和气体 NO_x 排放在线测定研究 龚巍巍, 栾胜基 (4006)

一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制 文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)

基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究 孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)

涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别 丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)

人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)

基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌 林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)

消毒副产物生成的温度影响和动力学模型 张小璐, 杨宏伟, 王小任, 付静, 解跃峰 (4046)

一种厌氧微定量研究新方法 张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)

梧桐树叶作为反硝化碳源的研究 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)

降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究 崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)

《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)

人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果

汪仲琼^{1,2}, 张荣斌³, 陈庆华³, 魏宏斌³, 王为东^{1*}

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 嘉兴市水利投资有限公司, 嘉兴 314033)

摘要: 嘉兴市石臼漾湿地以仿拟自然界的植物床-沟壕系统为主要结构单元, 以人工湿地生态根孔技术为核心净化技术, 将河网源水主要水质指标提高了一个类别。为探索该系统以及根孔净化技术的优化途径, 于 2010 年 5 ~ 10 月在湿地内构建了 16 个并联的植物床-沟壕单元, 以正交设计手段研究根孔构筑方式、植物组合和强化介质 3 种因素对人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果的影响。综合考虑水质净化效果、工程施工难易程度、建设及运行维护成本等情况, 推荐人工湿地植物床-沟壕系统的优化途径为: 根孔构筑方式采用上、下两层秸秆填埋方式, 植物组合优选芦苇 + 菰, 在植物床局部采用适量方解石作为强化介质。比较了中试强化区和大工程区的水质净化效率, 结果显示: 强化后的植物床-沟壕系统具有进一步提升湿地水质净化效果的潜能, 对总氮、总磷、氨氮等水质指标去除率提高幅度约为 20% ~ 40%。因此在保证湿地处理水量的前提下, 控制大渠过水量、增加植物床-沟壕系统内根孔区的过流量可以发挥该系统更好的水质净化效果。

关键词: 嘉兴石臼漾湿地; 水陆交错带; 植物床-沟壕系统; 根孔净化; 净水效果; 正交试验设计

中图分类号: X522; X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)11-3804-08

Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems

WANG Zhong-qiong^{1,2}, ZHANG Rong-bin³, CHEN Qing-hua³, WEI Hong-bin³, WANG Wei-dong¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiaxing Water Conservancy Investment Limited Company, Jiaxing 314033, China)

Abstract: Shijiyang constructed wetland (SJY-CW) in Jiaxing City adopted plant-bed/ditch systems originated from the natural landscape as its major functioning unit. The constructed root channel technology (CRCT) is the core technique applied within the plant-bed/ditch systems. Monitoring results demonstrated that the wetland had the capability of improving water quality indexes by one rank grade according to the national environmental quality standards for surface water (GB 3838-2002). In order to optimize the water quality improvement function of plant-bed/ditch systems and CRCT, a pilot project in SJY-CW was constructed from May to October, 2010. The project contained 16 independent experimental cells. Orthogonal test design was applied to probe into the effects of constructed root channel layers, plant species combination, and reinforced physical substrates on promoting the water quality amelioration efficiency of the plant-bed/ditch systems. Comprehensively considering water treatment effects, construction difficulty, and construction and maintenance cost, the recommended optimal ways are as follows. Plant straws were preferably paved under subsurface zones by two layers with a gap of 20-30 cm. The preferable plant combination was reed (*Phragmites australis*) plus wild rice (*Zizania caduciflora*). Calcite might be applied as alternative reinforced media in some suitable sites of plant-bed/ditch systems. Water treatment effects were compared between pilot project and the whole wetland area of SJY-CW. The results showed that the reinforced pilot project exhibited higher treatment efficiency for nutrients than SJY-CW itself. The removal rates of total nitrogen, total phosphorus, and ammonia nitrogen were increased by about 20% -40% in the pilot project. This suggested that SJY-CW could release its vast water treatment potential by means of increasing water flux through the subsurface root channel zones of plant beds. Therefore, some adjustment and control measures could be proposed to maintain the tradeoff balance between the potential release and maximization of wetland treatment efficiency and the treated water amount, such as constructing or modifying the hydraulic structures to regulate flow amount through large ditch, redistributing water flow and increasing the water head difference between the two sides of alternate small ditches.

Key words: Shijiyang constructed wetland in Jiaxing City; land/inland water ecotones; plant-bed/ditch systems; root channel purification; water treatment efficiency; orthogonal test design

收稿日期: 2012-01-12; 修订日期: 2012-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278487); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421103); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07421-001, 2009ZX07209-005); 嘉兴市科技计划项目(2011AZ2019)

作者简介: 汪仲琼(1986 ~), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为人工湿地植物床-沟壕系统及根孔作用, E-mail: wzq198609@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wdwang@rcees.ac.cn

