

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

FNA 对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化

马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 本研究采用交替厌氧/好氧 (An/O) SBR 反应器, 在 21~23℃ 的条件下启动系统并长期投加亚硝酸盐, 考察游离亚硝酸 (FNA) 对系统好氧吸磷性能的长期抑制作用及驯化后污泥吸磷方式的转化。结果表明, 投加 FNA 后, 污泥的释磷和吸磷能力不仅未受到抑制, 比释磷速率和比吸磷速率反而高于投加前。FNA 浓度 (以 $\text{HNO}_2\text{-N}$ 计) 低于 $0.53 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统除磷率均大于 96.9%; 当 FNA 浓度提高至 0.99×10^{-3} 、 1.46×10^{-3} 、 $1.94 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统除磷率均会大幅下降, 分别经过 50、12、30 d 的运行, 除磷率恢复至 64.42%、67.33%、44.14%, 说明抑制作用导致的除磷性能恶化可以恢复且长期驯化作用能缩短恢复过程。值得注意的是, 在低于 $1.46 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 随着 FNA 投加量的提高, 好氧段亚硝酸盐的损失量不断增大。研究还发现, 经 FNA 长期抑制的好氧除磷系统内污泥吸磷方式发生转变, 硝酸盐型和亚硝酸盐型缺氧吸磷能力分别为驯化前的 3.35 倍和 3.86 倍, 说明长期投加 FNA 有利于富集以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌; 而且, 长期驯化有利于系统内污泥的沉降。

关键词: 游离亚硝酸 (FNA); 好氧吸磷; 长期; 抑制; 转化

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2015)10-3786-08 **DOI:** 10.13227/j.hjks.2015.10.030

Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge

MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, SUN Lei-jun, SUN Hong-wei, CHEN Yong-zhi

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: An alternating anaerobic/oxic (An/O) sequencing batch reactor (SBR) was employed to investigate the long-term inhibitory effect of free nitrous acid (FNA) on aerobic phosphorus uptake performance and variation of phosphorus uptake properties of the sludge by adding nitrite. The reactor was started up under the condition of 21-23℃. The results showed that FNA had no impact on phosphate release and uptake capacities of the sludge. However, the specific phosphate release/uptake rates was found to be higher. As FNA concentration (measure by $\text{HNO}_2\text{-N}$) was lower than $0.53 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, phosphorus removal efficiency of the system was higher than 96.9%. When the FNA concentration was increased to 0.99×10^{-3} $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $1.46 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1.94 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the phosphorus removal performance deteriorated rapidly. The phosphorus removal efficiency was recovered to 64.42%, 67.33% and 44.14% after 50, 12 and 30 days, respectively, which implied the deterioration of phosphorus removal performance caused by FNA inhibition could be recovered and long-term acclimation could shorten the recovery process. Notably, increasing nitrite consumption appeared during aerobic phase with the concentration of FNA below $1.46 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. It was also observed that the phosphorus uptake properties of the sludge varied after long-term inhibition. Nitrate and nitrite type anoxic phosphorus uptake capacity was increased by 3.35 and 3.86 times, respectively, suggesting long-term dosing FNA may facilitate the denitrifying of polyphosphate in organisms utilizing nitrite as electron acceptor. Moreover, long-term acclimation favored sludge settling.

Key words: free nitrous acid (FNA); aerobic phosphate uptake; long-term; inhibition; variation

氮、磷的过量排放是引起水体富营养化的主要原因。传统生物营养物去除系统中, 氮的去除通过两个阶段完成, 即好氧硝化和缺氧反硝化, 而磷的去除则是利用聚磷微生物 (polyphosphate accumulating organisms, PAOs) 的厌氧释磷及好氧 (或缺氧) 超量吸磷特性在交替厌氧/好氧运行环境下实现^[1~4]。

对于可实现同步脱氮除磷功能的污水处理厂工艺, 硝化和好氧吸磷通常在同一个反应池中进行。脱氮过程的中间产物——亚硝酸盐, 在硝化和反硝化过程中均会产生。在当今能源危机及倡导低碳节能技术的时代背景下, 短程脱氮工艺因其处理效率

