

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桤木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)	

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¹, 谢建平², 黄玉明^{1*}

(1. 西南大学化学化工学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

摘要: 众多研究表明, 潜流人工湿地对污水的处理效果明显高于自由表面流型湿地, 但实验研究表明潜流人工湿地因堵塞而逐渐演变为自由表面流人工湿地后, 其对有机物(COD、TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果优于具有相同填料及植物的潜流人工湿地。通过实验室培养实验, 以考察人工湿地演变对有机物的矿化、硝化/反硝化作用、氮及磷去除的影响。结果表明, 与潜流人工湿地相比, 演变后的自由表面流人工湿地对有机物的矿化率(以 TOC 表示)为 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$, 高于潜流湿地的 $1.49 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$; 对 NO_3^- 去除率为 96.8%, 高于潜流湿地的 58.1%; 非生物脱硝去除率为 40%, 高于潜流湿地的 28.2%; 演变后对磷的吸附量(以 P 计)为 $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于潜流湿地的 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对磷的去除主要为填料吸附, 有机物的覆盖有利于磷去除; 但演变后的自由表面流人工湿地的硝化作用能力低于潜流湿地。因此, 人工湿地演变对其效能有重要影响。

关键词: 潜流人工湿地; 自由表面流人工湿地; 人工湿地演变; 有机物矿化; 氮去除; 磷去除

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3812-08

Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphor in Wastewater

WEI Ze-jun¹, XIE Jian-ping², HUANG Yu-ming¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Many previous studies demonstrated that the performance of the subsurface constructed wetlands (SSCW) for wastewater treatment was superior to that of the free flow surface constructed wetlands (FFSCW). However, our results indicated that the performance of FFSCW derived from the evolution of SSCW due to clogging for COD, TOC, total nitrogen (TN), and total phosphor (TP) removal was higher than those of SSCW with the same substrate and plant. The laboratory culture experiments were adopted to evaluate the effect of the constructed wetland evolution on the organic matter mineralization, nitrification/denitrification as well as removal of nitrogen and phosphor. It was shown that, after evolution of SSCW into FFSCW, the mineralization rate for organic matter (as TOC) was $1.82 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$, and it was $1.49 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ for SSCW. The removal efficiency for NO_3^- was 96.8%, and it was 58.1% for SSCW. The abiotic denitrification removal efficiency was 40%, and it was 28.2% for SSCW. In addition, the maximum equilibrium adsorption capacity of the substrate after evolution for phosphor (as P) was $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and it was $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for SSCW substrate. The organic coverage of the substrate was found to be beneficial to phosphor removal. The nitrification ability decreased after evolution. These results suggest the important effect of constructed wetland evolution on its performance.

Key words: subsurface constructed wetland; free surface flow constructed wetland; constructed wetland evolution; mineralization of organic matter; nitrogen removal; phosphor removal

近年来, 人工湿地作为一种高效、低能耗、管理方便且环境友好型污水处理技术而受到广泛关注^[1~3], 已成功用于各种污水处理中^[4~7], 但是, 人工湿地长期运行中, 堵塞成为普遍现象^[8], 湿地中堵塞层的形成是由于废水中悬浮固体物在填料内部颗粒间隙的沉积、填料间隙内生物量生长和分解以及填料本身所含物质的化学沉淀反应等所致, 人工湿地堵塞后将严重影响其长期运行稳定性, 直接影响其对污染物的去除效果^[9]。另外, 堵塞将导致水流状态发生变化, 从而改变人工湿地的类型。目前,

有关人工湿地运行过程中的演变对有机化合物及营养素去除影响的研究还未见报道。

在前期工作中, 研究了人工湿地设计及运行参数对挥发性烷基硫化物去除的影响^[10], 随着湿地系统的长期运行, 加之 2009 年经两次暴雨冲刷后, 浅

收稿日期: 2011-11-29; 修订日期: 2012-05-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2008AA06Z312); 重庆市科技攻关重点项目(CSTC2009AB7028)

作者简介: 魏泽军(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术, E-mail: weizj51@swu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yuminghuang2000@yahoo.com

水位潜流湿地(D2)被大量沉积物覆盖而逐渐堵塞,使其演变为自由表面流湿地,其对有机物(COD、TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果优于具有相同填料及植物的潜流人工湿地,这与前人研究结果不符合^[11~13]。为此,本实验分析了湿地演变后对有机物及营养物去除的变化,通过培养实验研究了演变后两类人工湿地对有机物的矿化能力、硝化/反硝化能力(包括非生物脱硝)、除磷能力及演变后的湿地填料对氨氮、磷素的吸附能力的差异,探索人工湿地演变对有机化合物及营养素去除的影响,以期为人工湿地技术的优化提供指导。

1 材料与方法

1.1 人工湿地实验系统

实验系统建于重庆北碚西南大学校内,其构造简要叙述如下^[10]。整个污水处理系统占地约 150 m²,其中湿地部分 120 m²。日处理量约 40~80 m³·d⁻¹,整个系统由沉砂池、调节池、布水器以及湿地主体组成,其中湿地系统包括 8 个并联湿地单元,每个湿地单元所占面积为 15 m²。填料为砾石或者煤渣,填充方式为单一填料整块填充;植物为风

