

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

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

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)	

好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化

李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 前期研究表明在人工潜流湿地(SFCWs)中设置好氧段和厌氧段可显著提高SFCWs对COD、 NH_4^+ -N的去除率。然而曝气产生的富氧环境不利于 NO_3^- -N和 NO_2^- -N的去除,一定程度上抑制了反硝化反应的进行。反硝化程度较低是实验中仍需进一步解决的问题。本研究在前期研究的基础上,对好氧/厌氧多级串联潜流人工湿地结构及工艺进行了改进优化,采用多点进水的措施来强化反硝化过程,并设计相应的区段去除该部分污染物。结果表明,水力负荷约为 $0.06 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,进一步优化结构和比例的好氧-缓冲-厌氧-缺氧-好氧曝气多点进水湿地对COD、 NH_4^+ -N和TN的去除率可达到91.6%、100%和87.7%。在补充进水之后的区段,COD/N迅速升高到10以上,做到了补充碳源的同时最大限度地利用湿地去除污染物。改良后的湿地达到了净化工艺优化的目的,为提高人工湿地总氮去除效率提供了理论依据及应用基础。

关键词: 好氧/厌氧串联; 补充进水; 碳氮比; 总氮去除率; 优化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0436-06

Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands

LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, LI Yang, WANG Zheng-yu

(Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Previous studies showed that setting aerobic and anaerobic paragraph segments in the subsurface constructed wetlands (SFCWs) can improve the COD, NH_4^+ -N, and TN removal rate, whereas the oxygen enrichment environment which produced by the artificial aeration could restrain the NO_3^- -N and NO_2^- -N removal process, and to a certain extent, inhibit the denitrification in SFCWs. Therefore, in this research the structure and technology of SFCW with aerobic and anaerobic paragraph segments were optimized, by using the multi-point water inflow and setting the corresponding section for the extra pollutant removal. Results showed that with the hydraulic load of $0.06 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, the COD, NH_4^+ -N and TN removal efficiencies in the optimized SFCW achieved 91.6%, 100% and 87.7% respectively. COD/N increased to 10 speedily after the inflow supplement. The multi-point water inflow could add carbon sources, and simultaneously maximum utilization of wetland to remove pollutants. The optimized SFCW could achieve the purposes of purification process optimization, and provide theoretical basis and application foundation for improving the total nitrogen removal efficiency.

Key words: aerobic/anaerobic; water supplementary; C/N ratio; TN removal efficiency; optimization

微生物硝化及反硝化作用是潜流人工湿地(subsurface flow constructed wetlands, SFCWs)脱氮的主要机制^[1-3]。研究表明人工强化曝气可提高好氧/厌氧多级串联潜流人工湿地中的溶氧含量,促进硝化细菌的活性,有利于COD的好氧降解,并显著提高了 NH_4^+ -N的去除率^[4-6],但TN去除率并没有显著改善。分析原因可能是因为碳源在反硝化之前已降解到很低的水平,且较高的溶氧含量也不利于反硝化的进行,反硝化反应成为了制约TN去除率的重要方面。因此,要有效去除污水中的氮,在保障水中有充足的溶解氧以完成 NH_4^+ -N硝化的同时又要使反硝化细菌有适宜的缺氧环境和充足的有机物来源,以保障反硝化作用的顺利进行。

一般来说,硝化作用产生的 NO_3^- -N和 NO_2^- -N需要通过微生物的反硝化作用被还原为 N_2 、 N_2O 或 NO ,

才能被彻底去除^[7,8],而反硝化过程需要缺氧环境对碳氮比的要求也较严格,污水中C/N比对反硝化脱氮过程影响较为显著^[9-12]。理论上脱氮过程所需要的C/N(质量比)为2.86,但在较为复杂的硝化反硝化过程中C/N(质量比)则需高于2.86^[13]。另有研究显示,生物脱氮所必须的进水COD/N(质量比)值为7.1^[14]。目前采取外加碳源的方式可保证反硝化反应的完成,现有的外加碳源大体可分为两类:一是以葡萄糖^[15]、甲醇、乙醇、乙酸等液态有机物为主的传统碳源;二是以一些低廉的固体有机物为主,包括含纤维素类物质的天然植物及一些可生物降解

