

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 NO ₂ 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)
云阳宗海库的分布与来源	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/TiO ₂ 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-好氧联合型生物反应器埋地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桫欏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 <i>Ochrobactrum</i> 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 <i>nirS</i> 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素研究	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, 孙永裕 (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 NH ₃ 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, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	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	熊剑峰, 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)	

人工湿地处理含盐生活污水的特性研究

高峰^{1,2}, 杨朝晖^{1,3}, 李晨², 金卫红², 邓一兵²

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 浙江海洋学院海洋科学学院, 舟山 316004; 3. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要: 将人工湿地应用于含盐生活污水处理, 在 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 等不同进水 NaCl 盐度水平下, 研究了进水盐度对人工湿地运行效果及基质微生物数量和酶活性的影响, 结果表明, 当进水盐度在 1.5% 及以下时, 人工湿地运行受盐度的影响较小, 对 COD 的去除率保持在 68.3% 以上, 对 NH_4^+ -N 的去除率保持在 66.1% 以上. 当进水盐度达到 2.0%, 人工湿地基质中细菌、真菌、放线菌和硝化细菌的数量明显减少, 基质脲酶、纤维素酶活性也相应下降, 导致人工湿地对污染物的去除率也随之下降, 其中 COD 去除率降低至 52.9%, NH_4^+ -N 去除率降低至 50.3%. 实验进一步研究了在 1.5% 进水盐度下人工湿地的水力条件对净化效果的影响. 结果表明, 相对于有机物, 氮的去除受 HRT 的影响更大, 当人工湿地的 HRT 由 3~5 d 降低至 2 d 时, NH_4^+ -N 的去除率从 65.1%~78.2% 降至 47.1%.

关键词: 人工湿地; 含盐污水; 微生物数量; 基质酶活性; 水力停留时间

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)11-3820-06

Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland

GAO Feng^{1,2}, YANG Zhao-hui^{1,3}, LI Chen², JIN Wei-hong², DENG Yi-bing²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Marine Science, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China; 3. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: A series of experiments were conducted to evaluate the feasibility of using constructed wetland (CW) to remove pollutants from saline domestic sewage. The experimental results indicated that the effects of salinity on the contaminant removal were insignificant when the influent salinities of the CWs were less than or equal to 1.5%. For the influent salinity of 0%, 0.5%, 1.0% and 1.5%, the average removal rates of the CWs were found to be above 68.3% for COD and above 66.1% for NH_4^+ -N. When the influent salinity was increased to 2.0%, the individual numbers of microorganisms in the CW reduced obviously. It was similar to the change of the soil enzyme activity in the CW. Then the removal efficiency of the CW also dropped significantly. The average removal rate of COD and NH_4^+ -N dropped to 52.9% and 50.3%, respectively. The effects of HRT on the treatment performance of CW under the saline condition of 1.5% were also investigated in this study. And the results showed that nitrogen removal was more greatly affected by HRT than organic matter removal. The NH_4^+ -N removal efficiency in CW decreased from 65.1%-78.2% to 47.1% when the HRT of the CW varied from 3-5 d to 2 d.

Key words: constructed wetland; saline wastewater; microbial quantity; enzymatic activity; HRT

将海水直接利用用于城市生活用水、工业冷却水、工业生产用水等方面是解决沿海地区淡水资源紧缺局面的有效途径, 而随之产生的含盐生活污水的处理成为了亟待解决的技术难题. 目前该方面的研究主要集中于活性污泥法^[1~5]. 人工湿地运用于污水生物处理兼具环境效益和生态效益, 具有建设和运行费用低的特点. 并且在处理过程中兼具物理、生物、化学等多种反应途径, 对有机物及氮、磷等污染物均有较好的去除效果, 具有较广泛的适用性^[6~10]. 目前已广泛应用于城市生活污水、工业废水、水产养殖废水、垃圾渗滤液、矿山废水等的处理^[11~17]. 但目前将人工湿地应用于含盐污水处理

的研究则还处于起步阶段^[15,18].