车草或者香蒲,前 6 块湿地水深为 0.7 m,后两块湿地水深为 0.5 m,填料粒径约 20 mm;各池底部构筑倾斜度为 1~2%的底坡,并做防渗处理。

污水经过沉砂池和酸化调节池流入布水器内,然后通过布水器的 8 个管道,以帘式进水方式均匀地流入 8 块湿地,最后通过 U 型管排出系统。本研究中涉及的对象为其中两块具有相同填料(煤渣)及植物(香蒲)的湿地,分别为 A1 和 D2。污水水源为学生宿舍生活污水。

1.2 水样及填料样品采集

每月采样 4 次,测定进水、湿地出水中各主要指标浓度变化。在 A1、D2 湿地的前、中及末端分别采集约 100 g 填料样品后混合均匀;A1 湿地为潜流湿地,填料样品采样点在距填料上表面约 5~15 cm 处的水位层;D2 因演变为自由表面流湿地其采样点在上表层,见图 1。采集过程中去除明显大粒径颗粒,填料周围间隙水一同采集,厌氧培养(反硝化)填料样采集后用孔隙水填满采样瓶不留顶空,送回实验室准备培养;采样过程动作尽量轻微以减少碰撞或冲洗而使填料表面生物膜脱落。

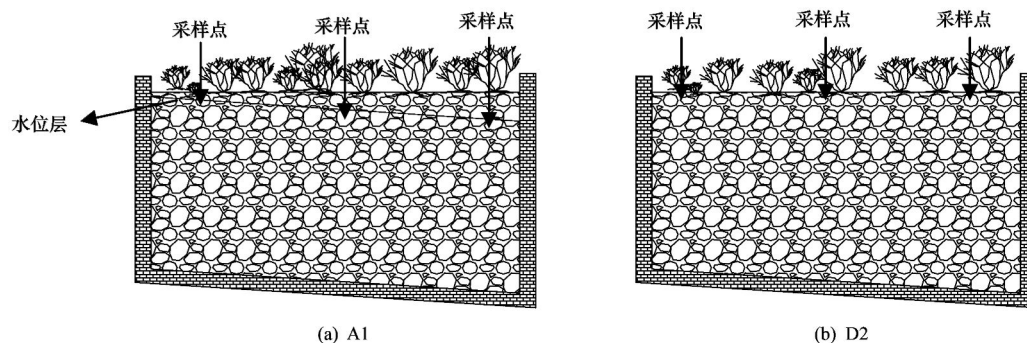


图 1 A1、D2 湿地填料样品采样点剖面示意

Fig. 1 Schematic diagram of substrate sampling sites in A1 and D2 wetland

1.3 实验方法

硝化作用实验方法^[14,15]:称取 50 g 填料加至 500 mL 锥形瓶中,加入 350 mL 配制污水 1。污水 1 组成为:MgSO₄ 10.80 mg·L⁻¹、FeCl₃ 1.63 mg·L⁻¹、CaCl₂ 25.53 mg·L⁻¹、KH₂PO₄ 0.025 g·L⁻¹、NaCl 0.051 g·L⁻¹、NH₄Cl 0.19 g·L⁻¹,于 20℃ 150 r·min⁻¹恒温摇床中培养,在培养过程中于不同时间点取样测定氨氮(AN)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)等变化情况,取样前静置 1 h 取上清液测定。硝化作用培养过程中为保证微生物正常活动,每隔 12 h 测定及调节 pH 值,每次调节 pH 值至 8.0 左右。

反硝化作用实验方法^[14,15]:称取 50 g 填料加至 500 mL 锥形瓶中,加入 350 mL 配制污水 2。污水 2 组成为:MgSO₄ 10.80 mg·L⁻¹、FeCl₃ 1.63 mg·L⁻¹、CaCl₂ 25.53 mg·L⁻¹、KH₂PO₄ 0.45 g·L⁻¹、KNO₃ 0.577 g·L⁻¹、NaCl 0.051 g·L⁻¹、葡萄糖 0.25 g·L⁻¹。通入 N₂ 直至氧化还原电位(ORP) < 0,密封,于 20℃ 150 r·min⁻¹恒温摇床中培养,测定初始及培养 7 d 后 NO₃⁻-N 变化。用相同方法采集填料样品后于高压锅内(压力 0.10~0.13 MPa 且温度为 120℃ 以上)灭菌 30 min 以上,于上述条件下培养,以考察非生物脱硝作用。

有机物矿化能力及磷去除实验方法:称取 50 g 填料加至 500 mL 锥形瓶中,加入 350 mL 配置污水 2,于 20℃ 150 r·min⁻¹ 恒温摇床中培养. 于不同时间取样测定 TOC 及 P 的浓度,取样前静置 1 h 取上清液测定;20 h 时磷浓度稳定之后氮吹 1 h(使 ORP 约为 -100 mV),密封后在第 1 d 及第 3 d 时取样测定磷含量,以考察微生物厌氧释磷情况.