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(40906053); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07010-009, 2009ZX07010-008); 青岛市科技发展计划(10-3-3-21-nsh)

作者简介: 李锋民(1975~),男,博士,副教授,主要研究方向为环境生物学, E-mail: lfm01@ouc.edu.cn

聚合物等在内的新型碳源. 甲醇是应用和研究最为广泛的反硝化碳源. 但该类物质存在一些不容忽视的缺点,如甲醇脱氮的效率虽然高,但本身的毒性会对环境造成潜在的危险^[16],同时甲醇的运营成本高,出水的 COD 往往也较高. 乙醇、乙酸等有机物碳源虽然毒性没有甲醇强,但运行成本高、出水的有机碳含量超标仍是阻碍其进一步开发使用的瓶颈问题.

针对前期研究好氧/厌氧多级串联潜流人工湿地 COD、NH₄⁺-N 去除率高而 TN 去除率较低的特点,本研究拟通过分析延长厌氧段、多点进水等工艺参数和运行条件对 COD、NH₄⁺-N、TN 去除效率的影响,优化潜流人工湿地结构和运行工艺,以期为建立高效去除 COD、NH₄⁺-N、TN 的好氧/厌氧多级串联潜流人工湿地及其运行参数提供理论依据和应用基础.

1 材料与方法

1.1 实验设计与装置

潜流人工湿地装置如图 1 所示,材料为 PVC,箱内从下至上依次填充砾石层(粒径 3 ~ 5 cm)、煤渣层(粒径 1 ~ 3 cm)、土壤层,厚度依次为 5、15、5 cm. 实验装置共有 4 套,分别为:①好氧-厌氧-好氧(OAO)曝气组,②好氧-厌氧-好氧(OAO)曝气多点进水组,③好氧-缓冲-厌氧-缺氧-好氧(OBAAO)曝气组,④好氧-缓冲-厌氧-缺氧-好氧(OBAAO)曝气多点进水组. 曝气通过在好氧段底部铺设人工设计的“工”型曝气管,利用空压机对槽内进行均匀曝气来实现. 厌氧段表层全部用塑料布密封强化厌氧效果,缓冲区不作曝气和厌氧处理,作为好氧段的延

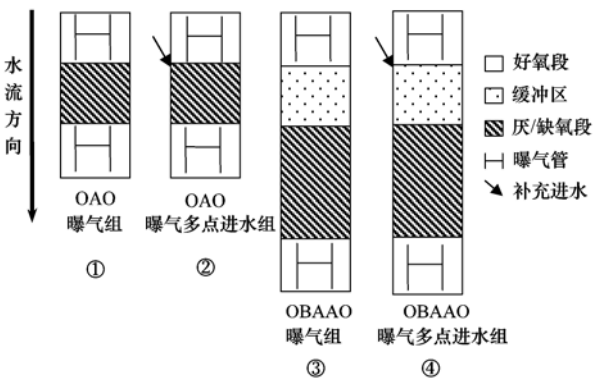


图 1 新型潜流人工湿地装置平面示意
Fig. 1 Plan of the new subsurface flow constructed wetland

伸,起缓冲作用. 在②和④的第二区段进行进水的补充,①作为对照,比较延长厌氧段长度和多点进水后对湿地水质净化效果的影响. 箱体后端以旋转弯头控制出水水位. 每个湿地等距设定水样采集点,沿水流方向各采样点分别记为:1-1、1-2、1-3、2-1、2-2、2-3、3-1、3-2、3-3、4-1、4-2、4-3、5-1、5-2、5-3.

1.2 研究方法

为保证进水的稳定性和连续性,参照农村生活污水水质进行配水,主要成分为葡萄糖、淀粉、蛋白胨、牛肉膏、(NH₄)₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃ 和 CaCl₂ 等,进水水质指标见表 1. 采用连续进水的方式,初始进水 COD 浓度 ≤ 200 mg·L⁻¹,氨氮浓度约 20 mg·L⁻¹. 水力停留时间 5 d,水力负荷约 0.06 m³·(m²·d)⁻¹,多点进水组进水量按区段长度及进水位置计算,保证水力负荷不变. 连续进水 2 周后,取样测定,采样频率为每周一次,采集后立即测定 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、溶解氧(DO)和 pH.