通常溶解于水中的盐分对于微生物的生理功能都有一定的影响, 在人工湿地中也是如此. 然而盐度对于人工湿地污水处理的抑制特性及其微生物机制等目前仍然不清楚, 本实验围绕上述问题展开研究. 另外, 为了将人工湿地较好地应用于含盐污水的生物处理, 对于其运行特性受水力条件等的影响也进行了研究. 除了含盐污水处理以外, 本实验的研究成果对于我国很多土壤盐碱化地区人工湿地技

收稿日期: 2012-01-11; **修订日期:** 2012-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908214)

作者简介: 高峰(1979~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: gf_hd@126.com

术的开发应用具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验所用人工湿地装置为 5 个小型实验级模拟装置,由 PVC 材料制成,每个人工湿地实验装置的大小均为 1.5 m(长)×1.0 m(宽)×0.5 m(深),底部填充 5 cm 厚的卵石层(直径 50~100 mm),中间为 20 cm 的砾石层(直径 10~30 mm),最上部铺设 10 cm 的土壤基质层(由本地土壤、细沙和煤灰组成)。人工湿地基质上种植耐盐性能较好的湿地植物芦苇^[18]。种植密度为 15 株·m⁻²。

1.2 进水水质及运行方式

实验所用含盐污水由向学生宿舍区污水中加入不同比例的海盐配制而成,污水水质见表 1。实验中所提及的盐度均是指 NaCl 盐度,单位以 NaCl 的质量分数(%)表示。人工湿地采用间歇进水方式运行,每天进水 10 h,实验用水由恒流泵引入装置的进水区,经另一端距装置底部 30 cm 的出水口排出,污水在人工湿地中呈潜流向前流动,有效水深为 30 cm。

表 1 污水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Characteristics of the wastewater/mg·L ⁻¹			
水质指标	平均值±标准差	水质指标	平均值±标准差
COD	195.4±47.1	TKN	24.4±4.8
NH ₄ ⁺ -N	23.3±5.6	SS	164.7±30.5
TN	25.2±5.3	pH	7.52±0.58
TP	2.5±1.1		

1.3 实验步骤

实验首先研究进水盐度对人工湿地净化效果及基质微生物数量和酶活性的影响。实验过程中,设置 5 个相同的人工湿地实验装置(W1~W5),进水盐度分别控制为 0%、0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%。进水负荷统一为 0.1 m³·(m²·d)⁻¹。经过约 1 个月时间的适应性培养,人工湿地处理效果逐渐稳定,此时定期分析测试人工湿地进出水水质,同时完成人工湿地基质微生物数量和酶活性的测定。

通过上述实验,确定了人工湿地能够耐受的进水盐度,对处理该盐度污水的人工湿地装置进行进一步的研究。具体措施为,通过阶段提高每日进水量,研究水力停留时间、进水负荷等操作参数对于人工湿地净化效果的影响。在每个阶段运行 2~3 周后进入稳定状态,之后定期监测进出水水质进行研究。

1.4 分析测试方法

1.4.1 水质指标的测定

实验中水质指标的测定均按国家标准方法进行^[19],由于盐度的干扰,污水中 COD 的测定采用高锰酸钾法。

1.4.2 基质脲酶和基质磷酸酶活性测定

选择人工湿地实验装置对角线上的 5 个代表性位点,在植物根区附近取样,然后将样品充分混合,取 10 g 土壤测定基质微生物数量,其中植物根区细菌、真菌、放线菌计数采用平皿培养法(混菌法),硝化细菌的计数采用最大可能数法(MPN)。具体方法参照文献[20]。其余土壤基质样本用于测定酶活性,经冷冻干燥,并通过 1.0 mm 网眼的筛子以去除植物断根和沙石,在测试前保存于 4℃ 的冰箱中。测试方法参照文献[21]。土壤基质脲酶活性(以 NH₄⁺-N 计)用 μg·(g·24 h)⁻¹ 表示,土壤基质纤维素酶活性(以葡萄糖计)用 μg·(g·72 h)⁻¹ 表示。