水陆交错带是指水生生态系统和陆地生态系统之间具有显著边缘效应和时空异质性的界面区,其重要生态功能是对相邻环境斑块 (environmental patches) 或资源斑块 (resource patches) 之间的水流、能量流和物质流具有调控能力^[1,2]。研究表明,这种功能可用于接纳水体水质的保护^[3]。植物床-沟壕系统是一种在自然界 (如白洋淀) 广泛存在的水陆交错带系统 [图 1(a)], 在水质净化功能方面具有极强的时空异质性、界面缓冲性和内部稳定性^[4,5]。仿拟该系统并做适当优化从而应用于城市饮用水水源保护湿地——嘉兴市石臼漾湿地 [图 1(b)], 丰富了人工湿地的构建形式。通过堵头、半堵头 (亦称卡口)、水闸等水工微结构的布设和水力调控,使其更好地发挥水陆交错带的过滤与截留作用,从而实现对水源地的保护。目前,鲜见规模化人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果的报道^[6]。



(a) 白洋淀湖泊湿地中的植物床-沟壕系统



(b) 嘉兴石臼漾湿地中的植物床-沟壕系统

图 1 自然湿地和人工湿地中的植物床-沟壕系统

Fig. 1 Plant-bed/ditch systems in natural wetland and constructed wetland

石臼漾湿地自 2008 年 7 月建成运行以来,其水质净化效率一直是各方关注的焦点,尤其是人工构建的大规模的植物床-沟壕系统在城市水源地保护中的功效。本研究以石臼漾湿地的大工程区和中试强化区为对象,对比分析了其水质净化效率,探索了人工湿地植物床-沟壕系统的优化途径,以期植物床-沟壕系统在人工湿地中的推

广应用提供一定的理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

石臼漾湿地位于浙江省嘉兴市市区西北角,紧邻石臼漾水厂。地理坐标 $N30^{\circ}46'12.57'' \sim 30^{\circ}47'02.31''$, $E120^{\circ}41'52.43'' \sim 120^{\circ}42'41.31''$,是目前国内最大的城市饮用水水源保护湿地。利用城市楔形绿地,规划总面积 2.59 km^2 ,包括河道生态修复区、湿地核心净化区、湿地绿化景观区以及科普实践区等部分。湿地核心区总面积 108.7 hm^2 ,其中陆地面积 45.4 hm^2 ,水域面积 63.3 hm^2 。湿地工程由中国科学院生态环境研究中心提供方案和技术支持,并与嘉兴市水利水电勘察设计研究院联合设计,项目直接投资 6034 万元。于 2008 年 7 月 2 日建成并投入试运行,至 2009 年 5 月 8 日东西双区联用正式投入运行。处理河网源水 $25 \text{ 万} \cdot \text{d}^{-1}$,并贮存超过 $120 \text{ 万} \text{ t}$ 水厂备用水,基本实现了主要水质指标改善一个等级的目标,显示出较好水质净化功能和多方面生态服务功能^[7]。湿地功能区分为预处理区、湿地根孔生态净化区、水位提升和曝气充氧区、深度净化区以及达标引水区,总平面布置和分区示意图见文献^[8]。工艺流程为:新塍塘或北郊河源水→义庄河→预处理区→北郊河以西湿地根孔生态净化区→顶管→顶管接收池→泵提升→北郊河以东湿地根孔生态净化区→深度净化区→达标引水区。其中湿地根孔生态净化区由植物床-沟壕系统组成,在植物床内部含有人造根孔 [图 1(b)]。

中试工程强化试验区 (简称中试强化区) 位于石臼漾湿地西区的预处理区之后,长 136.98 m ,宽 30.74 m ,总面积 4210 m^2 。于 2010 年 5~10 月构建完成。由 16 个独立的试验单元格 (cell) 组成,每个单元格包括进水小沟、植物床和出水小沟 (图 2)。单元格之间通过砖砌水泥挡墙相隔,防止水流的相互侧漏和交换。植物床两端设有 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的介质区。植物床内部以根孔构筑方式 (R)、植物组合 (P)、强化介质 (M) 为试验因素 (2~4 水平) 进行正交试验设计 (表 1),采用 SAS JMP 8.0 软件的定制设计功能完成,试验顺序随机化,不考虑交互作用。

嘉兴市地处亚热带季风区,四季分明,年平均气温 16.0°C ,年平均降雨量 $1100 \sim 1260 \text{ mm}$,年平均蒸发量 910 mm 。境内气候温和湿润、日照充足,降水主要集中在 5~9 月,呈现梅雨型 (5~7 月) 和台雨型 (8~9 月) 的“双峰”型降水特征。

