

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H_2O_2 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O_3 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究

孙迎雪¹, 徐栋², 田媛¹, 李燕飞¹

(1. 北京工商大学食品学院环境科学与工程系, 北京 100048; 2. 中国市政工程西北设计研究院北京分院, 北京 100037)

摘要: 研究了短程硝化生物滤池的调控因素以及短程硝化-反硝化生物滤池的脱氮机制。结果表明, 针对城市污水处理厂二级出水中的氨氮和总氮, 在水温为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的条件下, 提高进水 pH 值有助于硝化生物滤池中亚硝酸盐的积累, 较好地实现短程硝化过程, 当进水 pH 值平均为 8.5 时, 亚硝酸盐的积累达到最大。沿硝化生物滤池水流方向, pH 和 DO 的变化呈相反趋势, 亚硝酸盐的积累呈增加趋势, 在反应器出水口较好地实现了亚硝酸盐的积累。短程硝化-反硝化生物滤池对 NH_4^+-N 有较好的去除效率(90% 以上); 当反硝化生物滤池进水 COD/TN 为 3.0 时, 出水 TN 的浓度降低到 $8 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围, 去除率稳定在 79% ~ 81%。

关键词: 生物滤池; 生物膜; 生物脱氮; 短程硝化; 反硝化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3501-06

Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter

SUN Ying-xue¹, XU Dong², TIAN Yuan¹, LI Yan-fei¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. China Northwest Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd, Beijing 100037, China)

Abstract: The controlling factors for nitrite accumulation in partial nitrification and mechanism of nitrogen removal from the secondary effluent of wastewater treatment plant by partial nitrification-denitrification biological filter were investigated. The results showed that nitrite accumulated with increasing of pH value in the influent under the condition of temperature was $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$. The nitrite accumulation achieved to the highest at a pH value of 8.5 in this batch experiments. In addition, the nitrite accumulation presented increasing tendency through the up-flow nitrifying biological filter, which can be adjusted by the changes of pH and DO through the filter. The removal efficiency of NH_4^+-N was over 90% by the partial nitrification-denitrification biological filter. Meanwhile, carbon sources were supplied for the denitrifying bacteria to accomplish denitrification process. Under the condition of COD/TN at a value of 3.0, the concentration of TN in the effluent of denitrifying biofilter was $8 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the removal efficiency achieved 79% ~ 81%, stably.

Key words: biological filter; biofilm; biological nitrogen removal; partial nitrification; denitrification

城市污水深度处理及回用是减轻水体污染负荷, 解决水资源短缺的重要战略和必要途径^[1,2]。近年来, 城市污水已逐渐在农、林业, 城市杂用, 工业冷却, 景观和娱乐利用, 饮用水水源增补, 地下水补给等方面得到多方位回用。但是城市污水处理厂二级出水中往往含有一定浓度的氮、磷等营养物质, 直接补给城市景观水体、河道及湖泊时, 会造成水体营养物质的积累, 存在引发水华和水体富营养化的隐患^[3]。

传统生物脱氮方法是通过微生物的硝化和反硝化作用两个独立过程实现, 硝化作用即在好氧条件下, 由硝化菌将氨氮氧化为亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的生物反应, 反硝化作用即是缺氧条件下, 硝酸盐、亚硝酸盐及其它氮氧化物被用作电子受体还原为氮气或氮的其它气态氧化物的生物反应^[4,5]。短程硝

化-反硝化技术是于 1975 年提出并在近 20 年来逐渐发展起来的脱氮技术, 通过控制特殊的环境条件下抑制硝化菌的成长, 使系统中的亚硝化菌成为优势菌种, 将硝化过程控制在形成亚硝态氮阶段, 然后直接进行反硝化, 形成 $\text{NH}_4^+ \xrightarrow{\text{AOB}} \text{NO}_2^- \xrightarrow{\text{DB}} \text{N}_2$ 的脱氮过程^[6]。研究发现, 短程硝化-反硝化过程可以通过调整操作参数如 pH、DO、温度、游离氨和亚硝酸盐浓度等方法实现^[7~13]。