高、能源消耗低及污泥产量少等优点受到众多研究者和污水厂运营管理者青睐, 采用短程脱氮技术便意味着好氧过程中有更多量亚硝酸盐的积累。近几年, 关于亚硝酸盐对污水生物处理系统各菌群抑制特性的研究颇多^[5~11], 其中以澳大利亚昆士兰大学 Yuan Zhiguo 教授课题组的研究最为深入, 其研究结果表明, 污水脱氮除磷系统内的真正抑制剂是亚硝

收稿日期: 2015-03-23; 修订日期: 2015-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51168027, 51168028); 甘肃省科技计划资助项目 (145RJZA093); 甘肃省财政厅基本科研业务费专项 (213065)

作者简介: 马娟 (1978~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: meggyrna@163.com

酸盐的质子化产物——游离亚硝酸(free nitrous acid, FNA)而非亚硝酸盐本身^[12~20]。截至目前,关于 FNA 的研究主要包括对氨氧化细菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)、反硝化细菌及聚磷菌等微生物增殖与产能的抑制作用^[14~23]。然而,上述研究大多采用批式试验,关于 FNA 长期抑制作用的研究鲜有报道。实验室研究和实际污水处理厂运营经验显示,原有的生物营养物去除工艺极易丧失其除磷功能,此外,对实现短程脱氮的污水处理厂的调查发现,好氧段亚硝酸盐积累量基本维持在 20 mg·L⁻¹ 以内,因此,考察该浓度范围内的亚硝酸盐及相应浓度的 FNA 对好氧吸磷系统的长期抑制作用尤为必要。

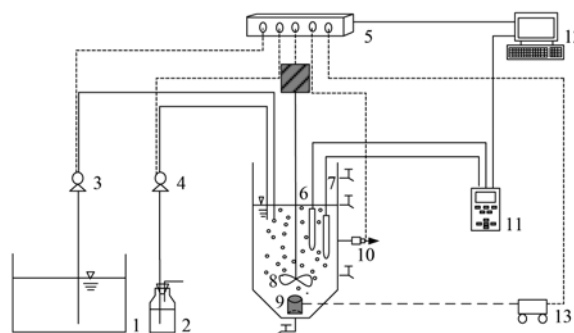
本研究采用交替厌氧/好氧(An/O)SBR 反应器,在温度为 21~23℃ 的条件下启动该脱氮除磷系统并向系统内长期投加亚硝酸盐,以考察 FNA 对好氧吸磷性能的长期抑制作用及驯化后污泥吸磷方式的转化。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行

SBR 反应器由有机玻璃制成,上部为圆柱形,底部为圆锥体,总有效容积 5.4 L。反应器壁垂直方向设置一排间距 10 cm 的取样口,用于取样和排水,底部设有排泥口;曝气采用空气压缩机,气量由转子流量计调节,黏砂块曝气头用以向混合液传递氧气;反应器进/出水、搅拌、曝气及运行阶段的 pH 值调节均采用带有 Labview 软件编程的计算机系统加以控制,试验装置如图 1 所示。

反应器每天运行 3 个周期,每周期 8 h,包括 2 h



1. 水箱; 2. HCl 溶液; 3. 蠕动泵; 4. 流量型蠕动泵; 5. pH 控制系统; 6. pH 探头; 7. DO 探头; 8. 搅拌装置; 9. 黏砂块曝气头; 10. 电磁阀; 11. Multi 3420 在线测定仪; 12. 计算机; 13. 空气压缩机

图 1 SBR 生物除磷反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR for enhanced biological phosphorus removal