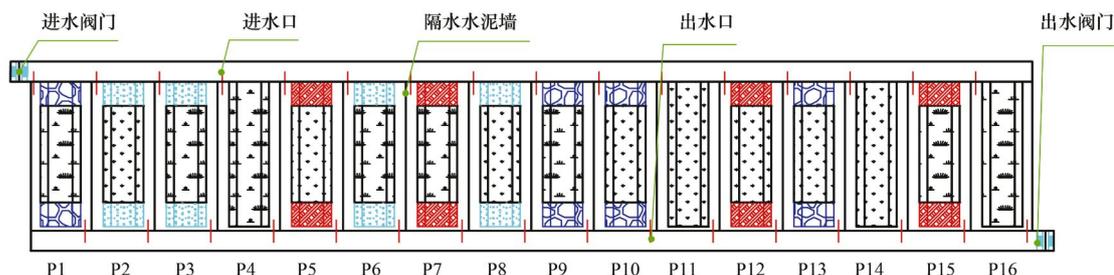


图2 中试强化区平面布置示意

Fig. 2 Plan view of pilot project

表1 中试强化区正交设计表

Table 1 Orthogonal test design table for pilot project

试验号	根孔构筑方式(R)	植物组合(P)	强化介质(M)
P1	2-均匀分布	1-芦苇+菰	1-砾石
P2	1-两层	2-灯心草+香蒲	2-沸石
P3	2-均匀分布	1-芦苇+菰	2-沸石
P4	1-两层	1-芦苇+菰	4-根孔
P5	2-均匀分布	2-灯心草+香蒲	3-方解石
P6	2-均匀分布	1-芦苇+菰	2-沸石
P7	1-两层	1-芦苇+菰	3-方解石
P8	1-两层	2-灯心草+香蒲	2-沸石
P9	2-均匀分布	1-芦苇+菰	1-砾石
P10	1-两层	2-灯心草+香蒲	1-砾石
P11	2-均匀分布	2-灯心草+香蒲	4-根孔
P12	2-均匀分布	2-灯心草+香蒲	3-方解石
P13	1-两层	2-灯心草+香蒲	1-砾石
P14	2-均匀分布	2-灯心草+香蒲	4-根孔
P15	1-两层	1-芦苇+菰	3-方解石
P16	1-两层	1-芦苇+菰	4-根孔

为了有效评估石臼漾湿地水质净化的季节模式,采取中国气候学家提出的标准来划分嘉兴地区的四季. 当候温(五日平均温度)在 $10 \sim 22^{\circ}\text{C}$,为春季;当候温在 22°C 以上,为夏季;当候温在 $22 \sim 10^{\circ}\text{C}$,为秋季;当候温在 10°C 以下,为冬季. 由此,划分出嘉兴地区的四季和对应天数分别为:①春季:3月中旬至5月中旬,共71 d;②夏季:5月下旬至10月上旬,共143 d;③秋季:10月中旬至11月下旬,共51 d;④冬季:12月上旬至翌年3月上旬,共100 d. 其中,冬季和春季合称为冷季(共171 d),夏季和秋季合称为暖季(共194 d).

1.2 研究方法

石臼漾湿地投入运行后,浙江省城市供水水质监测网嘉兴监测站、石臼漾水厂每日定时采集石臼漾湿地进口、出口水样进行分析测定. 2009年7月~2010年12月期间,不定期采集石臼漾湿地各功能区水样,比较其水质净化效果.

2011年3月底,采集中试强化区内进水渠、出水渠、进水小沟、出水小沟和植物床观测孔内的水

样,现场立即测定水温(t)、溶解氧(DO)、pH等水体常规指标. 水样采集时,在同一沟渠内等间距设置3个采样点,每点采集100 mL水样,混匀后作为该沟渠的代表水样. 采集后的水样用野外便携式保温箱临时冷藏储存,并尽快运回实验室,在 4°C 下冷藏保存,于48 h内测定氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、溶解性磷酸盐($\text{PO}_4^{3--}\text{P}$),一周内测定总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总有机碳(DOC)、溶解性总无机碳(DIC)等.

1.3 理化指标测定

用YSI Proplus多参数水质分析仪(美国YSI公司)现场测定常规指标. NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、 $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ 、TP采用HACH水质分析方法,水样经HACH配套试剂处理后由DR5000紫外可见分光光度计(美国HACH公司)测定. DOC和DIC采用 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径的玻璃纤维滤纸过滤后由总有机碳分析仪(Liqui TOC,德国Elementar公司)测定.

1.4 数据处理和统计分析

采用SAS System for Windows 9.2软件进行. 方

差分析采用 ANOVA 过程, 多重比较采用新复极差法 (Duncan's 法). 回归分析采用 REG 过程, 自变量取值 (dummy values) 根据直观分析法 (visual analysis) 结果进行重新设定, 分别为: 根孔构筑方式 (R): 1-两层, 2-均匀分布; 植物组合 (P): 1-灯心草 + 香蒲, 2-芦苇 + 菖; 强化介质 (M): 1-根孔, 2-砾石, 3-沸石, 4-方解石. 选取最优模型的方法为 STEPWISE 和 RSQUARE, 选取自变量和保留自变量的控制水平为系统默认水平 $\alpha = 0.15$. 其余统计分析过程见文中注释. 采用 OriginPro 8.5 绘图. 除非特别说明, 所有统计学显著水平指 $\alpha = 0.05$.

2 结果与分析

2.1 石臼漾湿地大工程区水质净化效果

浙江省城市供水水质监测网嘉兴监测站、石臼漾水厂监测 (2009 年 1 月 ~ 2010 年 7 月) 显示: 源水经湿地净化后出水 DO 质量浓度有较大幅度提高 (图 3), 年均提高率达到 108.3%, 暖季 (163.0%) 显著高于冷季 (58.2%). 湿地对源水中营养盐有明显去除 (图 4). 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 年均去除率为 39.5%, 暖季高达 57.0%. 对 TP、TN 年均去除率分别为 21.6%、17.2%, 暖季分别为 30% ~ 36% 和 20% ~ 30%. 整体来讲, 石臼漾湿地在冷季净化效率较低.