有关活性污泥法的短程硝化-反硝化脱氮研究较多, 相对传统脱氮工艺, 采用短程硝化-反硝化的

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-03-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-007); 北京市教育委员会科技计划面上项目(KM201210011004)

作者简介: 孙迎雪(1973~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: syingxue@126.com

活性污泥法脱氮工艺可节省氧供应量约 25%, 节省反硝化所需碳源 40%^[14~16]. 而且, 亚硝酸盐的还原会强化反硝化速率, 减少硝化和反硝化过程分别产生的约 33% ~ 35% 和 55% 的污泥生成量, 并降低 20% CO_2 的释放量^[16,17]. 因此, 随着全球性节能降耗行动的推进, 短程硝化-反硝化技术逐渐受到了人们的关注.

生物滤池脱氮基本原理是利用反应器内滤料上所附着生物膜的氧化分解作用, 滤料及生物膜的吸附截流作用, 以及生物膜内部微环境和缺氧反硝化作用, 达到脱氮的目的. 由于其占地面积省、具有良好的脱氮性能和吸附过滤性, 已成为污水再生处理领域研究和应用的热点^[18~20]. 不同于活性污泥法, 生物滤池的短程硝化作用不能依靠调整不同生长速率氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的污泥龄实现亚硝酸盐的积累^[21], 但生物膜系统也是通过抑制亚硝酸盐氧化为硝酸盐实现亚硝酸盐的积累, 主要抑制方法包括调整自由氨浓度、增高温度、降低 DO 浓度和升高 pH 值等方法^[21~23].

本研究以城市污水处理厂二级出水中氨氮和总氮为去除目标, 研究了生物滤池实现亚硝酸盐积累的影响因素, 探讨了沿生物滤池水流方向亚硝酸盐的积累趋势, 分析了短程硝化-反硝化生物滤池的脱氮效能, 以期完善生物滤池的短程脱氮机制和拓展其在污水深度处理领域的应用提供理论和数据支持.

1 材料与方法

1.1 实验装置

生物滤池反应器是由有机玻璃加工而成的柱状结构(见图 1), 设计流量为 $90 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$. 滤料采用球形黏土陶粒滤料, 堆积密度 $0.9 \sim 1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 粒径 $3 \sim 6 \text{ mm}$, 比表面积 $4 \sim 7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 其中短程硝化滤池直径 100 mm , 柱高 1900 mm , 滤料高度为 1600 mm , 底部布有 100 mm 高的砾石(直径为 $30 \sim 50 \text{ mm}$), 滤池采用水流和曝气上向流设计, 滤料沿程每隔 400 mm 设一个取样口. 反硝化滤池总高 1100 mm , 直径 100 mm , 亦采用上向流设计, 底部布有 100 mm 高的砾石, 滤料高度为 800 mm , 滤料沿程每隔 200 mm 设一个取样口.

1.2 实验用水和分析方法

实验用水由某城市污水处理厂二级出水与自来水及一些营养盐人工配制而成, 其中碳源、铵根离子、硝酸根离子和总磷分别由乙酸钠、氯化铵、硝

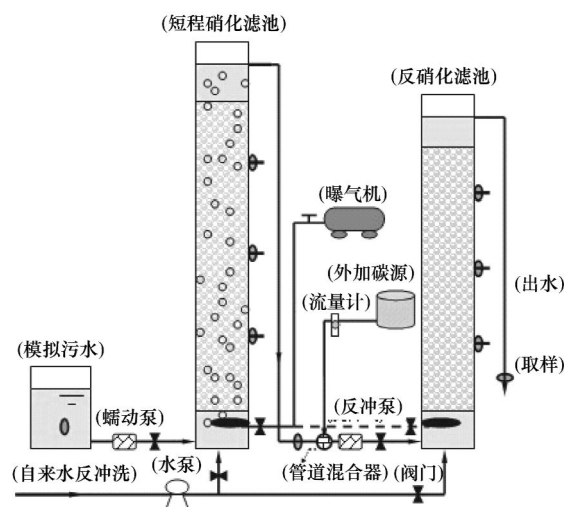


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Scheme of the experimental plant