填料吸附实验方法:称取 50 g 与硝化作用及除磷同批次的填料样品,在 50℃ 下烘 2 h,放置 1 周后用于填料吸附 AN 及磷的性能实验. AN 吸附实验方法:加入 350 mL 初始浓度为 50.9 mg·L⁻¹ AN 的配制污水 1,在 20℃ 150 r·min⁻¹ 恒温摇床中振荡,于不同时间点采样测定 AN 浓度变化;磷吸附实验方法:加入 350 mL 磷初始浓度为 14.4 mg·L⁻¹ 的溶液,其中含 MgSO₄ 10.80 mg·L⁻¹、FeCl₃ 1.63 mg·L⁻¹、CaCl₂ 25.53 mg·L⁻¹、KNO₃ 0.577 g·L⁻¹、NaCl 0.051 g·L⁻¹、葡萄糖 0.25 g·L⁻¹. 在 20℃ 150 r·min⁻¹ 恒温摇床中振荡,于不同时间点采样测定磷浓度变化. 每个样品做两个平行样,同时进行空白对照,空白对照样水样为超纯水.

A1、D2 湿地处理效果比较实验方法:通过调整湿地水力负荷进行实验,同一水力负荷下运行至少 7 d,水力负荷设计为 5、11、20、26 及 38 cm·d⁻¹;实验废水为学生宿舍生活污水,进口废水 pH 值在 6.77~7.86 之间,呈弱酸到略偏碱性,COD 浓度 130.8 mg·L⁻¹ ± 50.7 mg·L⁻¹ (变化范围:7.42~237.55 mg·L⁻¹),TOC 浓度 62.98 mg·L⁻¹ ± 31.0 mg·L⁻¹ (变化范围:0~128.5 mg·L⁻¹),AN 浓度 25.01 mg·L⁻¹ ± 9.75 mg·L⁻¹ (变化范围:5.11~41.28 mg·L⁻¹),TN 浓度 40.47 mg·L⁻¹ ± 13.40 mg·L⁻¹ (变化范围:7.61~61.42 mg·L⁻¹),TP 浓度 3.39 mg·L⁻¹ ± 1.21 mg·L⁻¹ (变化范围:0.49~5.79 mg·L⁻¹). 采用连续进水方式,分别在进口及湿地出口采集水样. 监测项目为 pH、COD、TOC、AN、TN 及 TP. 实验研究期间为 2010 年 3 月~2011 年 3 月连续进行 12 个月,每月采样 4 次,共采集水样 56 批. 其中,水力负荷 5 cm·d⁻¹ 进行 7 个批次实验,11 cm·d⁻¹ 进行 11 个批次实验,20 cm·d⁻¹ 进行 12 个批次实验,26 cm·d⁻¹ 进行 20 个批次实验,38 cm·d⁻¹ 进行 6 个批次实验. 水样采集后马上送回实验室进行测定. 其中,pH 用雷磁 PHS-3D 型 pH 计测定、ORP 用 HACH 公司 HQ20 LDO 仪测定、TOC 采用 HACH 公司 IL550 TOC-TN 测定,AN、TN、TP、COD 等均采用国标方法进行测定^[16].

1.4 水流曲线测定

湿地 A1、D2 水流曲线测定使用 NaCl 为示踪剂,测定方法为:于某时段瞬时在湿地前端进水管处加入一定量及浓度(A1 加入 1 mol·L⁻¹ NaCl 1 L,D2 加入 1 mol·L⁻¹ NaCl 500 mL)氯化钠溶液后,开始计时,同时测定湿地出水电导率(EC)变化,直到湿地出水电导率恢复到原来水平为止. 电导率的测定采用雷磁 DDS-307 电导率仪. 以电导率对时间作图.

1.5 数据分析与作图

采用 Microsoft Office Excel,ORIGIN 8.0 软件分析作图.

2 结果与讨论

2.1 A1、D2 湿地处理效果比较

本中试规模水平潜流人工湿地系统中两块具有相同填料及植物湿地(A1、D2 湿地)中的 D2 湿地经过 2009 年暴雨冲刷后逐渐演变成自由表面流湿地,监测结果表明,D2 湿地除刚冲刷的一段时间内处理效果降低以外,其后处理效果恢复较好,演变后运行 1 a(2010 年 3 月~2011 年 3 月)内,D2 湿地对有机物(COD、TOC)、AN、TN、TP 的去除量分别为 17.88、9.30、0.66、0.72、0.25 g·(m²·d)⁻¹,而 A1 湿地对有机物(COD、TOC)、AN、TN、TP 的去除量分别为 14.71、8.59、0.77、0.17、0.22 g·(m²·d)⁻¹. 可以看出,演变后的自由表面流湿地(D2)对有机物、TN 及 TP 的去除能力高于潜流型人工湿地(A1),相反,演变后的自由表面流湿地(D2)对 AN 的去除能力低于潜流型人工湿地(A1). 为探讨其原因,进行了水流曲线测定,结果表明,A1 湿地及 D2 湿地均有滞留现象,但 A1 湿地滞留时间在约 5 h 以后,而 D2 湿地在 2.5 h 以后(图 2);卢学强等^[17]研究认为将最大峰出现的时间作为污水在湿地中的实际水力停留时间(HRT),从图 2 可以看出,两块湿地实际 HRT 为 35 min 左右,利用公式 $t = 24 \times nV/Q$ ^[18],式中 t 为理论 HRT, n 为湿地填料孔隙率, V 为湿地体积, Q 为湿地进水流量. 计算得出 A1 湿地理论 HRT 约为 5~7 d,说明 A1 湿地内部也因局部堵塞而使短流现象严重. 滞留现象在潜流型湿地中主要为横向扩散引起,而在自由表面流湿地中则主要为水力下渗所引起;有研究表明潜流型人工湿地堵塞后其水力停留时间减小^[19],使处理效果下降且不稳定,湿地表面流现象、内部短流、沟流现象严重,堵塞后的湿地内部流场偏离理想流