1.5 数据处理

采用 SPSS 16.0 统计软件计算各指标的平均值和标准差。

2 结果与讨论

2.1 盐度影响下各人工湿地的净化效果

人工湿地实验装置(W1~W5)在稳定运行阶段对有机物、氮、磷、SS 等污染物的去除效果见表 2。

2.1.1 有机物及氮的去除

对比表 2 中几个人工湿地装置的实验数据可知,当人工湿地的进水盐度在 1.5% 及以下时,其对有机物、SS 及氮的去除能力受盐度的影响较小。经过一段时间的盐度驯化,在稳定运行阶段 W2、W3、W4 对有机物及氮都取得了较好的去除效果,对 COD 的去除率在 68.3%~72.6% 之间,对 NH₄⁺-N 的去除率在 66.1%~71.4% 之间。这基本上与处理不含盐污水 W1 的净化效果相接近,其对 COD 的去除率为 74.2%,对 NH₄⁺-N 的去除率为 73.5%。人工湿地去除有机物和氮的主要途径为基质层微生物的作用,如异养型细菌通过同化和生物降解去除有机物,氮主要通过生物硝化及反硝化去除。结合上述实验现象进行分析,可以认为,在一定的进水盐度胁迫下,人工湿地中的异养细菌、硝化细菌等微生物能通过体内渗透调节等活动而耐受外界盐度对其的影响。另外,人工湿地基质床的填料为微生物提供了吸附生长的环境,减少了细菌在盐度抑制下由于凝聚性下降而造成的流失。从而实现了人工湿地在较

高盐度下的稳定运行.

对于进水盐度为 2.0% 的实验装置(W5),从表 2 中的实验数据可知,其处理效果受盐度的抑制作为较为明显,相比于其它实验装置,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等指标的去除率出现了明显的下降,其中 COD 去除率

降低至 52.9%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率降低至 50.3%. 这说明,人工湿地系统中微生物对盐度胁迫的耐盐能力也有一定的限度,其耐受进水盐度的限值在 1.5% 左右,当进水盐度达到 2.0% 时,人工湿地的净化效果显著降低.

表 2 盐度影响下各人工湿地对污染物的净化效果¹⁾

Table 2 Treatment performance of tested constructed wetlands with different influent salinity

项目	指标	实验装置(进水盐度)				
		W1 (0%)	W2 (0.5%)	W3 (1.0%)	W4 (1.5%)	W5 (2.0%)
COD	进水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	195.6 (20.5)	197.8 (22.4)	197.8 (22.4)	195.6 (20.5)	195.6 (20.5)
	出水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	49.3 (7.3)	54.1 (6.8)	56.7 (7.8)	61.4 (9.4)	91.2 (10.2)
	去除率/%	74.2 (2.8)	72.6 (2.2)	72.1 (3.0)	68.3 (3.1)	52.9 (2.7)
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	进水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	22.5 (3.1)	19.2 (3.4)	19.2 (3.4)	22.5 (3.1)	22.5 (3.1)
	出水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	5.6 (1.9)	6.4 (0.9)	5.0 (1.7)	7.2 (1.8)	11.3 (1.1)
	去除率/%	73.5 (4.1)	68.2 (3.4)	71.4 (3.6)	66.1 (3.2)	50.3 (3.3)
TN	进水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	25.3 (3.8)	23.1 (3.6)	23.1 (3.6)	25.3 (3.8)	25.3 (3.8)
	出水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	9.4 (1.3)	10.8 (1.1)	9.6 (1.6)	12.7 (1.4)	15.5 (1.7)
	去除率/%	61.9 (3.7)	55.4 (4.0)	57.3 (3.1)	51.4 (3.9)	38.9 (3.2)
SS	进水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	162.9 (22.3)	166.7 (19.8)	166.7 (19.8)	162.9 (22.3)	162.9 (22.3)
	出水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	36.9 (6.7)	43.7 (8.2)	52.6 (6.6)	65.4 (6.2)	78.8 (7.1)
	去除率/%	75.3 (4.2)	72.8 (2.8)	68.9 (2.4)	62.1 (3.0)	51.4 (2.9)
TP	进水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.6 (0.4)	2.3 (0.5)	2.3 (0.5)	2.6 (0.4)	2.6 (0.4)
	出水浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.5 (0.2)	1.3 (0.2)	1.2 (0.1)	1.5 (0.3)	1.5 (0.1)
	去除率/%	46.5 (1.4)	46.3 (1.8)	43.4 (1.2)	40.9 (2.0)	38.2 (0.9)