表 1 人工湿地进水水质

Table 1 Water quality parameters in the influent of the constructed wetland						
参数	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	pH	t/°C
进水	184.55	21.72	0.25	0.023	7~8	20~25

1.3 分析统计方法

COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 的测定采用文献[17]中的标准方法进行分析,pH 值用玻璃 pH 计测定,DO 采用 WTW2B20-0017 型溶氧仪测定. 数据统计使用 Microsoft Office 2003 软件.

2 结果与分析

2.1 优化 SFCWs 结构和运行工艺对 COD 的去除效果比较

SFCWs 稳定运行一个月后,对 4 种不同结构

SFCWs 的 COD 去除率进行比较,结果如图 2 所示. 在实验周期内,进水 COD 平均值为 259.8 mg·L⁻¹,4 种 SFCWs 的 COD 去除率基本稳定在 60% 以上. OAO 曝气组 COD 去除率均值为 88.5%,而 OAO 曝气补充进水组 COD 去除率降为 64.5%. 分析 COD 去除率降低的原因是由于补充进水的同时也补充了与进水浓度相当的 COD,补充进水后的 COD 并未被理想地去除. OBAAO 曝气组对 COD 的去除效果与 OAO 曝气组相近. 而 OBAAO 曝气多点进水组对 COD 的去除率可高达 91.6%,去除效率最高. 说明

优化后的 SFCWs 结构即:好氧段-缓冲区-厌氧段-厌氧段-好氧段提高了对 COD 的去除率。

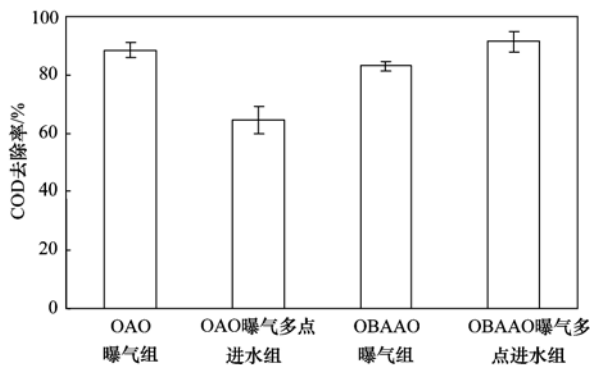


图 2 4 种湿地对 COD 的去除率比较

Fig. 2 Comparison of COD removal efficiencies among the four wetland types

2.2 4 种 SFCWs 的 NH_4^+ -N 去除效果

延长湿地的厌氧段长度和补充进水后, SFCWs 对 NH_4^+ -N 的沿程处理效率如图 3. 在湿地前部即好氧段, 4 种 SFCWs 对 NH_4^+ -N 的去除率迅速升高到 90% 以上. 在第二段补充进水后, OAO 曝气多点进水组和 OBAAO 曝气多点进水组对 NH_4^+ -N 的去除率表现出下降的趋势, 去除率约为 50%, 这是由于补充进水的同时也补充了与进水浓度相当的 NH_4^+ -N, 表现在去除率上有所下降. 在后部的好氧段对 NH_4^+ -N 的处理性能又逐渐提升. 4 种湿地出水 NH_4^+ -N 去除率均可达到 100%.

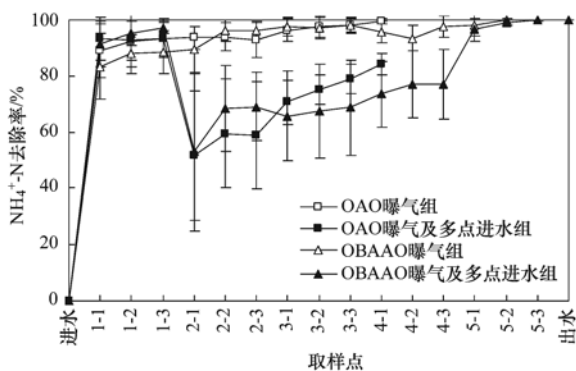


图 3 4 种湿地 NH_4^+ -N 去除率沿程变化

Fig. 3 NH_4^+ -N removal rate variation of four wetlands along the flow

2.3 优化 SFCWs 结构和运行工艺对 TN 去除效果的影响

比较 4 种 SFCWs 对 TN 的去除效果, 如图 4 所示. 随着运行时间的延长, 4 种 SFCWs 对 TN 的去除效果均较稳定. OAO 曝气组对 TN 的去除率稳定在