型,堵塞湿地介于活塞流反应器和理想完全混合反应器间,属于一般反应器类型^[19]. 但是也有研究发现^[20],堵塞会使 HRT 增加,使污染物的去除率增加,因为堵塞后改变了湿地水流流态,减小了湿地有效孔隙率,使水流路径更加曲折,水流速度减缓,混流增强,从而增强了污染物与湿地的接触时间而使去除率增加,但是堵塞会降低湿地去除负荷. 可以看出,堵塞对湿地效果的影响,主要是 HRT 的影响,本研究中两块湿地 HRT 相差不大(图 2),说明 HRT 不是引起两块湿地处理效能差异的主要原因,所以进一步进行培养实验以研究 2 块湿地中微生物作用情况.

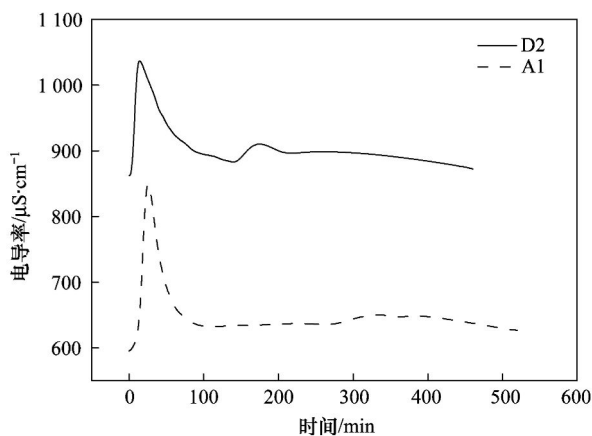


图 2 A1、D2 湿地水流曲线

Fig. 2 Hydraulic residence time distributions of A1 and D2

2.2 A1、D2 湿地中微生物作用

2.2.1 有机物矿化

图 3 所示为两块湿地对有机物的矿化效果,可以看出:①D2 湿地对有机物矿化速率略大于 A1;②20 h 后两块湿地对有机物(初始 TOC 为 $110.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的矿化率达到了 96%;③30 h 时,两块湿地实现了对有机物的完全矿化. 本实验中 D2 湿地对有机物矿化速率略大于 A1(D2 有机物矿化率约 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$,A1 约 $1.49 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$),可能的原因: D2 湿地演变为自由表面流湿地后,水面与大气直接接触,增加了大气复氧而提高湿地中的生物多样性,可能使 D2 湿地中对有机物降解作用的异养微生物的作用要强于 A1 湿地. 很多研究均发现潜流型湿地对有机物的去除效果要优于表面流型湿地,主要是因为人工湿地的实际运行中潜流型人工湿地的基质过滤作用明显,能够去除大部分的悬浮颗粒态及非溶解态有机物,而自由表面流则只能通过表面基质吸附或沉降作用来去除此类有机物^[21]. 在本研究的系统中,两块湿地具有相同的基质及植物,而

且 A1 湿地的 HRT 只是略大于 D2(图 1),因此,摇床培养实验中消除了 HRT、基质过滤等因素的影响,其差异主要来自微生物作用,表现出 D2 湿地微生物作用强于 A1 湿地,这可能也是本湿地系统中 A1、D2 两单元对有机物处理效果差异不明显的原因. 另外,本研究结果与 Naz 等^[22]的研究结果相符合,即表面流湿地对有机物的去除率高于潜流型人工湿地.