1) 表中数据为平均值(标准差), $n=20$

2.1.2 磷的去除

从表 2 中的实验数据可以看出,相对于有机物和氮,磷的去除受进水盐度的影响较小,处理不同盐度污水的 5 个人工湿地装置对 TP 的去除率在 38.2%~46.5% 之间. 人工湿地对于磷的去除包括植物吸磷、生物除磷、磷在基质中的吸附沉淀等过程. 虽然在进水盐度抑制下,植物及微生物的吸磷会受到一定程度的抑制,但是,由于人工湿地除磷的主要途径是通过使污水中的磷吸附于土壤基质并与土壤基质中的铁、铝、钙等金属离子形成磷酸盐的沉淀而除磷. 因此,进水盐度的升高只对人工湿地除磷造成部分影响,磷的去除率受进水盐度的影响较小.

2.2 盐度影响下的微生物及基质酶活性分析

在人工湿地处理过程中,大分子有机物被分解成小分子有机物及无机营养盐,这些过程被认为是由微生物及基质酶共同推动完成的^[22~25]. 为了探究盐度抑制下人工湿地处理效果发生变化的生物机制,本实验在研究人工湿地去污表现的同时,对不同进水盐度实验装置基质中的微生物种群及酶活性进行了分析研究(图 1、图 2). 结果表明,对于进水盐度为 0.5%、1.0% 及 1.5% 的实验装置(W2~

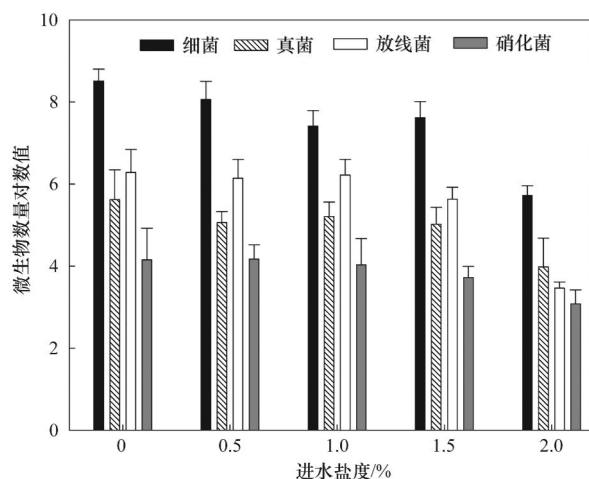


图 1 不同进水盐度实验装置内微生物数量的对数值($n=6$)

Fig. 1 Logarithm of the number of microorganisms in the units with different influent salinity ($n=6$)

W4),基质中细菌、真菌、放线菌、硝化细菌等微生物的数量没有表现出明显的差异,并且与处理进水盐度为 0% 的实验装置(W1)相比,下降的幅度也较小,表明对于这些实验装置,进水盐度在土壤微生物可承受的范围. 但对于进水盐度为 2.0% 的实验装置(W5),微生物的数量则出现了较为明显的下降. 说明在 2.0% 的高盐度环境下,人工湿地基质中

微生物受到了强烈的抑制,从而导致了其对有机物及氮去除能力的下降(表2)。

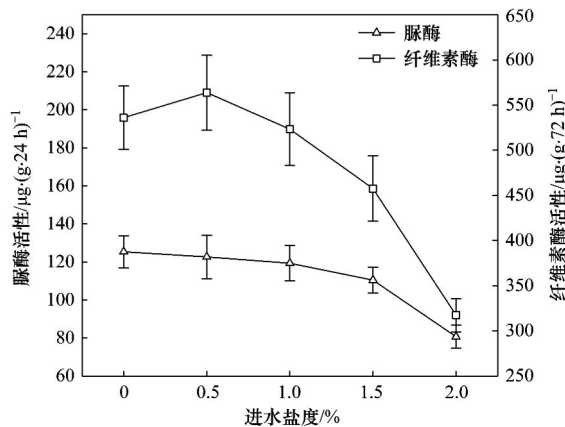


图2 不同进水盐度实验装置内的基质酶活性($n=6$)