50% 左右. 补充进水后, OAO 曝气多点进水组对 TN 的去除率均值为 61.4%, TN 的去除率有所提高. OBAAO 曝气组对 TN 的去除率较 OAO 曝气组略有下降, OBAAO 曝气多点进水组对 TN 的平均去除率为 87.7%, 去除率最高, 且随着运行时间的延长呈逐渐升高的趋势. 说明只对 SFCWs 结构进行优化增加缓冲段并不能提高 TN 的去除率, 补充进水才是关键的运行工艺, 只有在补充进水的同时优化 SFCWs 结构才能最大程度提高 TN 去除率.

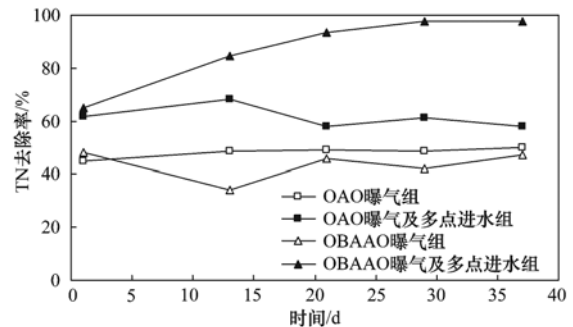


图 4 4 种湿地出水 TN 去除率随时间的变化

Fig. 4 Four wetlands outflow TN removal rate variation with time

沿水流方向, 4 种 SFCWs 对 TN 的去除率也表现出一定的规律性, 如图 5 所示. OAO 曝气组和 OBAAO 曝气组对 TN 的去除率均为 50% 左右, 说明延长厌氧段长度后对 TN 去除率的提高影响不大. 补充进水的 2 种 SFCWs 即 OAO 曝气多点进水组和 OBAAO 曝气多点进水组 TN 去除率有显著提高, 且随着水流方向平稳升高, 出水处去除率分别为 61.4% 和 87.7%, OBAAO 曝气多点进水组对 TN 的去除率最高.

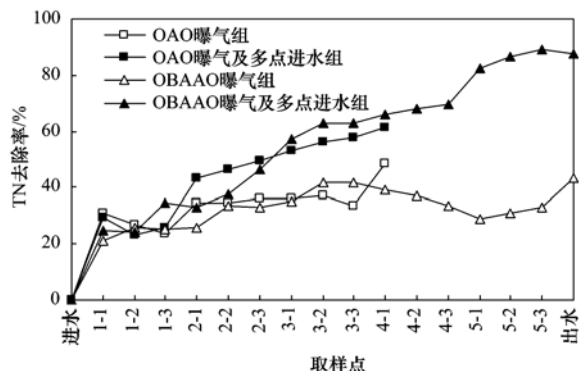


图 5 4 种湿地 TN 去除率沿程变化

Fig. 5 TN removal rate variation of four wetlands along the flow

TN 去除率的提高也可以从 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 浓度的变化来看, 从图 6 可以看出, 相同设

计的 SFCWs(OAO 曝气组和 OAO 曝气多点进水组)在补充进水后, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度显著升高, 同时 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度显著降低, 说明碳源的补充有利于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的降解, 促进了反硝化过程的进行. 比较 OAO 曝气组和 OBAAO 曝气组, 在延长厌氧段长度后, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度

略有降低. 4 种 SFCWs 中, OBAAO 曝气多点进水组在出水处 TN 浓度降为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 浓度最低, 其中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的去除主要集中在厌氧段, 这说明同时延长厌氧段长度和补充进水有利于反硝化反应的进行.