酸钾、磷酸二氢钠配制. 主要水质指标 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、COD、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度范围度分别为 $40 \sim 50$ 、 $60 \sim 75$ 、 $0 \sim 0.05$ 和 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

分析方法: COD 采用快速测定法, 氨氮采用纳氏试剂光度法, 硝态氮采用酚二磺酸光度法, 亚硝态氮采用 N -(1-萘基)-乙二胺光度法, 总氮采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法, 具体分析测定方法如文献[24].

1.3 生物滤池的启动

滤料的挂膜方式采用接种法, 硝化生物滤池和反硝化生物滤池的接种污泥分别取自北京市某污水处理厂(A^2O 工艺)的好氧池和缺氧池.

硝化生物滤池的启动: 将滤料和好氧活性污泥混合后置入反应器中闷曝 3 d, 然后改为连续进水(其中 C、N 分别由乙酸钠和氯化铵提供). 运行 10 d 后, 反应器内滤料上附着大量丝状絮状体, 滤料表面包裹的生物膜颜色逐渐加深, 由灰白色绒状慢慢转变为浅黄色生物膜, 通过对上层滤料生物膜镜检发现, 生物膜中有大量的丝状微生物. 运行 15 d 后, 监测知 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别达到 82% 和 79%, 出水水质稳定, 启动完成.

反硝化生物滤池的启动: 将滤料和缺氧活性污泥混合置入反应器, 控制 pH 在 $7.0 \sim 8.0$ 之间(用 NaHCO_3 进行调节), 持续培养 2 d, 然后全部排掉. 从第 3 d 起改为连续进水(其中 C、N 分别由乙酸钠和硝酸钾提供). 运行 9 d 后, 出水中 COD 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度趋于稳定, 去除率分别达到 65% 和 82%. 通过对上层滤料生物膜镜检发现, 在滤料的凹陷表面吸附了大量的微生物, 主要有杆菌和球菌, 还有少量

的弧菌。

2 短程硝化生物滤池的影响因素

2.1 pH 值对短程硝化的影响

对于实验室稳定运行的硝化生物滤池,在调控进水 DO 浓度为 $(4.5 \pm 0.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、水温为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的条件下^[21],改变进水 pH(变化范围为 6.5 ~ 9),研究 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度的积累($\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的积累用 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度之比表征,在文中称为亚硝酸盐积累参数)。

随着 pH 值的变化,硝化生物滤池出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的变化如图 2 所示。可以发现,当 pH 为 7.5 ~ 9.0 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率 > 82%,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度低于 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 当 pH 为 8.5 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率最高,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度低于 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。图 3 表示了在不同 pH 时硝化生物滤池出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的积累和进出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度变化。在进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度几乎为 0、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 $43.2 \sim 49.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下,当 $\text{pH} > 7.0$ 时,硝化生物滤池出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度已经开始出现积累,当 $\text{pH} > 7.5$ 时,亚硝酸盐积累参数 > 2.9。当 pH 为 8.5 时,亚硝酸盐积累参数平均为 5.5,而 pH 为 9.0 时,亚硝酸盐积累参数又有所下降。