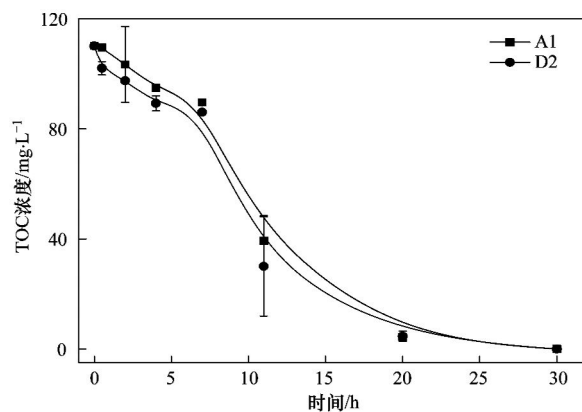


图 3 A1、D2 湿地对有机物的矿化

Fig. 3 Mineralization of organic matters by A1 and D2

2.2.2 硝化/反硝化作用

硝化/反硝化作用作为氮素去除的主要途径,其作用潜力直接影响系统对氮素的去除效果. 图 4 所示为硝化作用培养过程中 AN 的变化趋势,表明 AN 总体呈下降趋势,在 30 min 时 AN 浓度 A1 为 $22.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,D2 为 $32.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,12 h 时 AN 浓度 A1 为 $40.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,D2 为 $44.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而后 AN 呈下降趋势且 A1 氨氮降低明显快于 D2;对照实验表明填料对 AN 的释放作用. 图 5 为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化情况,A1 湿地 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 增加量明显高于 D2 湿地,在培养 1 周(180 h)后,A1 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $33.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 D2 仅为 $15.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对照实验表明 A1 中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,D2 为 $2.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明 A1 湿地硝化作用约为 D2 湿地的 2 倍,A1 湿地硝化作用明显强于 D2 湿地;另外,亚硝酸盐作为硝化作用中间产物在整个培养过程中有少量检出. pH 值作为硝化作用发生过程最重要的间接指标,图 6 显示硝化培养过程中每隔 12 h pH 的变化情况,培养过程中 pH 值降低明显,且在初始培养阶段 D2 pH 变化量高于 A1,后阶段 A1 pH 变化量则高于 D2. 在灭菌后的硝化培养实验中未检测到 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,说明在硝化作用培养实验过程中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的增加确实为硝化菌硝化作用过程所产生.

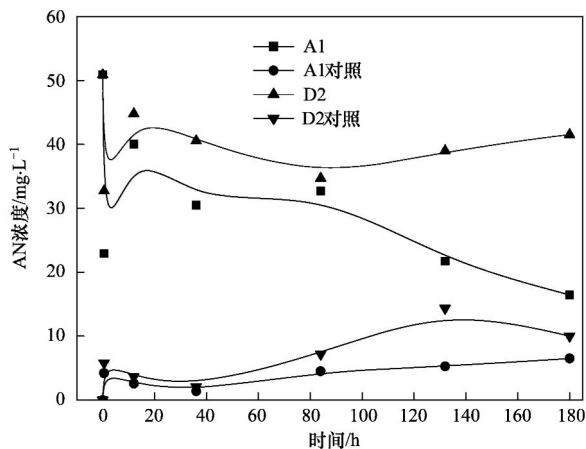


图4 硝化作用过程中AN的变化

Fig. 4 AN variations in the process of nitrification

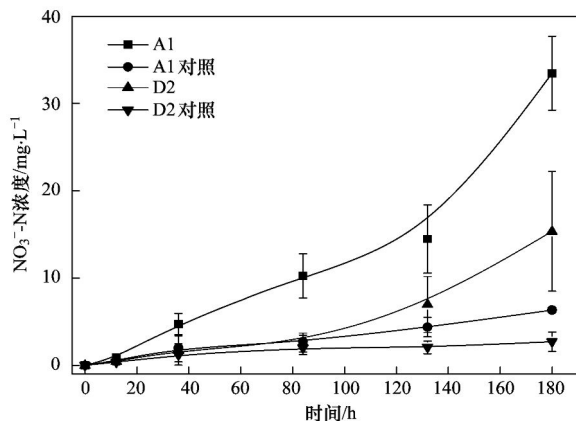


图5 硝化作用过程中NO₃⁻-N的变化

Fig. 5 Variations of NO₃⁻-N in the process of nitrification

图7表明A1、D2反硝化作用培养前后NO₃⁻-N含量变化及灭菌后反硝化培养前后NO₃⁻-N浓度变化情况,在初始NO₃⁻-N浓度为80.6 mg·L⁻¹时,A1湿地填料在培养7 d后NO₃⁻-N浓度降至33.5 mg·L⁻¹,而D2湿地填料在培养7 d后NO₃⁻-N浓度降至2.5 mg·L⁻¹,NO₃⁻-N去除率分别为58.1%及96.8%;灭菌后培养7 d有亚硝酸盐检出,A1灭菌后培养7 d测得NO₂⁻-N及NO₃⁻-N浓度分别为6.45 mg·L⁻¹、51.5 mg·L⁻¹;D2灭菌后培养7 d测得NO₂⁻-N及NO₃⁻-N浓度分别为12.4 mg·L⁻¹、40.8 mg·L⁻¹,NO₃⁻-N去除率分别为36.1%、49.38%;上述结果表明D2对NO₃⁻-N的去除明显强于A1.另外,实验结果也表明,D2湿地中生物脱氮及非生物脱氮能力均强于A1.硝化培养实验中D2对NO₃⁻-N去除率96.8%,除去灭菌实验中非生物作用贡献的40.0%

后,生物贡献为56.8%,而A1的生物贡献仅为29.9%.灭菌后的培养实验中,A1对N的非生物去除率为28.2%,而D2对N的非生物去除率约为40.0%;从NO₂⁻-N浓度的变化可以看出,D2对硝酸盐的还原作用强于A1(D2中NO₂⁻-N浓度高于A1),有利于反硝化过程的进行.