厌氧, 5 h 好氧及 1 h 沉淀、排水、闲置, 试验总共进行 178 d, 分为 6 个工况, 各工况在厌氧结束, 即好氧初始阶段瞬时投加不同量亚硝酸盐浓缩液, 使混合液内 NO₂⁻-N 浓度分别为 0、2、5、10、15、20 mg·L⁻¹, 相应的 FNA 浓度由公式:

$$\text{FNA} = S_{\text{N-NO}_2} / K_a \times 10^{\text{pH}}$$

$$K_a = e^{-2.300 / (273 + t)}$$

计算所得。反应器排水比为 1/3, 温度保持在 21~23℃, pH 值维持在 6.9~7.5 之间, 污泥龄为 10 d。

缺氧吸磷小试: 分别于试验各工况的稳定运行期间进行, 厌氧结束后于 SBR 反应器取泥水混合液置于 2 L 反应瓶中加电解质溶液洗泥, 缺氧段初始瞬时投加磷(PO₄³⁻-P = 20 mg·L⁻¹)和电子受体(NO₂⁻-N 或 NO₃⁻-N 10 mg·L⁻¹), 反应共进行 5 h, 其他条件同母反应器。

1.2 试验水质及接种污泥

试验用模拟废水由碳源液、磷液、浓缩液及微量元素配制而成。碳源液由乙酸钠配制而成, 磷液由 KH₂PO₄ 配制而成, 其中溶解性正磷酸盐(PO₄³⁻-P)质量浓度为 4 g·L⁻¹。浓缩液(1 L)由 53.5 g NH₄Cl, 45 g MgSO₄·7H₂O, 18 g KCl 组成, 微量元素液^[27](1 L)由 5.51 g 柠檬酸, 4.03 g 苯甲酰胺基醋酸, 3.03 g FeCl₃·6H₂O, 0.5 g H₃BO₃, 0.12 g CuSO₄·5H₂O, 0.06 g KI, 0.24 g MnCl₂·4H₂O, 0.06 g NaMoO₄·2H₂O, 0.3 g ZnSO₄·7H₂O, 0.06 g CoCl₂·6H₂O, 10 g EDTA, 0.06 g NaMoO₄·2H₂O, 0.06 g NiCl₂·6H₂O 组成。1 L 模拟废水加入磷液 2 mL, 碳源液乙酸钠 6.08 g 溶于水中、浓缩液 1 mL 及微量元素液 1 mL, 由此得出, 进水中主要污染物为 COD 400(1~138 d)或 550 mg·L⁻¹(138~178 d), PO₄³⁻-P 8 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 14 mg·L⁻¹。

接种污泥取自甘肃省兰州市七里河区污水处理厂 4 号曝气池, 该污水厂污泥具有一定脱氮除磷性能, 污泥各项指标性能良好。

1.3 分析项目及方法

水质分析项目中, COD 采用 COD 快速测定仪测定, PO₄³⁻-P 采用钼锑抗分光光度法测定, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法测定, NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定, NO₃⁻-N 采用麝香草酚分光光度法测定, MLSS, MLVSS 采用滤纸重量法测定, SV 采用 30 min 沉降法测定。温度、pH 值和溶解氧(Dissolved oxygen, DO)测定采用德国 Multi 3420 在线测定仪在线监测。

2 结果与讨论

2.1 不同 FNA 浓度下系统的污染物去除性能

反应器运行期间,检测发现出水 COD 浓度均低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进水中 95% 以上 COD 被去除,说明本研究采用的 FNA 浓度对 COD 降解没有影响。

图 2 为各工况条件下,投加不同浓度亚硝酸盐后反应器出水各形态氮及总氮的去除情况。从中可知,在反应器运行的 178 d 内,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 始终未检出,去除率达 100%; 对各运行工况的周期监测也显示, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 60 min 均已彻底降解(未给出),说明本研究采用的 FNA 浓度对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除没有影响,对比发现,本研究 FNA 最高浓度(以 $\text{HNO}_2 - \text{N}$ 计,下

同)为 $1.94 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与已有报道的 AOB 活性受抑制程度为 50% 时对应的 FNA 浓度相差近 100 倍^[14],进一步证明常规污水处理厂由亚硝酸盐积累所得 FNA 对 AOB 的增殖与产能代谢活动影响甚微。此外,亚硝酸盐投加量为 $0 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,系统出水中残留的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 量均小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累量则随着好氧初始阶段 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 投量的加大而增多,最高投加量对应的平均值为 $5.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总氮损失率一直保持平稳,均高于 80%。亚硝酸盐投量提升至 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后,出水逐步出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累,平均值达 $4.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均积累量也升至 $9.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总氮损失率仅为 56.88%。