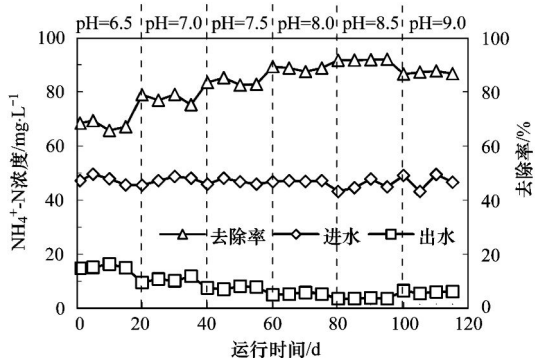


图 2 不同 pH 时生物滤池出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的变化

Fig. 2 Concentrations of ammonia nitrogen under different pH

结果表明,调控硝化工艺中重要参数 pH,可以实现短程硝化所需要的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积,且当 pH 为 8.5 时, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的累积达到最大。就硝化细菌的生长环境而言,硝酸细菌的最适 pH 一般为 6.0 ~ 7.5,亚硝酸细菌的适宜 pH 一般为 7.0 ~ 8.5^[4]。就硝化细菌的活性而言,研究发现 pH 为 7.4 ~ 8.3 时,亚硝酸细菌的活性较高,亚硝酸盐产生速率较快,最大值出现在 pH 为 8.0 附近;而硝酸细菌的活性在 pH 为 7.0 附近较高,此时硝酸盐产生速率亦较快,因此当

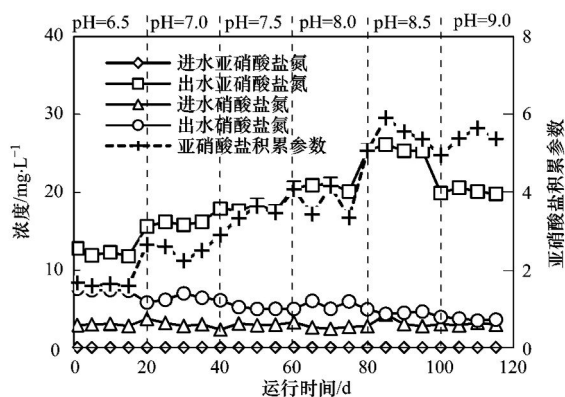


图 3 不同 pH 时硝化生物滤池出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的积累

Fig. 3 Variations of $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentrations under different pH

pH 较高时,亚硝酸菌成为优势菌种,从而导致了硝化反应器中亚硝酸盐的稳定累积^[8,12,13]。

2.2 沿程亚硝酸盐氮的积累及影响因素

对于实验室稳定运行的硝化生物滤池,实测进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 COD 浓度分别为 (47.2 ± 0.5) 、 (0.04 ± 0.017) 、 (2.86 ± 0.04) 和 $(62 \pm 2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 浓度为 $(4.7 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 8.52 ± 0.05 ,水温为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的条件下,沿水流方向从硝化生物滤池滤料底部(0 cm)至 40、80、120 和 160 cm 处分别取样,分析沿程 pH、DO 以及不同氮形态浓度的变化。

如图 4 所示,沿水流方向 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度逐渐降低,在末端 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度平均为 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中在滤料层高 80 cm 以下 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的降解速率较高,这主要是由于滤料下端 DO 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度较高,氨氧化细菌(即亚硝酸细菌)活性较强所导致^[4,12]。进水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度几乎为 0,实测值为 $(0.04 \pm 0.017) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在滤料层高 40 cm 处开始了积累,并在层