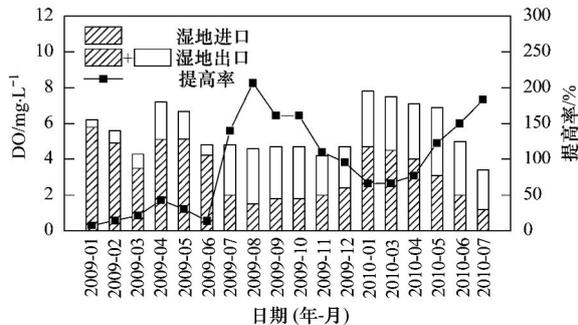


图 3 石臼漾湿地大工程区水体 DO 变化

Fig. 3 Dissolved oxygen variations in the whole wetland area of SJY-CW

石臼漾湿地对源水浊度年均去除率为 26.2% (图 4). 由于源水浊度较高 (年均 38.6 NTU), 加上石臼漾水厂源水需求量较大, 目前水量主要流经大渠而绕过了植物床-沟壕系统, 因此出水浊度偏高. 湿地对浊度的改善能力与对营养物质的去除规律恰好相反, 冷季去除率 (39.1%) 明显优于暖季 (12.0%). 这可能是因为水厂在冷季对源水需求量变小 ($16 \sim 20 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$), 湿地以半自流模式运行, 水力停留时间相应延长. 目前湿地去除有机物能力相对有限, 季节趋势不明显. 进水高锰酸盐指数维持在 4

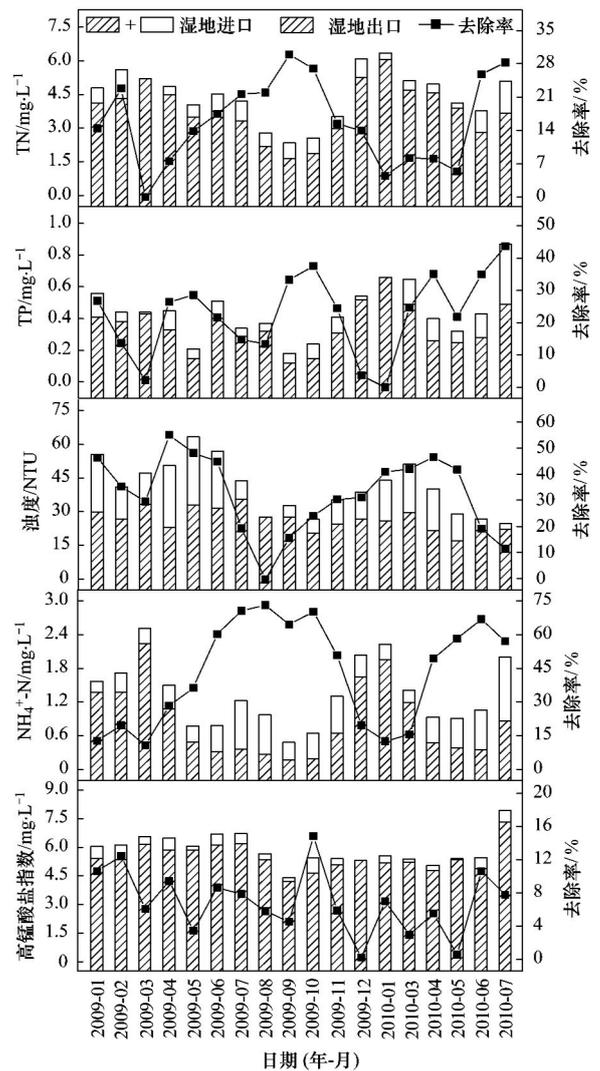


图 4 石臼漾湿地大工程区水质净化效果

Fig. 4 Water treatment efficiency in the whole wetland area of SJY-CW

$\sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 湿地平均去除率为 5.51%.

2.2 中试强化区的脱氮除磷效果

中试强化区 16 个植物床进水小沟 TN 均值为 $4.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水小沟为 $2.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 53.5% (图 5). 其中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率显著高于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (TTEST 过程, $P < 0.0001$), 分别为 70.8% 和 38.2%. 表明经过植物床-沟壕系统作用, 氮素去除以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主. 与前期在白洋淀芦苇型水陆交错带所发现规律相符^[4,9]. 就介质而言, 方解石、沸石之间除氮效果差异不显著 (TTEST 过程, $P = 0.3394$), 而沸石则明显优于砾石 (TTEST 过程, $P = 0.0351$).