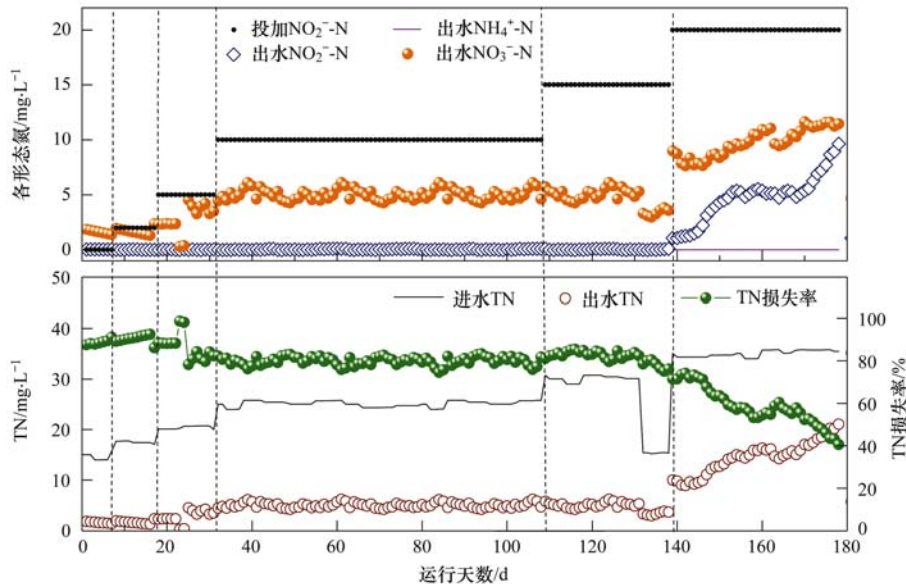


图 2 不同 FNA 浓度下系统出水各形态氮及总氮去除情况

Fig. 2 Nitrogen in effluent and total nitrogen removal of the system under different FNA levels

表 1 列出了不同 FNA 浓度下好氧阶段氮的转化情况。从中可以看出,各工况下,好氧初始阶段投加的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 损失量由未投加时的 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐升至投加 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 $11.495 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验的第 132 ~ 138 d,撤销进水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,结合图 2 发现,好氧段投加的 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化为出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的量仅有 $3.382 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,该时间段同本工况未撤销进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累量差值为 $1.725 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 投量为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,即进入体系内的氮仅由进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 提供时的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累量 ($1.617 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 相当。同时,对各工况下混合液溶解氧的在线监测显示,进入好氧阶段后,溶解氧在 30 min 内均快速升至 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,该环境并不利于同步硝化反硝化作用,而且此后体系内 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度仍保

持下降趋势, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度却趋于平稳,说明 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化在好氧阶段的前 30 min 内已基本完成,后 270 min 内 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 并非被 NOB 利用,其消耗可能由其他菌种完成,这一现象与 Pijuan 等的研究一致^[17]。还值得一提的是,好氧阶段 30 min 后混合液中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度同时下降,众所周知,除 O_2 外 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 也能被 PAOs 利用,不同的是 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 作为电子受体用以吸磷在缺氧条件下进行,因此,如果假设有 O_2 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 两种电子受体同时存在的情况下,排除 PAOs 利用不同电子受体吸磷的产能差异, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 O_2 对 PAOs 具有相同竞争力,因而, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在好氧条件下同样能被 PAOs 利用,这才合理解释了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在好氧段大量损失这一现象。