Fig. 2 Substrate enzyme activities of the units with different influent salinity ($n=6$)

基质酶活性的变化与微生物较为一致(图2), 进水盐度较低的实验装置, 基质脲酶和纤维素酶的活性较高, 对于进水盐度为2.0%的实验装置, 基质脲酶和纤维素酶的活性出现了较为明显的下降. 人工湿地基质中的酶主要来源于各种微生物的生理活动, 并服务于微生物吸收、代谢营养物质等生理过程. 因此酶活性的高低是基质微生物数量与活力的综合反映. 其变化也进一步揭示了进水盐度影响人工湿地处理效果的生物机制.

2.3 水力条件对处理效果的影响

2.3.1 HRT 对处理效果的影响

通过以上的实验表明采用人工湿地方法处理一定含盐量的生活污水是可行的. 为了将其更好的应用于工程实际, 实现人工湿地的稳定高效运行, 本实验对进水盐度为1.5%的实验装置W4进行了进一步研究. 通过阶段增加每日进水水量的方法研究了水力停留时间(HRT)从5 d变化至2 d的操作条件下人工湿地的净化效果, 实验结果如表3所示.

由表3可见, 水力停留时间对人工湿地处理效果有较大的影响, 总体上人工湿地对有机物、SS及氮、磷的去除率随着水力停留时间的延长而增大, 较长的水力停留时间为生物降解、吸收、基质过滤等过程提供了更多的机会, 从而取得较好的处理效果. 从表中数据可以看出, 人工湿地的水力停留时间在3~5 d左右为宜. 当水力停留时间减小到2 d时, 则人工湿地对于有机物、SS及氮的去除效果明显下降. 其中氮去除率的下降最为明显, 推测其原因, 硝化细菌为自养型细菌, 其生长速率及代谢活性

均显著低于异养型细菌, 在较短的水力停留时间下, 硝化细菌难以完全发挥其硝化活性而导致了系统脱氮能力的下降.

2.3.2 COD 及 NH_4^+ -N 负荷对其去除速率的影响

由图3和图4可见, 当实验装置的HRT控制为3、4及5 d时, 人工湿地对COD及 NH_4^+ -N的去除速率与进水表面负荷之间存在显著的线性相关性, $R^2 > 0.92$, 表明在3~5 d HRT的水力条件下, 人工湿地对有机物及氨氮的去除率保持在稳定的状态. 此时人工湿地进水COD表面负荷为 $8.9 \sim 24.8 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 对COD的去除速率为 $6.2 \sim 15.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 进水 NH_4^+ -N表面负荷为 $1.08 \sim 2.43 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 对 NH_4^+ -N的去除速率为 $0.82 \sim 1.61 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