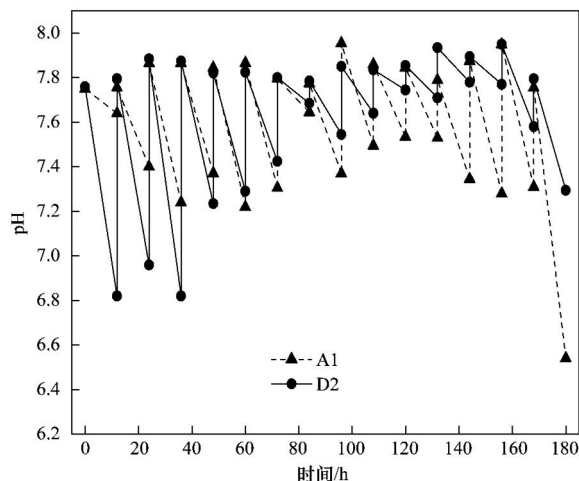


图6 硝化作用过程中pH值变化

Fig. 6 pH variations in the process of nitrification

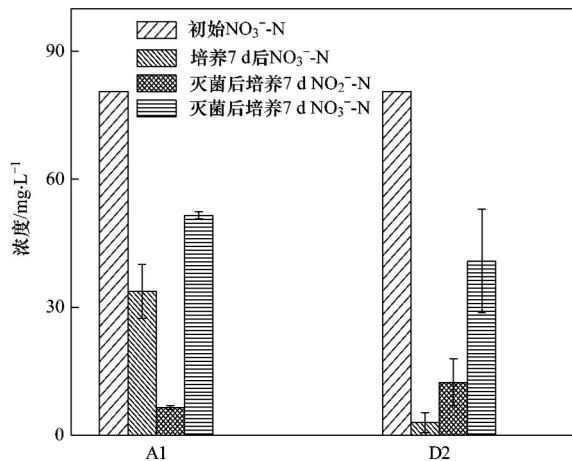


图7 未灭菌与灭菌厌氧培养中NO₃⁻-N及NO₂⁻-N的变化

Fig. 7 Effect of sterilization on variations of NO₃⁻-N and NO₂⁻-N in anaerobic culture

本实验结果表明A1湿地硝化作用强于D2湿地,而D2湿地反硝化作用明显强于A1湿地.可能的原因:①A1湿地已连续运行近6 a,而D2湿地则在2009年演变为自由表面流湿地,且硝化细菌生长周期较长,使得A1湿地中硝化细菌数高于D2湿地. D2演变为自由表面流湿地以后,大量有机质沉积在表面且水流表面与大气接触使得表层大气复氧优于潜流湿地,有利于好氧异养微生物生长且与化

能自养型硝化细菌形成竞争而有利于硝化细菌的生长,使得硝化细菌数可能低于 A1 湿地;为验证笔者的推断,利用平板计数法对两湿地填料中硝化细菌数量计数结果显示:A1 湿地亚硝化细菌明显高于 D2 湿地,分别为 9×10^6 个 $\cdot g^{-1}$ 及 1.5×10^6 个 $\cdot g^{-1}$;而硝化细菌数量差别不大。②由于演变成为自由表面流后基质被大量有机质等悬浮物覆盖使其填料孔隙度降低,水在基质表面流动,使得湿地内部复氧能力差,且为微生物生长提供载体的基质仅为表层部分。而潜流湿地基质孔隙度较大,不仅复氧能力更优,而且为微生物提供了大量的挂膜空间,因此潜流湿地对氨氮的处理效果明显优于表面流湿地^[11]。本研究结果也与聂志丹等^[12]的研究结果相符,其研究表明潜流型人工湿地硝化作用强度约为表面流湿地的 2 倍。

反硝化过程需要电子供体,而在此条件下有机物是主要的电子供体;本研究中 A1、D2 湿地填料有机物含量以 TOC 及 COD 计量分别为 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 及 $1.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.62 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,因此,D2 湿地填料被大量的有机质覆盖,能为反硝化过程提供更充足的电子,有利于反硝化过程的发生。Meutia 等^[23]的研究表明,表面流人工湿地与潜流型湿地相比在处理低碳源或碳源分布不均污水时表面流湿地的优势表现得更明显。在培养过程中非生物作用对 NO_3^- -N 去除明显且 D2 的贡献亦强于 A1,这也是 D2 对 NO_3^- -N 去除明显高于 A1 的重要原因,可能与本研究使用的湿地填料煤渣有关,煤渣中含有大量的金属元素如 Fe、Mg、Ca 等,在长期运行中其会溶解出来从而为还原硝酸盐提供条件,尤其是其中的 Fe^{2+} 对 D2 的非生物脱硝能力高于 A1 起重要作用,对 A1、D2 湿地进、出水中二价铁及总铁含量的测定表明,当进水二价铁及总铁为 $0.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,A1 及 D2 出水中二价铁及总铁分别为:2.78、3.20、11.65、11.84 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明 D2 湿地填料被大量有机质覆盖后在填料孔道内部厌氧发酵作用而使酸度增加,使得金属离子的溶出增加。另外,有机质在填料表面大量覆盖,有机质中的阳离子基团对 NO_3^- 的吸附作用也可能是其去除比 A1 高的原因之一。

2.3 演变后填料除磷性能

一般认为在人工湿地中填料吸附是磷去除的主要途径,植物及微生物作用次之^[24]。图 8 所示为 A1、D2 湿地填料对磷的去除情况,可以看出,当磷初始浓度为 $5.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,两种类型湿地填料经过