表 1 不同 FNA 条件下好氧阶段氮的转化量¹⁾

Table 1 Variation of nitrogen in aerobic phase under different FNA levels					
运行天数 /d	NO ₂ ⁻ -N投加量 /mg·L ⁻¹	FNA 平均值 /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N积累量 /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N积累量 /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N损失量 /mg·L ⁻¹
0~7	0	0	0.019±0.000	1.617±0.168	0
8~17	2	0.19×10 ⁻³	0.009±0.007	1.692±0.311	1.925±0.039
18~31	5	0.53×10 ⁻³	0.015±0.008	2.796±1.292	3.821±0.055
32~108	10	0.99×10 ⁻³	0.032±0.014	5.009±0.500	6.595±0.061
109~131	15	1.46×10 ⁻³	0.034±0.013	5.107±0.494	11.495±0.156
132~138	15 ²⁾	1.46×10 ⁻³	0.030±0.013	3.382±0.303	11.588±0.204
139~178	20	1.94×10 ⁻³	4.751±0.840	9.766±1.289	7.119±0.825

1) 表中数据形式为平均值±标准偏差; 2) 代表该试验阶段进水NH₄⁺-N=0 mg·L⁻¹, 其余为 14 mg·L⁻¹

图 3 为不同 FNA 浓度下系统进、出水及厌氧末期的PO₄³⁻-P浓度及其去除率。从中可见,除投加 20 mg·L⁻¹ NO₂⁻-N的前 30 d 外,投加NO₂⁻-N后系统厌氧末期磷浓度平均高于投加前。本研究中NO₂⁻-N投加量<5 mg·L⁻¹,即折合 FNA 浓度低于 0.53×10⁻³ mg·L⁻¹时,系统的出水PO₄³⁻-P浓度虽有小幅波动但很快能趋于稳定,除磷率保持在 95% 以上,出水浓度低于 0.5 mg·L⁻¹。进一步提高 FNA 浓度至 0.99×10⁻³ mg·L⁻¹后,系统除磷性能迅速恶化,出水磷浓度严重超标,在改变 FNA 浓度的前 4 d 内,磷几乎无去除,此后由于系统中 PAOs 对 FNA 的适应能力逐步增强,污泥除磷性逐渐恢复,但恢复所需时间较长,50 d 后除磷率平均恢复至 64.42%,最高 71.1%。上述 FNA 浓度对应的吸磷性能受抑制程度明显低于文献报道的 FNA 临界浓度分别为 0.000 5 mg·L⁻¹和 0.001 mg·L⁻¹时所对应的吸磷性能受抑制程度 50% 和 75%^[17]。以上分析表明,FNA

对 PAOs 好氧吸磷能力的不利影响可通过长期运行逐步恢复,但不能完全恢复。在此期间的某个周期内,撤销 FNA 投加试验发现,系统的除磷能力有一定程度的提高,说明 FNA 对好氧吸磷性能的抑制是可逆的。增大NO₂⁻-N投量至 15 mg·L⁻¹,即 FNA 为 1.46×10⁻³ mg·L⁻¹,出水磷浓度在改变工况后再次出现大幅下降,但对比上一个工况,波动的幅度有所减小。分析认为,由于长期投加NO₂⁻-N的驯化效应使得 PAOs 对 FNA 的适应能力增强,该工况内经过 12 d 运行系统除磷率平均恢复至 67.33%,较前一工况的恢复过程大为缩短。再次提高 FNA 浓度至 1.94×10⁻³ mg·L⁻¹,除磷率再度大幅波动,在该工况的前 10 d 内,出水PO₄³⁻-P浓度有时甚至高于进水浓度,之后,除磷率经过 20 d 逐步恢复到 44.14%。