植物床对水体 TP 平均去除率可达 40.0%, 但对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 削减作用有限 (图 6). 不同介质对磷去除

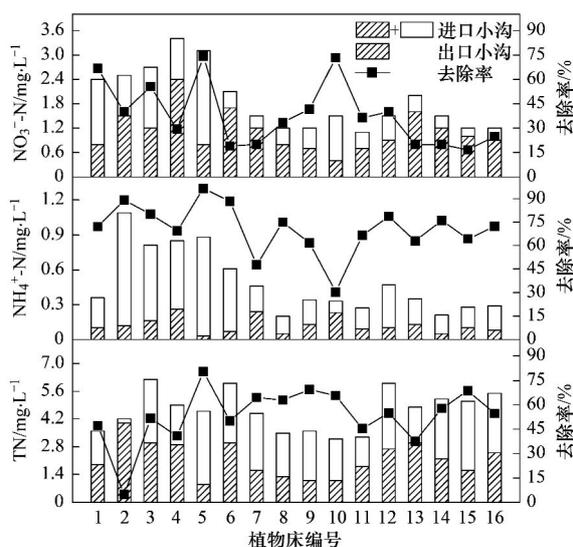


图 5 中试强化区水体 N 变化

Fig. 5 Nitrogen variations in the pilot experimental area

无显著差异。根据王为东^[10]对白洋淀湿地中淀水(沟水)、苇地潜水磷的研究发现,经过植物床-沟壕系统净化, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP 质量浓度均急剧下降。本研究部分植物床出水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度有所增加, 其占 TP 比值亦从 26.3% 上升至 43.4%。

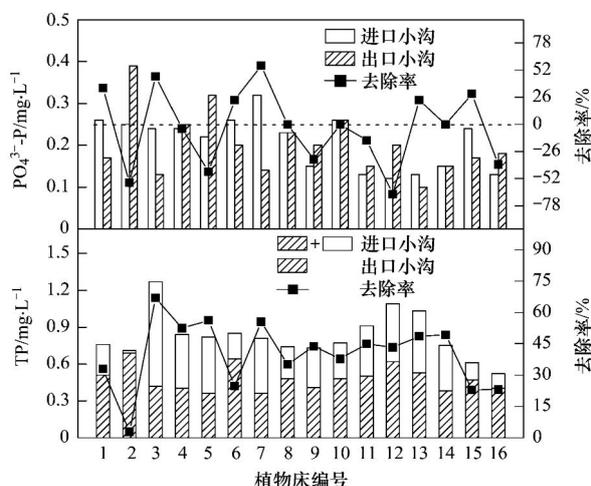


图 6 中试强化区水体 P 变化

Fig. 6 Phosphorus variations in the pilot experimental area

2.3 中试强化区水体碳变化

植物床两侧小沟中溶解性总碳(DTC)质量浓度基本平衡,但其形态组成(DOC、DIC)不同(图7)。从植物床的进水侧至出水侧,DOC 下降明显,平均去除率达到 54.9%,而 DIC 则增加了 35.1%。由于 DIC 增加量小于 DOC 减少量,植物床出水中 DTC 略有下降,整体去除率为 4.49%。

2.4 中试强化区正交试验设计因素分析

正交试验设计方法特别适合于解决多因素试验

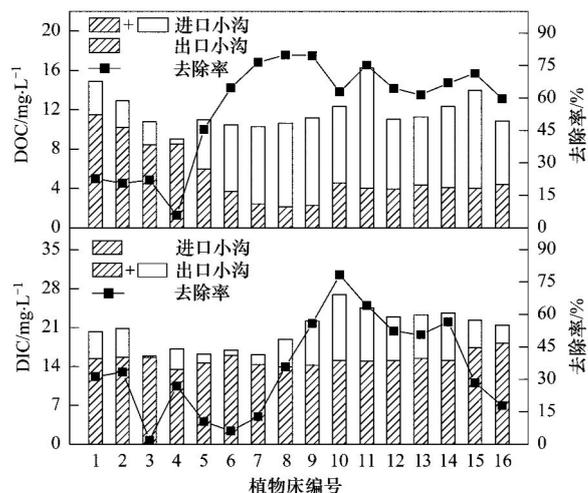


图 7 中试强化区水体 C 变化

Fig. 7 Carbon variations in the pilot experimental area

问题。本研究采用正交试验设计(表1)探索3个关键因素对植物床-沟壕系统的净水强化效果。方差分析显示对 DIC 去除影响最显著的因素是植物组合($P=0.0068$),其次是强化介质($P=0.0307$),而根孔构筑方式无显著影响($P=0.9295$)。回归分析显示植物组合、强化介质对 DIC 去除的解释率分别为 33.03% 和 17.24%。植物床出水中 DIC 增加应是由于植物根部释放所致,而与人工构筑根孔材料分解关系不大。对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除影响较为显著的因素是根孔构筑方式($P=0.0619$),其次是强化介质($P=0.0989$),而植物组合无显著影响($P=0.7289$)。回归分析表明根孔构筑方式解释 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率的 19.39%。对化学需氧量(COD)去除影响较为显著的是植物组合($P=0.0643$),而根孔构筑方式、强化介质影响不大($P=0.6914$, $P=0.5172$)。回归分析表明植物组合解释 COD 去除率的 25.56%。人工湿地对各种物质去除过程的机制是复杂的,在人工湿地净化效果评估时,需综合考虑各种因素才能得出相对稳妥的评价结论。