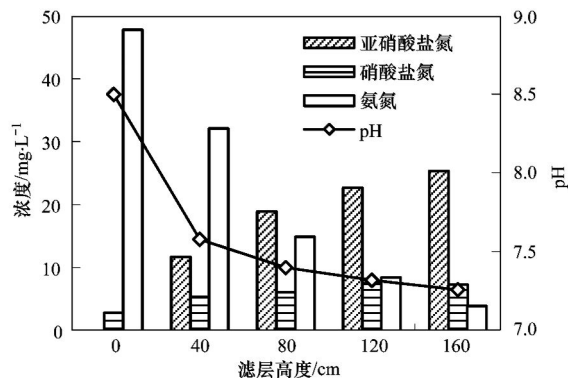


图 4 硝化生物滤池沿程氮浓度的变化

Fig. 4 Distributions of nitrogen concentration through the biological filter

高 > 120 cm 以后, 积累的速率逐渐降低. NO_3^- -N 浓度从进水的 $(2.86 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 到滤料层高 40 cm 时增加为 $(5.5 \pm 0.24) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 主要是由于滤池底部 DO 浓度较高 ($2 \sim 4.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右), 为部分亚硝酸盐氧化菌创造了条件, 使部分 NO_2^- -N 其转化为 NO_3^- -N; 当滤料层高度 > 40 cm 时, NO_3^- -N 的浓度保持稳定并有所下降. 而在出水端 NO_2^- -N 实现了较好的积累.

沿水流方向(滤料层高度由下而上), 亚硝酸积累参数(NO_2^- -N/ NO_3^- -N)呈增加趋势(见图 5), 在 0 ~ 80 cm 之间增加明显, 且在滤料层高为 40 cm 时亚硝酸积累参数就达到了 2.2, 实现了短程硝化所需的 NO_2^- -N 积累^[21,25]; 亚硝酸积累参数在滤料层高 80 ~ 120 cm 之间基本恒定, 而在 120 ~ 160 cm 之间又有所上升. 分析短程硝化的 2 个重要影响因素 pH 和 DO 可以发现, 沿水流方向 pH 逐渐降低, 到滤料层高 160 cm (即滤池出水口) 时 pH 降低为 7.3 (见图 4). pH 的逐渐降低主要是由于亚硝化过程需要消耗一定的碱度所导致^[4]. 沿水流方向 DO 浓度亦逐渐降低, 到滤料层高 160 cm (即滤池出水口) 时 DO 降低为 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (见图 5). 尽管在滤料层高 160 cm (即滤池出水口) 时 pH (平均为 7.3) 可以满足硝化细菌的生长^[4], 但是 DO 却已不能满足其生长需要^[4], 因此在滤料层高度 > 120 cm 时, NO_3^- -N 的浓度出现下降(见图 4).

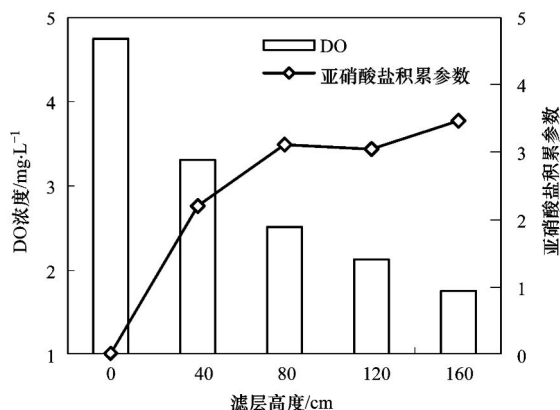


图 5 沿程 DO 浓度的变化及 NO_2^- -N 的积累

Fig. 5 Distributions of nitrogen concentration through the biological filter

在本研究条件下, 尽管生物滤池沿水流方向 pH 值逐渐降低, 会影响亚硝酸盐的积累, 但在生物滤池沿程也出现了 DO 浓度逐渐降低的趋势, 而较低的 DO 浓度有利于亚硝酸盐的积累^[26]. 这主要是由于亚硝酸细菌对氧的亲力和耗氧速率均高于硝酸细

菌, 较低的 DO 浓度 ($1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 有利于硝酸细菌的抑制、亚硝酸盐的积累^[9,7,12]. Bernet 等^[26] 研究生物膜反应器发现, 当 DO 浓度从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亚硝酸盐的积累逐渐缓和, 而硝酸盐逐渐产生; 但当 DO 浓度再下降到 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亚硝酸盐的积累又恢复. 在本研究中可以发现沿生物滤池水流方向, 通过 pH 和 DO 沿程变化的交替调控, 在反应器出水口实现了良好的亚硝酸盐积累. 但是温度的控制和 DO 浓度的降低哪个是决定因素还有待进一步研究. 此外, 亚硝酸盐积累的形成还跟生物滤池独特的结构特征和运行方式有关, 较低的溶解氧和定期的反冲洗又使得竞争能力较弱的亚硝态氮氧化细菌不能在反应器内形成优势群体而被自然淘汰, 因而氨氧化产生的亚硝酸盐氮出现积累^[27].