由于最后一个工况出水中存在大量NO₂⁻-N和 NO₃⁻-N积累(图 2),试验后期还曾提高进水 COD 浓度至 550 mg·L⁻¹以期加强反硝化从而改善系统除

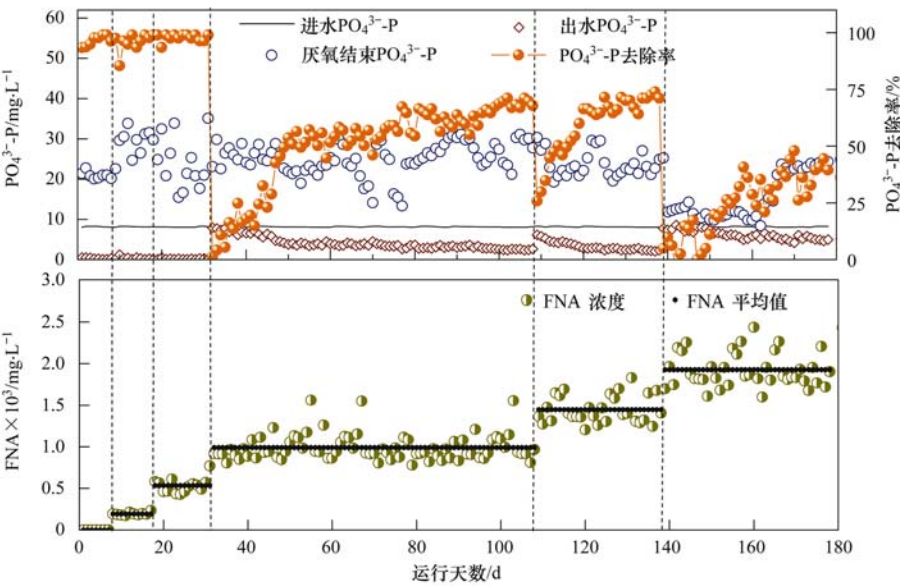


图 3 不同 FNA 浓度下系统各阶段磷浓度及其去除率

Fig. 3 Concentrations of phosphorus at different phase and its removal efficiency under different FNA levels

磷性能(未给出),经过近 40 d 的运行该阶段出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 积累量逐步下降至 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而厌氧末期 PO_4^{3-} -P 浓度则在提高碳源量后即刻由原来的 $24.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 大幅上升至 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,好氧吸磷量亦由 $17.71 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $45.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 尽管如此,对出水 PO_4^{3-} -P 的监测却发现其去除率不升反降,随后缓慢恢复至 25% 左右. 分析认为,提高 COD 可减缓 PAOs 与异养反硝化菌对碳源的争夺,而由此提高的释磷量导致聚磷菌吸磷负荷增大,从而引起除磷率因吸磷时间不足而下降的现象,但释磷量和吸磷量的增大,即 PAOs 的比释磷速率和比吸磷速率均提高至未增加碳源量的 2 倍以上,反映出提高进水碳源有助于缓解 FNA 对好氧吸磷的抑制.

2.2 不同 FNA 浓度下系统典型周期内污染物的变化规律

图 4 为不同工况下系统典型周期内 PO_4^{3-} -P 和各形态氮及 DO 的浓度变化规律. 从中可知,试验进行的 6 个工况内均有释磷和吸磷现象且最大释磷浓度出现在厌氧结束时刻. 在各工况厌氧时段内,DO 浓度维持在极低范围,即 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,PAOs 将体内聚磷以正磷酸盐的形式释放出来并产生能量,进而利用该能量吸收混合液中的挥发性脂肪酸 (VFAs) 并以聚羟基脂肪酸 (PHAs) 的形式贮存在体

内;在此期间, NH_4^+ -N 浓度由于活性污泥的吸附作用有小幅降低 ($< 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 好氧时段内,DO 浓度从 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 快速升至 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,PAOs 以降解除 PHAs 为能量来源实现微生物生长、糖原合成以及磷的过量吸收; NH_4^+ -N 被快速降解转化为 NO_2^- -N,并最终转化为 NO_3^- -N. 工况 1 中,即系统的启动阶段,厌氧段结束时的磷浓度为 $25.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; NH_4^+ -N 维持在 $3.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上. 好氧阶段,DO 浓度快速升高并维持在 $4 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,PAOs 在反应时间内完成吸磷过程,出水 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; NH_4^+ -N 在有氧条件下快速降解,反应末端出现 $1.617 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_3^- -N 积累. 工况 2 中,尽管在厌氧段结束时刻向系统内投加浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_2^- -N,但厌氧释磷量较工况 1 有大幅升高,磷浓度达 $42.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 分析认为,由于 FNA 的解耦联作用,PAOs 必须提高呼吸速率,即分解更多的聚磷 (Poly-P) 以泵出更多质子从而维持质子驱动力 (PMF) 的恒定. 研究还发现,由于释磷量的提高导致 PAOs 在好氧段的负荷增大,但吸磷过程在反应时间内仍能彻底完成,说明 PAOs 的吸磷能力有所提高;对好氧初始阶段向系统投加的 NO_2^- -N 浓度测定及数据分析发现, NO_2^- -N 投加总量出现 95% 以上的损失,仅有剩余一小部分转化为 NO_3^- -N,说明 NO_2^- -N 在好氧阶段被除亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 以