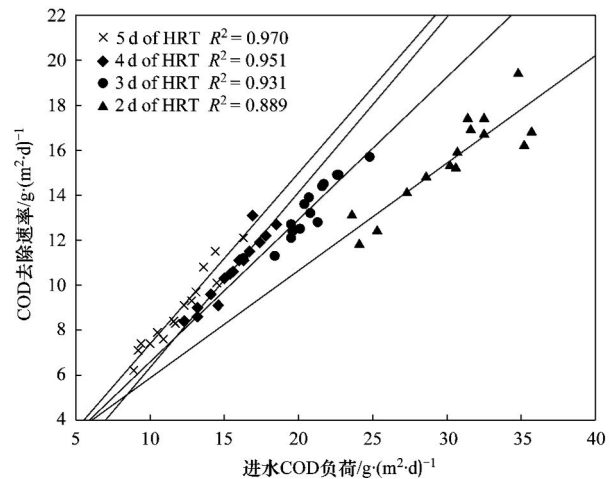


图3 COD去除速率随进水负荷的变化

Fig. 3 COD removal rate under different influent COD loads

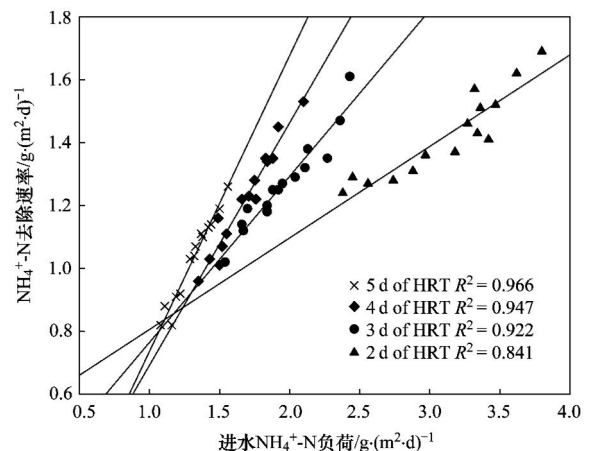


图4 NH_4^+ -N去除速率随进水负荷的变化

Fig. 4 NH_4^+ -N removal rate under different influent NH_4^+ -N loads

当实验装置的HRT减小为2 d时, 从图3和图4可以看出, 人工湿地对COD及 NH_4^+ -N的去

除速率与进水表面负荷之间的线性相关性明显下降,表明此时由于污水在人工湿地中停留时间过短,系统较难以维持稳定的处理状态.并且,从图3、图4可见,当实验装置HRT为2 d时,虽然此时人工湿地进水COD和 NH_4^+ -N负荷明显高于HRT为3~5 d时,但是系统对 NH_4^+ -N的去除率并没有相应地增加,最高值与HRT为3 d时相

当,仍然在 $1.6 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右.这是由于当水力停留时间从3 d缩短为2 d时,实验装置对 NH_4^+ -N的去除率出现了明显的下降所致(表3).表明在较短的水力停留时间下,系统中的硝化反应无法完全进行, NH_4^+ -N的去除速率因而受到了明显的限制,人工湿地无法充分发挥其处理能力.

表3 不同水力停留时间下人工湿地的处理效果¹⁾

Table 3 Treatment performance of constructed wetland under different HRT

项目	指标	水力停留时间(HRT)			
		2 d	3 d	4 d	5 d
COD	进水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	202.5 (20.8)	206.4 (14.5)	207.1 (19.3)	199.2 (29.7)
	出水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	95.0 (11.4)	72.1 (7.6)	64.9 (8.1)	51.5 (8.7)
	去除率/%	52.8 (1.9)	65.3 (2.5)	68.2 (2.5)	74.4 (2.7)
NH_4^+ -N	进水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	20.8 (2.9)	19.6 (2.7)	22.5 (2.8)	21.7 (2.4)
	出水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	10.7 (1.2)	6.6 (0.7)	6.1 (0.5)	4.7 (0.5)
	去除率/%	47.1 (3.3)	65.1 (2.6)	72.3 (2.5)	78.2 (2.6)
TN	进水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	31.7 (3.2)	26.1 (2.8)	28.9 (2.8)	25.3 (2.2)
	出水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	17.9 (1.6)	9.1 (1.2)	10.0 (0.8)	6.3 (0.5)
	去除率/%	43.6 (3.5)	62.8 (3.0)	65.3 (3.1)	72.4 (3.8)
SS	进水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	163.3 (18.6)	166.7 (15.3)	175.2 (16.7)	162.9 (18.1)
	出水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	91.6 (6.7)	78.7 (7.1)	64.1 (5.3)	50.7 (5.6)
	去除率/%	43.6 (3.7)	51.9 (4.1)	62.7 (3.4)	68.6 (3.7)
TP	进水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2.6 (0.4)	2.1 (0.5)	2.6 (0.5)	2.4 (0.3)
	出水浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.4 (0.2)	1.2 (0.2)	1.1 (0.1)	1.2 (0.2)
	去除率/%	40.5 (1.8)	41.6 (1.7)	53.7 (2.1)	48.2 (2.0)

1)表中数据为平均值(标准差), $n=15$

3 结论

(1)当进水盐度在1.5%及以下时,人工湿地对有机物及氮、磷的去除率较高;当盐度上升至2.0%,湿地对有机物及氮的去除率显著下降.

(2)在2.0%的高盐环境下,湿地基质微生物数量及活性受到抑制.

(3)进水HRT为3~5 d时,人工湿地对COD及 NH_4^+ -N的去除速率较好,HRT低至2 d时,人工湿地处理能力显著下降.