2.3 短程硝化生物滤池的运行效果

根据上述研究结果, 在调节生物滤池进水 DO 浓度为 $(4.7 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 8.5 ± 0.05 、水温为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的条件下, 实测进水 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 COD 浓度分别为 (42.8 ± 3.0) 、 (0 ± 0.02) 、 (2.6 ± 0.3) 和 $(64.7 \pm 5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 短程硝化生物滤池稳定运行效果如图 6 所示. 短程硝化生物滤池出水 NH_4^+ -N 平均为 $4.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (浓度范围 $3.2 \sim 5.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 平均去除率为 90%; 出水中的 TN 主要由 NO_2^- -N 浓度控制; 出水 NO_3^- -N 平均为 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比进水浓度有所增加; 而亚硝酸积累参数 (NO_2^- -N/ NO_3^- -N) 平均为 4.8 (范围 4.0 ~ 5.8), 说明反应器较好地实现了亚硝酸盐氮的积累.

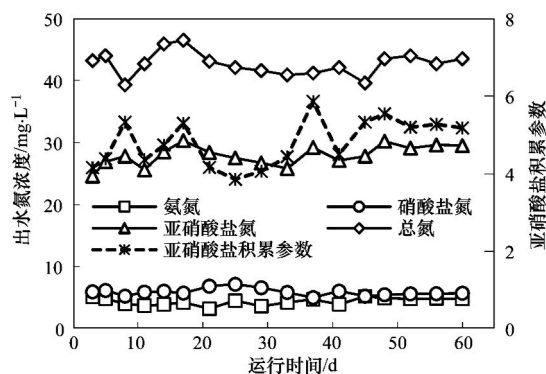


图 6 短程硝化生物滤池出水氮浓度及 NO_2^- -N 的积累

Fig. 6 Concentrations of nitrogen in the effluent of partial nitrification biological filter

3 短程硝化-反硝化生物滤池脱氮研究

将已经稳定运行 60 d 的短程硝化生物滤池, 与已经稳定运行的反硝化生物滤池串联, 短程硝化-反

硝化生物滤池工艺流程如图 1 所示. 调节进水条件同 2.3 节所述, 研究短程硝化-反硝化生物滤池的脱氮效果以及碳源对反硝化效果的影响. 碳源投加点设在反硝化生物滤池的进水管上, 在短程硝化-反硝化生物滤池运行初期 (0 ~ 24 d) 不投外加碳源 (工况 1); 运行第 25 d 开始添加乙酸钠作为外加碳源 (工况 2).

图 7 表示了短程硝化-反硝化生物滤池在运行过程中碳源浓度的变化, 由于该实验是模拟城市污水处理厂二级出水, 因此反应器进水中 COD 平均浓度 $64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 也即短程硝化生物滤池的进水 COD 浓度, 经过硝化反应后, 短程硝化生物滤池出水中的 COD 浓度平均为 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (见图 7), 短程硝化对 COD 的去除效率达到 90% 以上, 但是出水中的有机物浓度远不能满足后续反硝化菌的脱氮需求. 从图 8 可以看出, 在工况 1 反硝化生物滤池出水 TN、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 平均浓度分别为 $40.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 没有任何脱氮效果, 这主要是由于反硝化生物滤池的碳源不足所导致^[28].