本研究的正交设计试验结果能否得出各种强化处理因素的较优水平?除两层分布的根孔构筑方式对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除(出水去除 1.2%)优于均匀分布(出水增加 7.2%),对 DIC、DOC 去除两种方式差异不大外,对 DTC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP、COD 去除均是三层分布优于两层分布。除灯心草+香蒲植物组合对 DOC 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除较优,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 去除两种组合差异不大外,对 DIC、DTC、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、COD 去除均是芦苇+菖蒲组合较好。砾石强化介质对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果较好,沸石对

DIC、 NH_4^+ -N去除效果较好,方解石对 DOC、DTC、TN、TP 以及 COD 去除率较高,而根孔介质本身对各指标去除效果均低于强化介质. 进一步对净水效果最好的 25% (3/4 分位数以上) 单元格中各处理因素相应水平出现频数统计结果如下. 根孔构筑方式的水平 1 (两层分布) 出现 17 次,水平 2 (均匀分布) 出现 19 次,水平间差异不大; 植物组合的水平 1 (芦苇 + 菰) 出现 24 次,水平 2 (灯心草 + 香蒲) 出现 12 次,水平间差异较大; 强化介质的水平 1 (砾石) 出现 7 次,水平 2 (沸石) 出现 12 次,水平 3 (方解石) 出现 14 次,水平 4 (根孔介质本身) 出现 3 次,水平间差异较大,水平 2、水平 3 为最优的两个水平,二者差异相对较小. 总体而言,根孔构筑方式是三层分布略优于两层分布; 植物组合是芦苇 + 菰明显占优; 强化介质是方解石有较强提升效果,沸石略有效果,而砾石在本研究中则几乎无强化效果.

3 讨论

3.1 植物床-沟壕系统中水体磷的变化

河流、湖泊的岸边带以及湿地交错带对磷的去除主要依靠基质吸附、沉淀和植物吸收^[11,12]. 植被斑块、河流沟渠、塘组成多水塘“汇”景观结构对养分物质有较强的截留作用^[13],尤其是对颗粒态磷的削减作用最为明显^[14]. 石臼漾湿地的植物床-沟壕系统呈现较好除磷能力,且随水温升高而增强,这与李静等^[15]在白洋淀的研究结果相吻合. 中试强化区采取了强化措施,虽然采样时间处于水温偏低的 3 月,但对 TP 平均去除率为 40.0%,高于石臼漾湿地年均水平 34.9%. 因此,石臼漾湿地具有进一步提升除磷水平的潜力.

人工湿地填料介质的净水性能得到广泛研究. 沸石对氨氮去除率较高^[16],对磷的去除有限^[17]; 砾石对磷酸盐的吸附去除效果较差,且解吸率较高^[18]; 方解石对磷酸盐有一定的去除作用^[19]. 本研究结果显示添加强化介质后各试验单元对水体 TP 和 PO_4^{3-} -P 的去除效率无显著差异.

中试强化区部分单元格出水 PO_4^{3-} -P 质量浓度增加,且在 TP 中比重增大. 石臼漾湿地植物床内部以人为构筑的根孔系统作为介质. 李静等^[15]研究发现自然湿地根孔系统具有较强的除磷能力; 而人工湿地在建成初期埋植秸秆腐烂分解过程中会向周围土壤释放磷素; 在微生物的作用下,部分有机磷亦会转化为可溶解态的无机磷,随着植物床亚表层水流迁移至出水小沟. 这可能是试验单元格对

PO_4^{3-} -P 去除率偏低的原因. 由于数据有限,深入的机制还需要对水体磷形态分布进一步分析研究.

3.2 植物床-沟壕系统中水体碳和氮的变化

人工湿地微生物在有机物的去除转化过程中发挥着重要作用,其中湿地根区是土壤酶和微生物进行物质迁移转化的活跃区^[20,21]. 在植物床-沟壕系统的根孔区作用下,湿地出水 DOC 下降明显,平均去除率达到 50% 以上,但对五日生化需氧量 (BOD_5) 和 COD 的去除作用有限. BOD_5/COD 反映污水可生化降解性,通常以 $\text{BOD}_5/\text{COD} = 0.3$ 为污水可生化降解的下限. COD 反映水体受还原性物质污染的程度,DOC 表征水体受溶解性有机物质污染的程度^[22]. 石臼漾湿地源水属于有机微污染水体,进水 BOD_5 、COD 质量浓度分别为 $4 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 结合湿地对 BOD_5 、COD 的去除率,笔者推测湿地上游来水中混有一部分工业废水,致使水体的生物可降解性能不高.

湿地出水 DIC 显著增加. 水中 DIC 主要以 CO_2 、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 这 4 种形式存在,受到光合作用或呼吸作用、水-气界面的 CO_2 逸散、碳酸盐类矿物的沉降等因素的影响,是影响沉水植物生长、繁殖以及沉水植物优势种形成的一个重要因子^[23]. 中试强化区出水 DIC 增加可能与土壤的生物呼吸作用有关. 由于生物呼吸作用,土壤中 CO_2 浓度可能至少是大气中 CO_2 浓度的几百倍^[24]. 针对石臼漾湿地植物床内根孔周围土壤物质分布状况的研究发现^[16],植物床内部以中度还原条件为主. 土壤中厌氧微生物代谢过程、植物根系呼吸作用释放产物都可能使得植物床内 CO_2 浓度升高,在水流作用下进入出水小沟导致 DIC 上升明显.