1 h 后吸附基本达到平衡,磷浓度降至 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右;在 20 h 时将培养瓶氮吹至厌氧条件后,在 1 d 及 3 d 的监测结果表明,厌氧后 1 d,湿地 A1 磷浓度高于 D2,但厌氧 3 d 后 A1 磷浓度略低于 D2,表明厌氧后磷浓度并没有明显增加,说明本实验中厌氧释磷情况不明显,因此,在本研究的人工湿地中磷的微生物去除贡献不明显。

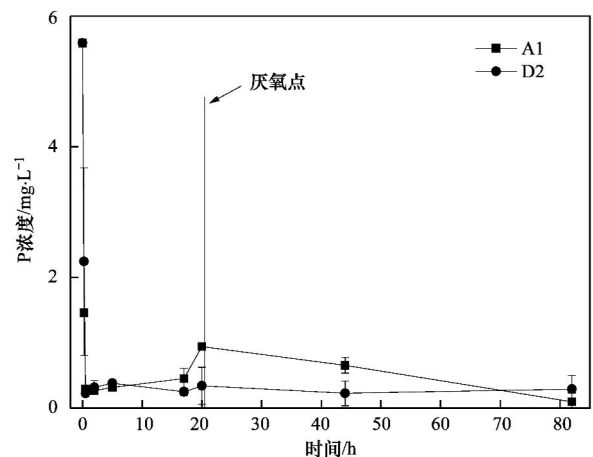


图 8 磷去除及厌氧释磷

Fig. 8 Removal and anaerobic release of phosphorus

有机质对填料吸附磷的影响已有较多报道^[25~29],目前,有机物对基质除磷的影响存在一些分歧,Sakadevan 等^[25]及 Moshi 等^[26]认为有机物的存在不利于磷的吸附沉淀,原因是有机质与磷竞争吸附位;而部分学者则认为磷素能以有机质为载体吸附在基质表面,有机质的存在可加速磷的吸附沉淀^[27,29],可以看出有机物对基质除磷的影响是复杂的。图 9 所示为两湿地填料对磷素的吸附结果,显示其为快速吸附过程,2 h 后 A1、D2 对 P 的吸附率达到 52.6% 及 75.6%;45 h 时其吸附量分别达到

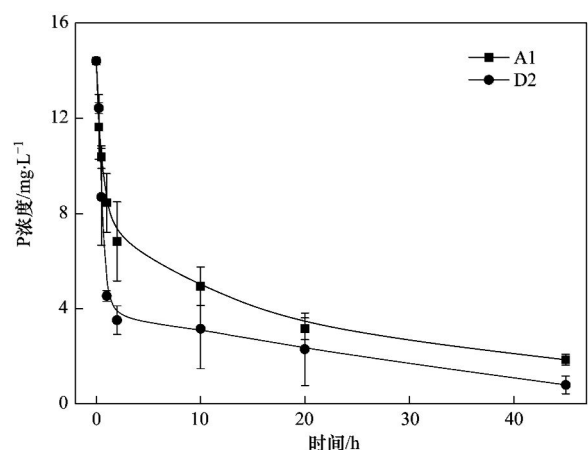


图 9 填料对 P 的吸附

Fig. 9 Adsorption of phosphorus by the substrates

了 $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可以看出 D2 湿地填料对磷素吸附能力大于 A1 湿地填料, 表明有机质覆盖在填料表面可能有利于对磷素的吸附, 与其它研究结果相符^[27,29]. 且从图 10 中可以看出 D2 湿地填料吸附速率大于 A1 湿地, 这或许能说明 D2 演变成自由表面流湿地后其 HRT 略小于 A1 湿地但其除磷效果并未降低的原因.

2.4 演变后填料对氨氮吸附性能

有机质对填料吸附氨氮的影响少有研究, D2 湿地因泥沙及有机悬浮物的沉积使其表面明显覆盖了一层有机质, 其表观颜色成棕色, 而 A1 湿地填料则更接近于煤渣的本色深黑色. 两湿地填料对氨氮吸附情况如图 10 所示, 可以看出, 在初始 1 h 内填料对氨氮具有一定的吸附作用, 但随时间延长填料表现出对氨氮的解吸附作用, 最大释放量超过了初始浓度 1 倍; 且 D2 湿地填料对氨氮的释放速率高于 A1 湿地填料. 因本湿地系统已运行近 6 a 时间, 填料对氨氮的吸附基本达到饱和, 故实验过程中填料对氨氮的作用过程是先吸附后解吸.

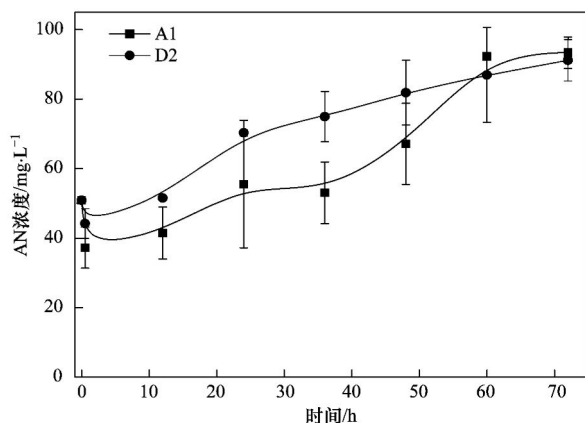


图 10 填料对 AN 的吸附及释放

Fig. 10 Adsorption and release of AN by the substrates

3 结论

(1) 中试规模水平潜流人工湿地因堵塞逐渐演变为自由表面流人工湿地后, 其对有机物 (COD、TOC)、TN 及 TP 的去除能力高于潜流型人工湿地, 相反, 对 AN 的去除能力低于潜流型人工湿地.