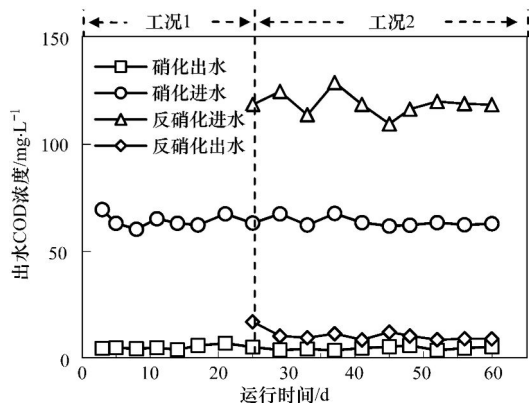


图 7 短程硝化-反硝化生物滤池 COD 的浓度变化

Fig. 7 Changes of COD concentration in the partial nitrification-denitrification biological filter

在工况 2 添加碳源, 使得反硝化进水中 COD 平均浓度为 $118.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD/TN 平均约为 3.0, 此时反硝化生物滤池出水 COD 浓度为 $10.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 反硝化出水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均浓度为 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与短程硝化生物滤池出水中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度 (平均为 $4.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 基本相同, 这是由于在反硝化生物滤池中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除主要靠反硝化细菌的合成作用, 因此去除率不高. $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度则迅速降到很低, 其出水浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 此时出水 TN 浓度则随之降低到 $8 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围, TN 去除率稳定在 79% ~ 81% 左右.

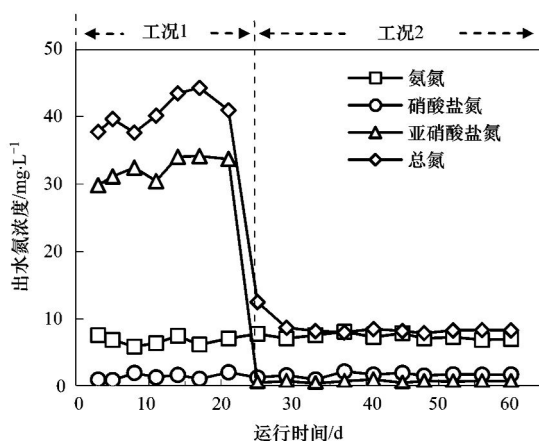


图 8 反硝化生物滤池出水氮浓度的变化

Fig. 8 Efficiency of nitrogen removal by the denitrifying biological filter

4 结论

(1) 针对城市污水处理厂二级出水中的氨氮和总氮, 在实验模拟条件下, 当 DO 浓度为 $(4.5 \pm 0.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水温为 $(30 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 时, 提高进水 pH 值利于硝化生物滤池中亚硝酸盐的积累, 实现了短程硝化, 当 pH 值平均为 8.5 时, 亚硝酸盐的积累达到最大.

(2) 沿生物滤池水流方向, 硝化生物滤池中亚硝酸盐积累参数 ($\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NO}_3^- \text{-N}$) 呈增加趋势. 水温为 $(30 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 时, 生物滤池沿程通过 pH 和 DO 变化的交替调控, 在反应器出水口实现了亚硝酸盐较好的积累.

(3) 短程硝化-反硝化生物滤池对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有较好的去除效率 (90% 以上). 反硝化生物滤池进水中添加适当碳源, 当 COD/TN 为 3.0 时, 反硝化生物滤池出水 TN 的浓度降低到 $8 \sim 9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围, 其去除率稳定在 79% ~ 81%.

参考文献:

- [1] Bixio D, Thoeye C, Wintgens T, et al. Water reclamation and reuse: implementation and management issues [J]. Desalination, 2008, 218(1-3): 13-23.
- [2] Cheng H F, Hu Y N, Zhao J F. Meeting China's water shortage crisis: current practices and challenges [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(2): 240-244.
- [3] 胡洪营, 吴乾元, 黄晶晶, 等. 再生水水质安全评价与保障原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 263-273.
- [4] 张自杰. 排水工程 (下册) [M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 310-314.
- [5] Ahn Y H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review [J]. Process Biochemistry, 2006, 41(8): 1709-1721.
- [6] Komaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J].