湿地系统对 NH_4^+ -N 去除主要是依靠硝化作用、厌氧氨氧化作用和基质等的吸附作用. 对中试强化区 52 个样点各形态碳、氮进行相关分析,结果显示:水中 NH_4^+ -N 与 DOC、DIC 均呈显著正相关,其中与 DOC 呈极显著正相关 ($r = 0.448$, $P = 0.001$). DOC 浓度高低对厌氧氨氧化反应和硝化反应存在很大影响^[26]. 厌氧氨氧化细菌和硝化细菌均是自养微生物,以 NH_4^+ -N 为底物,在碳源较充足条件下,与异养微生物的竞争处于相对弱势,这也可能是水体中 NH_4^+ -N 和 DOC 正相关的主要原因. 本研究中植物床-沟壕系统对 NH_4^+ -N 有较高的去除率,达到 70.8%. 水中大部分 NH_4^+ -N 通过硝化作用转化为 NO_3^- -N,然而出水小沟 NO_3^- -N 并未显著增加,反而具有较大程度降低,平均去除率为 38.2%,这可能与

湿地中同时存在的反硝化作用或者厌氧氨氧化作用有关. 相关分析显示: $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 DOC、DIC 均呈负相关. 由于反硝化细菌是异养微生物, 在碳源充足的条件下, 反硝化过程的顺利进行会使出水水体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的质量浓度降低.

3.3 人工湿地植物床-沟壕系统的优化途径

自然界广泛存在的植物床-沟壕系统在水位波动形势下会表现出强烈的边界过滤效应 (boundary filtration effect), 对于发挥水陆交错带的过滤截留作用、保护内陆水体水质具有着重要生态学意义^[5]. 石臼漾湿地以仿拟自然界的植物床-沟壕系统作为主要结构单元, 占有功能区总面积的 55% 左右, 对整个湿地的水质净化发挥了重要作用.

本研究所报道的植物床-沟壕系统其特色在于采用了人工湿地生态根孔技术^[27], 通过构筑根孔和自然根孔之间的过渡以及湿地根孔的不断更新, 实现湿地填料/介质的自我更新, 克服了一般潜流人工湿地其填料/介质易发生堵塞的缺点. 该技术应用成本较低. 本研究探索了植物床-沟壕系统的优化途径. ①根孔构筑方式. 符合自然湿地植物根孔空间分布规律和常理推断, 均匀分布秸秆填埋方式其水质净化效果略优于两层分布 (2.4 节). 综合考虑人工湿地建设时的施工难易、控制精度以及经济成本, 推荐在满足秸秆填埋数量的前提下, 优先采用两层 (间距 20 ~ 30 cm) 秸秆填埋方式. ②植物组合. 中试强化区植物芦苇 (*Phragmites australis*)、香蒲 (*Typha orientalis*)、菰 (*Zizania caduciflora*)、灯心草 (*Juncus effusus*) 均为人工湿地常见种, 并进行了合理搭配. 试验结果显示宜优选芦苇 + 菰这一组合. ③强化介质. 沸石、方解石这 2 种介质在运行初期强化效果较好, 以方解石更优, 而砾石强化效果较弱. 在中试工程建设时期 (2010 年 5 ~ 10 月), 砾石、沸石、方解石的市价 (含运输费和人工费) 分别为 156、290、236 元·t⁻¹. 显然, 在植物床-沟壕系统中引入强化介质会大大增加人工湿地的工程建设成本. 同时, 考虑到这些强化介质在运行一段时间后就会发生不同程度的堵塞, 反冲洗或更换介质等维护措施亦较为麻烦并进一步增加成本. 综合而言, 推荐在植物床-沟壕系统的大规模推广应用过程中于植物床局部采用适量方解石作为强化手段.

3.4 石臼漾湿地的水质净化能力

中试强化试验研究时间段虽然处于冷季, 但对各种营养物质去除率仍高于石臼漾湿地的年均水平. 与石臼漾湿地大工程区相比, 中试强化区对总

氮、总磷、氨氮等水质指标去除率提高幅度约为 20% ~ 40%. 为满足石臼漾水厂的供水要求, 目前有 70% 左右的水流是从大渠中直接通过, 使得湿地的水力停留时间总体不高. Ayaz^[28]、Tunçsiper 等^[29]均发现水力停留时间和污染负荷是影响湿地污染物去除效率的首要因素. 因此, 在满足水厂供水的前提下, 可以通过一些工程措施对石臼漾湿地的水文路径进行适当调控. 例如, 调整砾石半堵头 (卡口) 的束口宽度, 增设或调整半堵头底部的叠梁门结构, 在大渠进入根孔区前端增设砾石半堵头结构等, 从而重新分配植物床-沟壕系统中大渠的过水量, 实现增加植物床-沟壕系统内根孔区过流量的目的, 发挥湿地最大的水质净化功能.

4 结论

(1) 植物床-沟壕系统应用于水源保护工程可以发挥较强的水质净化功能, 随温度、水力停留时间增大其水质净化效果明显提高.