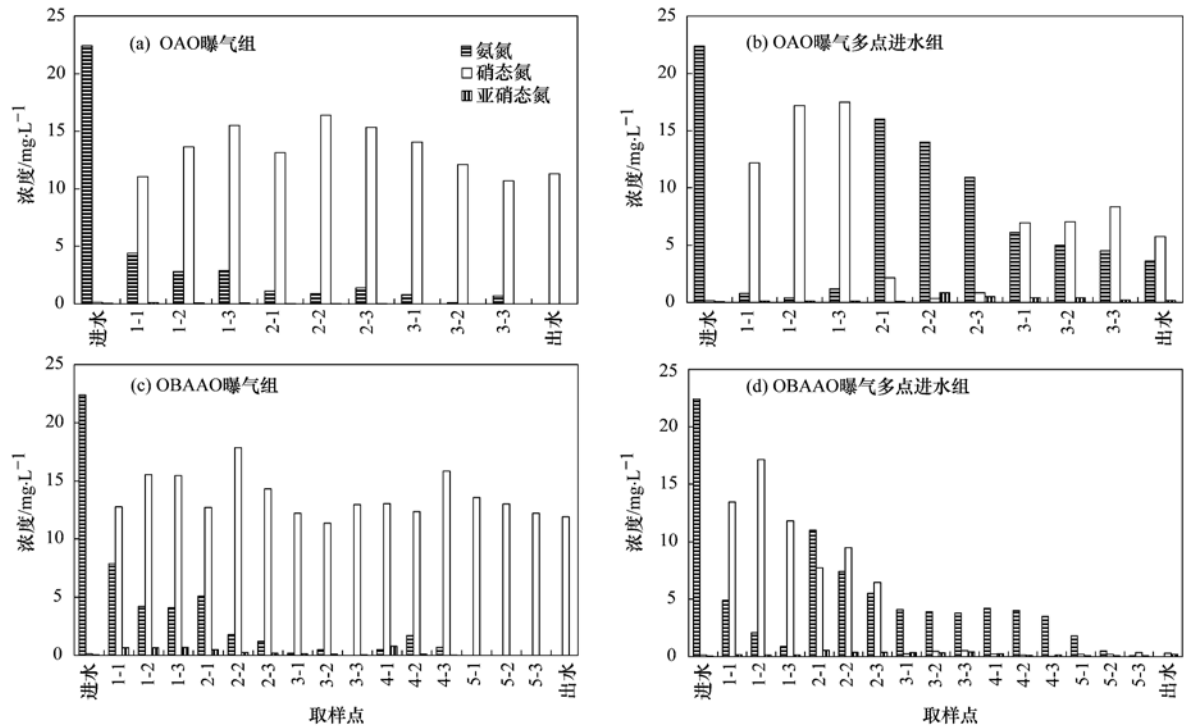


图 6 系统进、出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度变化

Fig. 6 Variation of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ concentrations in influent and effluent

2.4 优化结构与工艺后 SFCWs 中 C/N 的变化

针对前期研究中反硝化反应碳源不足的问题, 本实验设计中进行了补充进水的改进措施以提高 C/N, COD/N 沿程变化情况如图 7 所示. 4 种 SFCWs 的 COD/N 在进水时为 10 左右, 在前部好氧段逐渐降低, 第 2 段补充进水后, 可以明显看出, OAO 曝气多点进水组和 OBAAO 曝气多点进水组的 COD/N

显著升高, 从 5 提高到 30 左右, 随后 COD/N 一直保持在 10 以上, 出水处略有降低.

3 讨论

通过比较不同类型 SFCWs 对水质净化效果, 可得出厌氧段长度及补充进水对 SFCWs 水质净化效果的影响. 在同一厌氧段, OAO 曝气组的 DO 浓度为 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧段长度加倍的 OBAAO 曝气组为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同样延长厌氧段长度的 OBAAO 曝气多点进水组的 DO 浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 TN 去除率三者分别为 48.3%、43.5% 和 87.7% (图 5), 这说明延长厌氧段虽然有利于 DO 的降低, 但对 TN 去除率的提高影响不大, 补充进水可能是提高 TN 去除率的主要影响因素. 从 COD/N 来看, 在补充进水之后的区段, COD/N 迅速升高到 10 以上, 解决了前期研究中反硝化碳源不足的问题, 补充进水的 2 种 SFCWs 的 TN 去除率有大幅提高.