- Environmental Science & Technology, 2010, **44** (19): 7245-7253.
- [7] Sinha B, Annachhatre A P. Assessment of partial nitrification reactor performance through microbial population shift using quinone profile, FISH and SEM [J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(18): 3602-3610.
- [8] Biswas R, Bagchi S, Bihariya P, *et al.* Stability and microbial community structure of a partial nitrifying fixed-film bioreactor in long run [J]. Bioresource Technology, 2011, **102** (3): 2487-2494.
- [9] Aslan S, Miller L, Dahab M. Ammonium oxidation via nitrite accumulation under limited oxygen concentration in sequencing batch reactors [J]. Bioresource Technology, 2009, **100** (2): 659-664.
- [10] Guo J, Peng Y Z, Huang H J, *et al.* Short-and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **179**(1-3): 471-479.
- [11] Chen J, Zheng P, Yu Y, *et al.* Enrichment of high activity nitrifiers to enhance partial nitrification process [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(19): 7293-7298.
- [12] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(1): 335-342.
- [13] Van Hulle S W H, Volcke E I P, Teruel J L, *et al.* Influence of temperature and pH on the kinetics of the Sharon nitrification process [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2007, **82**(5): 471-480.
- [14] Abeling U, Seyfried C F. Anaerobic-aerobic treatment of high strength ammonium wastewater nitrogen removal via nitrite [J]. Water Science and Technology, 1992, **26**(5-6): 1007-1015.
- [15] Katsogiannis A N, Kornaros M, Lyberatos G. Enhanced nitrogen removal in SBRs bypassing nitrate generation accomplished by multiple aerobic/anoxic phase pairs [J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(11): 53-59.
- [16] Turk O, Mavinic D S. Benefits of using selective inhibition to remove nitrogen from highly nitrogenous wastes [J]. Environmental Technology Letters, 1987, **8** (1-12): 419-426.
- [17] Peng Y Z, Zhu G B. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, **73**(1): 15-26.
- [18] Jeong J, Hidaka T, Tsuno H, *et al.* Development of biological filter as tertiary treatment for effective nitrogen removal: Biological filter for tertiary treatment [J]. Water Research, 2006, **40**(6): 1127-1136.
- [19] Farabegoli G, Chiavola A, Rolle E. The Biological Aerated Filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **171**(1-3): 1126-1132.
- [20] Ryu H D, Kim D, Lim H E, *et al.* Nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater in four-stage biological aerated filter system [J]. Process Biochemistry, 2008, **43** (7): 729-735.
- [21] Brockmann D, Morgenroth E. Evaluating operating conditions for outcompeting nitrite oxidizers and maintaining partial nitrification in biofilm systems using biofilm modeling and Monte Carlo filtering [J]. Water Research, 2010, **44**(6): 1995-2009.
- [22] Chung J, Bae W, Lee Y W, *et al.* Shortcut biological nitrogen removal in hybrid biofilm/suspended growth reactors [J]. Process Biochemistry, 2007, **42**(3): 320-328.
- [23] Chen S K, Juaw C K, Cheng S S. Nitrification and denitrification of high-strength ammonium and nitrite wastewater with biofilm reactor [J]. Water Science and Technology, 1991, **23** (7-9): 1417-1425.
- [24] 国家环境保护局. 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. 220-280.
- [25] Zhang Y X, Zhou J T, Zhang J S, *et al.* An innovative membrane bioreactor and packed-bed biofilm reactor combined system for shortcut nitrification-denitrification [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(5): 568-574.
- [26] Bernet N, Dangcong P, Delgene's J P, *et al.* Nitrification at low oxygen concentration in biofilm reactor [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, **127**(3): 266-271.
- [27] 马军, 邱立平. 曝气生物滤池中的亚硝酸盐积累及其影响因素 [J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 84-90.
- [28] Tseng C C, Portter T G, Koopman B. Effect of influent chemical oxygen demand to nitrogen ratio on a partial nitrification/complete denitrification process [J]. Water Research, 1998, **32**(1): 165-173.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 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