参考文献:

- [1] 崔有为,彭永臻,李晶.盐度抑制下的MUCT处理效能及其微生物种群变化[J].环境科学,2009,30(2):487-492.
- [2] 张雨山,王静,蒋立东,等.利用海水冲厕对城市污水处理的影响研究[J].中国给水排水,1999,15(9):4-6.
- [3] Vyrides I, Stuckey D C. Saline sewage treatment using a submerged anaerobic membrane reactor (SAMBR): effects of activated carbon addition and biogas-sparging time[J]. Water Research, 2009, 43(4): 933-942.
- [4] Ye L, Peng C Y, Tang B, et al. Determination effect of influent salinity and inhibition time on partial nitrification in a sequencing

batch reactor treating saline sewage[J]. Desalination, 2009, 246(1-3): 556-566.

- [5] Abou-Elela S I, Kamel M M, Fawzy M E. Biological treatment of saline wastewater using a salt-tolerant microorganism[J]. Desalination, 2010, 250(1): 1-5.
- [6] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(4): 545-560.
- [7] Xiong J B, Guo G L, Mahmood Q, et al. Nitrogen removal from secondary effluent by using integrated constructed wetland system[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(4): 659-662.
- [8] Maltais-Landry G, Maranger R, Brisson J, et al. Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands[J]. Water Research, 2009, 43(2): 535-545.
- [9] Pant H K, Reddy K R, Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2001, 17(4): 345-355.
- [10] Dunne E J, Culleton N, O'Donovan G, et al. Phosphorus retention and sorption by constructed wetland soils in Southeast Ireland[J]. Water Research, 2005, 39(18): 4355-4362.
- [11] 张金生,袁兴中,曾光明,等.外循环三相流化床-人工湿地系统处理渗滤液可行性研究[J].环境科学,2009,30(11):

- 3371-3376.
- [12] 杨长明, 马锐, 山城幸, 等. 组合人工湿地对城镇污水处理
厂尾水中有机物的去除特征研究[J]. 环境科学学报, 2010,
30(9): 1804-1810.
- [13] Yang Q, Tam N F Y, Wong Y S, *et al.* Potential use of
mangroves as constructed wetland for municipal sewage treatment
in Futian, Shenzhen, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*,
2008, **57**(6-12): 735-743.
- [14] Scholz M, Xu J. Performance comparison of experimental
constructed wetlands with different filter media and macrophytes
treating industrial wastewater contaminated with lead and copper
[J]. *Bioresource Technology*, 2002, **83**(2): 71-79.
- [15] Klomjek P, Nitorisavut S. Constructed treatment wetland: a
study of eight plant species under saline conditions [J].
Chemosphere, 2005, **58**(5): 585-593.
- [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] Mitsch W J, Wise K M. Water quality, fate of metals, and
predictive model validation of a constructed wetland treating acid
mine drainage [J]. *Water Research*, 1998, **32**(6): 1888-
1900.
- [18] 王静, 张雨山, 邱金泉, 等. 海水盐度对潜流人工湿地系统
净化效果的影响[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(5): 9-11.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四
版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 李阜棣, 喻子牛, 何绍红. 农业微生物学实验技术[M]. 北
京: 中国农业出版社, 1996. 69-89.
- [21] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农
业出版社, 1986. 269-290.
- [22] Shackle V J, Freeman C, Reynolds B. Carbon supply and the
regulation of enzyme activity in constructed wetlands [J]. *Soil
Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(13): 1935-1940.
- [23] Kong L, Wang Y B, Zhao L N, *et al.* Enzyme and root activities
in surface-flow constructed wetlands [J]. *Chemosphere*, 2009,
76(5): 601-608.
- [24] Truu M, Juhanson J, Truu J. Microbial biomass, activity and
community composition in constructed wetlands [J]. *Science of
the Total Environment*, 2009, **407**(13): 3958-3971.
- [25] 周巧红, 吴振斌, 付贵萍, 等. 人工湿地基质中酶活性和细
菌生理群的时空动态特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(2):
108-112.

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- <i>n</i> -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 Carbendazim 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 Chloralkane 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 Fujian 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>Martellella</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	全国各地邮电局	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