净化效果最好的 OBAAO 曝气多点进水组共分

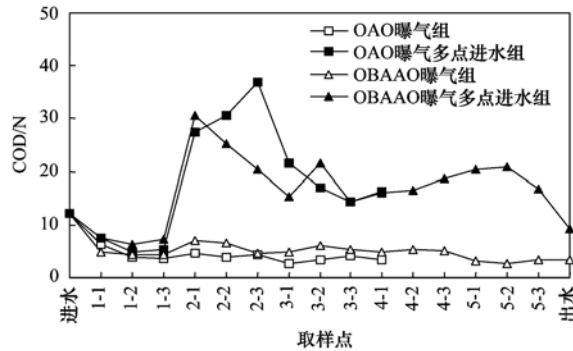


图 7 4 种湿地 COD/N 沿程变化

Fig. 7 Four wetlands COD/N variation along the flow

为5个波形区间.进水首先进入曝气的第一好氧段,在高DO的条件下完成大部分COD的去除与硝化过程,通过沿程实验表明,经过第一好氧段的处理,污水中 NH_4^+-N 的大部分已经转变成了 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- -\text{N}$,出水中的 NH_4^+-N 浓度 $<1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图6).在第二段补充进水后,第一段残余的DO有利于降解补充进水中的COD和 NH_4^+-N ,这样既可以保证在进入厌氧段时消耗掉残存的溶解氧,又能保证补充进水中的COD浓度不至于过高,从而可以为厌氧段的反硝化提供充足的碳源,即发挥缓冲区的功效.到了第三段厌氧段,进水中的 NH_4^+-N 几乎完全转化成 $\text{NO}_3^- -\text{N}$,而补充进水中的COD还维持在较高的水平上,可以提供足够的碳源,同时溶解氧在经过好氧缓冲区后也降到了较低的水平,此时厌氧段内可以充分发挥反硝化作用,去除已转化的 $\text{NO}_3^- -\text{N}$,从图6中可以看出,在厌氧段, $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 的浓度显著降低,TN浓度也相应降低.经过缓冲区的降解和厌氧段反硝化的消耗,补充进水中剩余的少量COD在最后的第二好氧段达到90%以上的去除率,出水处 NH_4^+-N 得到完全去除,TN浓度降到 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,去除率为87.7%.

基于人工湿地独特的优点,人工湿地污水处理技术越来越受人们关注.陆松柳等^[18]研究了外加碳源对人工湿地系统中反硝化作用的影响,实验设置3套湿地,分别种植美人蕉、茭白和千屈菜,在运行期间补充以葡萄糖为主的碳源,C/N为3:1,比较不同时期不同湿地的运行效果.结果表明,投加碳源后,当进水TN浓度为 $30\sim 40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水力负荷为 $0.1\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,冬季TN的去除率可以从10%提高到30%,夏季最高可以从20%提高到50%.除投加碳源外,为节省成本,也有学者设计出一种塔式复合流湿地系统,利用跌水充氧既可以提供硝化反应所需的溶解氧,同时为后段的湿地提供一定的碳源,当进水TN浓度为 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD浓度为 $185\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水力负荷为 $0.2\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,TN和COD去除率可以达到83%和72%^[19].任拥政等^[20]将传统潜流湿地出水按50%的回流比回流至湿地起端,原污水在湿地1/3处进水,当进水TN浓度为 $26\sim 36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD浓度为 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水力负荷为 $2.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 时,TN和COD去除率为50%左右和62%.研究指出,进水负荷相同时,污染物的去除率与水力负荷呈负相关关系.比较以上3种设计,可以明显看出,塔式复合流人工系统和出水回流湿地系统对TN的净化能力要显著高于外加碳源的

湿地.Stefanakis等^[21]研究得出在水平潜流人工湿地前中后三段分级进水比例为60:25:15的条件下, BOD_5 、COD、TN及TP的去除率有显著改善.由此说明,对湿地去污能力的提升必须从湿地本身进行改进和完善.本研究中,当进水水力负荷为 $0.06\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,TN和COD浓度为 $21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,OBAAO曝气多点进水组的去除率为87.7%和91.6%,综合各项污染物指标,比以往的研究有显著优势,基本上实现了改善湿地结构、最大程度提高去污能力的目的.