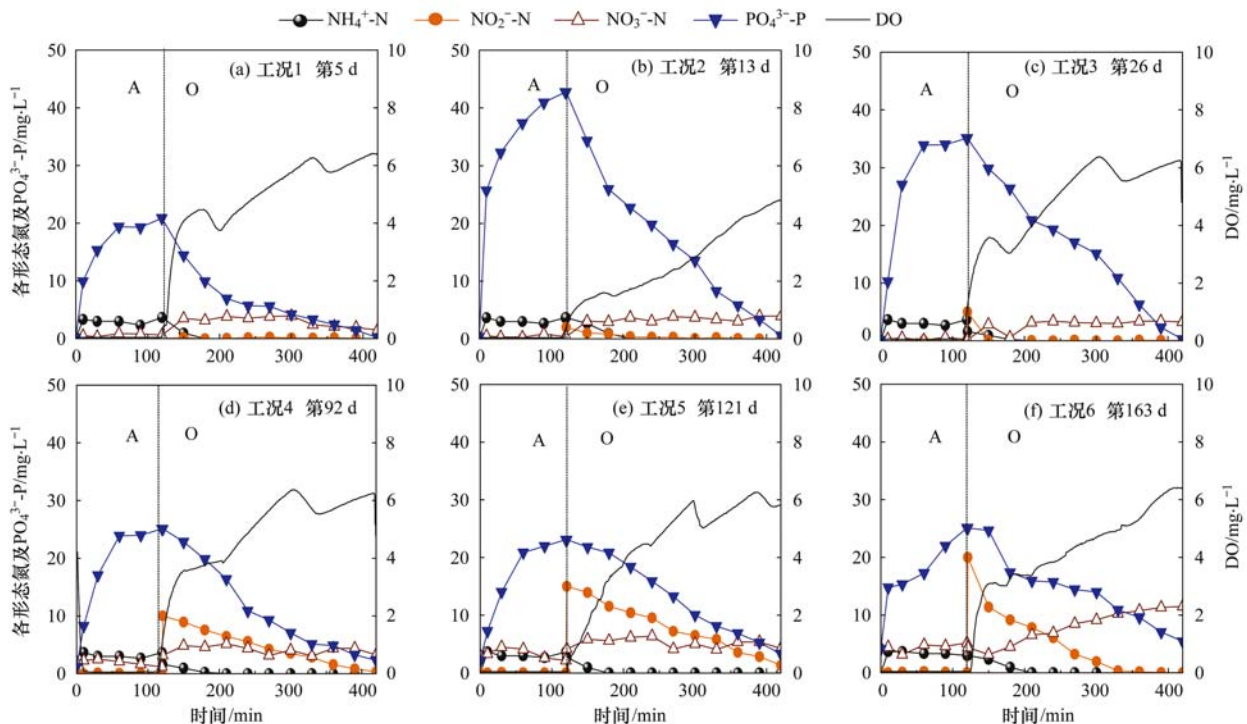


图 4 不同 FNA 浓度下典型周期内各形态氮及 PO_4^{3-} -P 的浓度变化规律

Fig. 4 Variation of nitrogen and phosphorus concentrations of typical cycles under different FNA levels

外的其他微生物所消耗,但具体被哪种微生物菌群利用及其降解机制仍不明确。工况 3 中, NO_2^- -N 的投加量提高至 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,除磷率仍接近 100%,说明 FNA 浓度低于 $0.53 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,系统的除磷性能未受抑制。工况 4,即 NO_2^- -N 投加量为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,换算为 FNA 浓度为 $0.99 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,除磷性能开始出现受抑制现象,表现为厌氧末端磷浓度降至 $25.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 且好氧阶段吸磷能力减弱,反应结束时仍有 $2.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PO_4^{3-} -P 残留。进一步加大 NO_2^- -N 投加量至 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (工况 5,6),即 FNA 为 $1.46 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.94 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,抑制现象更加明显,厌氧释磷量及好氧吸磷量进一步减少,且系统内 NO_3^- -N 的积累量逐步提高。