(2) 培养实验表明, 与潜流人工湿地相比, 演变后的自由表面流人工湿地对有机物的矿化率、脱氮能力 (包括生物反硝化作用及非生物脱硝作用) 及磷去除能力均高于潜流型人工湿地, 但其硝化作用能力更低.

(3) 演变后的自由表面流人工湿地填料对 AN

的作用表现为先少量吸附再解吸附的过程, 而且释放速率高于潜流型湿地填料; 但对磷表现出较高吸附能力且优于潜流型湿地填料, 填料表面有机物的存在有利于磷素的吸附.

参考文献:

- [1] Kadlec R H, Knight R L. Treatment wetlands[M]. Boca Raton: CRC Press/Lewis Publishers, 1996.
- [2] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience [J]. Environmental Science and Technology, 2011, **45**(1): 61-69.
- [3] 梁继东, 周启星, 孙铁珩. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(2): 49-55.
- [4] Imfeld G, Braeckevelt M, Kusch P, et al. Monitoring and assessing processes of organic chemicals removal in constructed wetlands[J]. Chemosphere, 2009, **74**(3): 349-362.
- [5] Marchand L, Mench M, Jacob D L, et al. Metal and metalloid removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of plants and standardized measurements: a review [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(12): 3447-3461.
- [6] Stehle S, Elsaesser D, Gregoire C, et al. Pesticide risk mitigation by vegetated treatment systems: a meta-analysis [J]. Journal of Environmental Quality, 2011, **40**(4): 1068-1080.
- [7] Healy M G, Rodgers M, Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters [J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(12): 2268-2281.
- [8] Hua G F, Zhu W, Zhao L F, et al. Clogging pattern in vertical-flow constructed wetlands: insight from a laboratory study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **180**(1-3): 668-674.
- [9] 付贵萍, 吴振斌, 张晟, 等. 构建湿地堵塞问题的研究 [J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 144-149.
- [10] 冯琳, 甘莉, 王化杰, 等. 人工湿地设计及运行参数对挥发性烷基硫化物去除的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 345-351.
- [11] Neralla S, Weaver R W, Lesikar B J, et al. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2000, **75**(1): 19-25.
- [12] 聂志丹, 年跃刚, 金相灿, 等. 3 种类型人工湿地处理富营养化水体中试比较研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1675-1680.
- [13] 赵建刚, 刘丽娜, 陈章和. 潜流湿地和表面流湿地的净化效果与植物生长比较 [J]. 生态科学, 2006, **25**(1): 74-77.
- [14] Zemanová K, Pícek T, Dušek J, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus transformations are related to age of a constructed wetland [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2010, **207**(1-4): 39-48.
- [15] Liang Z H, Das A, Beerman D, et al. Biomass characteristics of two types of submerged membrane bioreactors for nitrogen removal from wastewater [J]. Water Research, 2010, **44**(11): 3313-3320.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法 [M]. (第四

- 版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 卢学强, 唐运平, 李万庆, 等. 污水湿地处理工程水力停留时间的测定[J]. 干旱环境监测, 1999, **13**(2): 74-76.
- [18] 许保玖. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [19] 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.
- [20] 张雨葵, 曹明弟, 杨扬. 堵塞对湿地内水流动态及污水处理效果的影响[J]. 水资源保护, 2008, **24**(6): 57-60.
- [21] 冯琳. 潜流人工湿地中有机污染物降解机理研究综述[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(5): 2006-2010.
- [22] Naz M, Uyanik S, Yesilnacar M I, *et al.* Side-by-side comparison of horizontal subsurface flow and free water surface flow constructed wetlands and artificial neural network (ANN) modeling approach[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(8): 1255-1263.
- [23] Meutia A A. Treatment of laboratory wastewater in a tropical constructed wetland comparing surface and subsurface flow[J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(11-12): 499-506.
- [24] Reddy K R. Fate of nitrogen and phosphorus in a waste-water retention reservoir containing aquatic macrophytes[J]. Journal of Environmental Quality, 1983, **12**(1): 137-141.
- [25] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, **32**(2): 393-399.
- [26] Moshi A O, Wild A, Greenland D J. Effect of organic matter on the charge and phosphate adsorption characteristics of kikuyu red clay from Kenya[J]. Geoderma, 1974, **11**(4): 275-285.
- [27] Mizota C, Carrasco M A, Wada K. Clay mineralogy and some chemical properties of Ap horizons of Ando soils used for paddy rice in Japan[J]. Geoderma, 1982, **27**(3): 225-237.
- [28] Sanyal S K, Chan P Y, De Datta S K. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of South and Southeast Asia[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, **57**(4): 937-945.
- [29] Reed S C, Brown D. Subsurface flow wetlands: a performance evaluation[J]. Water Environment Research, 1995, **67**(2): 244-248.

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 Carbenazim 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