4 结论

在人工潜流湿地(SFCWs)中设置好氧段和厌氧段可提高SFCWs对COD、 NH_4^+-N 、TN的去除率,在此基础上,对好氧/厌氧潜流湿地结构及工艺进行了改进优化,延长了OAO曝气SFCWs中厌氧段长度并补充进水.结果表明,在实验条件下OBAAO曝气多点进水SFCWs对COD、 NH_4^+-N 、TN的去除率可达到91.6%、100%和87.7%,去除率最高.补充进水后,湿地对TN的去除率有显著提高.溶解氧、碳源等都是影响反硝化作用的重要因素.

参考文献:

- [1] Bule T G. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment [J]. *Ecological Engineering*, 2006, **26**(4): 365-374.
- [2] Bigambo T, Mayo A W. Nitrogen transformation in horizontal subsurface flow constructed wetlands II: effect of biofilm [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2005, **30**(11-16): 668-672.
- [3] Song X S, Li Q, Yan D H. Nutrient removal by hybrid subsurface flow constructed wetlands for high concentration ammonia nitrogen wastewater [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1461-1468.
- [4] 李锋民,宋妮,单时,等.好/厌氧多级串联潜流人工湿地对COD的去除效果[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(6E): 8-11.
- [5] 李锋民,单时,王昊云,等.好氧/厌氧多级串联潜流人工湿地脱氮效果[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 156-162.
- [6] 潘继征,柯凡,李文朝.微曝气垂直流湿地污染物去除动力学模型分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2633-2638.
- [7] 代嫣然,梁威,吴振斌.低碳高氮废水的人工湿地脱氮研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(B03): 305-309.
- [8] Lu S L, Hu H Y, Sun Y X, *et al.* Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(8): 1036-1043.
- [9] Jia W L, Zhang J, Wu J, *et al.* Effect of intermittent operation on contaminant removal and plant growth in vertical flow constructed wetlands: a microcosm experiment [J].

- Desalination, 2010, **262**(1-3): 202-208.
- [10] 贾文林, 吴娟, 武爱国, 等. 碳氮比对人工湿地污水处理效果的影响 [J]. 环境工程学报, 2010, **4**(4): 767-770.
- [11] Fu Z M, Yang F L, Zhou F F, *et al.* Control of COD/N ratio for nutrient removal in a modified membrane bioreactor (MBR) treating high strength wastewater [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(1): 136-141.
- [12] Meng Q J, Yang F L, Liu L F, *et al.* Effects of COD/N ratio and DO concentration on simultaneous nitrification and denitrification in an airlift internal circulation membrane bioreactor [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(8): 933-939.
- [13] Henze M. Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater [J]. Water Science and Technology, 1991, **23**(4-6): 669-679.
- [14] Carrera J, Vicent T, Lafuente J. Effect of influent COD/N ratio on biological nitrogen removal (BNR) from high-strength ammonium industrial wastewater [J]. Process Biochemistry, 2004, **39**(12): 2035-2041.
- [15] 余丽华, 贺锋, 徐栋, 等. 碳源调控下复合垂直流人工湿地脱氮研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3300-3305.
- [16] Shrimali M, Singh K P. New methods of nitrate removal from water [J]. Environmental Pollution, 2001, **112**(3): 351-359.
- [17] 魏复盛, 齐文启, 毕彤, 等. 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.
- [18] 陆松柳, 胡洪营. 人工湿地的反硝化能力研究 [J]. 中国给水排水, 2008, **24**(7): 63-65.
- [19] Ye F X, Li Y. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(7): 1043-1050.
- [20] 任拥政, 章北平, 海本增. 利用充氧和回流强化波形潜流人工湿地的脱氮效果 [J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2700-2704.
- [21] Stefanakis A I, Akratos C S, Tsihrantzis V A. Effect of wastewater step-feeding on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(3): 431-443.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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