(2) 综合考虑水质净化效果、工程建设难易程度、建设及运行维护成本, 推荐人工湿地植物床-沟壕系统的优化途径为根孔构筑方式采用上、下两层秸秆填埋方式, 植物组合优选芦苇 + 菰, 在植物床局部采用适量方解石作为强化手段.

(3) 石臼漾湿地大工程区的整体净水效率低于中试工程强化试验区, 因此, 在满足水厂供水量的前提下, 可以通过控制大渠过水量、增加根孔区的过流量来提高湿地对营养物质的去除效率, 从而发挥湿地最大的净化效果.

参考文献:

- [1] Naiman R J, Décamps H. The ecology of interfaces: riparian zones[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1997, **28** (1): 621-658.
- [2] Fennessy M S, Cronk J K. The effectiveness and restoration potential of riparian ecotones for the management of nonpoint source pollution, particularly nitrate [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1997, **27** (4): 285-317.
- [3] Cózar A, Bergamino N, Mazzuoli S, et al. Relationships between wetland ecotones and inshore water quality in the Ugandan coast of Lake Victoria[J]. Wetlands Ecology and Management, 2007, **15**(6): 499-507.
- [4] Wang W D, Wang D L, Yin C Q. A field study on the hydrochemistry of land/inland water ecotones with reed domination[J]. Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, 2002, **30** (2-3): 117-127.
- [5] Wang W D, Yin C Q. The boundary filtration effect of reed-dominated ecotones under water level fluctuations[J]. Wetlands

- Ecology and Management, 2008, **16**(1): 65-76.
- [6] 汪仲琼. 湿地植物床-沟壕系统中水动力和物质迁移效应研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2011. 1-13.
- [7] 尹澄清, 苏胜利, 张荣斌, 等. 以河网作为城市水源的污染问题和湿地净化[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(8): 1583-1586.
- [8] 汪仲琼, 王为东, 祝贵兵, 等. 人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较[J]. 生态学报, 2011, **31**(16): 4489-4498.
- [9] Zhu G B, Jetten M S M, Kusch P, *et al.* Potential roles of anaerobic ammonium and methane oxidation in the nitrogen cycle of wetland ecosystems [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **86**(4): 1043-1055.
- [10] 王为东. 芦苇型水陆交错带中根孔结构及其影响下的水化学研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2002. 67-72.
- [11] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, *et al.* Phosphorus retention in streams and wetlands: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1999, **29**(1): 83-146.
- [12] Smil V. Phosphorus in the environment; natural flows and human interferences [J]. Annual Review of Energy and the Environment, 2000, **25**(1): 53-88.
- [13] Fu Q, Yin C Q, Ma Y. Phosphorus removal by the multipond system sediments receiving agricultural drainage in a headstream watershed[J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, **17**(3): 404-408.
- [14] Zhang H, Shan B Q. Historical distribution and partitioning of phosphorus in sediments in an agricultural watershed in the Yangtze-Huaihe region, China[J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(7): 2328-2333.
- [15] 李静, 尹澄清, 王为东, 等. 芦苇湿地根孔系统特征及其磷去除机理研究[J]. 湿地科学, 2009, **7**(3): 273-279.
- [16] Yalcuk A, Ugurlu A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(9): 2521-2526.
- [17] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 51-55.
- [18] 贺凯, 卢少勇, 金相灿, 等. 五种填料对磷酸盐的等温吸附-解吸特性[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(8): 232-235.
- [19] 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 方解石去除水中磷酸盐的影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(15): 67-70.
- [20] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Biotechnology Advances, 2003, **22**(1-2): 93-117.
- [21] Choi J H, Kang H, Park S S. Comparison of enzyme activities in vegetated and nonvegetated sediments [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, **135**(5): 299-305.
- [22] 王海英, 唐邈, 方普杰. 地表水 TOC 和 COD_{Mn} 相关关系研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2010, **27**(2): 93-96.
- [23] USEPA. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: a technology assessment [M]. Washington DC. : United States Environmental Protection Agency, 1993.
- [24] Stumm W, Morgan J J. Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters (2nd ed.) [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. , 1981.
- [25] 汪仲琼, 王为东, 郑军, 等. 人工湿地构筑根孔作用下土壤物质分布状况[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(1): 146-152.
- [26] Molinuevo B, García M C, Karakashev D, *et al.* Anammox for ammonia removal from pig manure effluents; effect of organic matter content on process performance [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(7): 2171-2175.
- [27] 王为东, 汪仲琼, 李静, 等. 人工湿地生态根孔技术及其应用[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 43-50.
- [28] Ayaz S Ç. Post-treatment and reuse of tertiary treated wastewater by constructed wetlands[J]. Desalination, 2008, **226**(1-3): 249-255.
- [29] Tunçsiper B, Ayaz S, Akça L, *et al.* Performance of a pilot-scale, three-stage constructed wetland system for domestic wastewater treatment[J]. Environmental Technology, 2009, **30**(11): 1187-1194.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4-n-Nonylphenol in Soil	JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU-Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloroalkane and Chloroalkene	WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed	DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Marteella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人