2.3 不同浓度 FNA 对系统比释/吸磷速率的影响

图 5 为不同 FNA 浓度下,各工况稳定运行时系统的比释磷速率和比吸磷速率。从中可见,投加 FNA 后,反应器混合液的比释磷速率和比吸磷速率均高于投加前。结合图 3 不难发现,聚磷菌的释磷和吸磷能力在短期内会受到 FNA 抑制,而长期运行其活性会逐步恢复,由此推测,PAOs 可能是借还原亚硝酸盐用以解毒。对各浓度条件下的比反应速率曲线拟合发现,随着 FNA 浓度的增高,系统比释/吸磷速率呈现先增大后减小的抛物线趋势,说明低浓度的 FNA ($< 0.99 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 不仅未抑制污泥的释磷及吸磷能力,反而起到了促进作用,这一现象可以由 FNA 的解耦联作用解释。通过对荧光假单胞菌的研究,研究者证实了 FNA 可以作为质子载体透过细胞膜且在膜两侧往复运动而不产生能量^[25~27],但 FNA 的解耦联作用导致其透过细胞膜

后胞外驱动质子的能量增加,因此,PAOs 必须提高呼吸速率,即分解更多的聚磷(Poly-P)以泵出更多质子从而维持质子驱动力的恒定^[28]。对图 5 的分析还发现,比释磷速率的标准偏差范围均大于比吸磷速率的标准偏差范围,且比释磷速率的曲线变化趋势明显,说明 FNA 对厌氧放磷的影响大于好氧吸磷。

FNA 浓度高于 $0.99 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后,系统比释/吸磷速率呈现略减趋势。有学者提出,如果 PAOs 体内的亚硝酸盐还原酶(*nir*)在好氧条件下能将 NO_2^- 依次还原为 NO 、 N_2O 和 N_2 ,而 NO_2^- 或 NO 又与氧化还原酶反应,其产物会抑制 PAOs 的好氧呼吸,从而抑制能量产生,使 PAOs 体内糖原和 Poly-P 的合成以及细胞的生长受到影响^[29]。尽管如此,其真实的机制尚不清楚,因此,有关 FNA 对聚磷菌好氧吸磷的抑制机制有待进一步研究。

2.4 投加 FNA 前后污泥缺氧吸磷能力的变化

图 6 为系统投加 FNA 前后以 NO_2^- 和 NO_3^- 为电子受体的缺氧吸磷试验中 PO_4^{3-} -P 和 NO_x^- -N 的变化规律。对图 6(a) 中两种电子受体吸磷曲线进行线性拟合并分析可知,驯化前,系统以 NO_2^- 和 NO_3^- 为电子受体的反硝化吸磷均能进行,但 NO_3^- 型的比吸磷速率(以 VSS 计,下同)为 $7.95 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 及电子受体比利用速率为 $5.33 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 略高于 NO_2^- 型的比吸磷速率为 $7.32 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 及电子受体比利用速率 $5.06 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,而且,试验结束时系统中仍有少量 PO_4^{3-} -P 和电子受体存在。投加 FNA 驯化 65 d 后,对图 6(b) 的分析发现,两种类型缺氧吸磷的吸磷速率和电子受体利用速率均有大幅提升且污泥的缺氧吸磷方式发生转变, NO_3^- 型的比吸磷速率 $26.64 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 及电子受体比利用速率 $12.75 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 均小于 NO_2^- 型的比吸磷速率 $28.25 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 及电子受体比利用速率 $14.07 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,缺氧吸磷能力分别为驯化前的 3.35 倍和 3.86 倍。上述现象说明,向好氧吸磷系统内投加 FNA 并长期驯化有利于系统内筛选具有以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌。

2.5 不同 FNA 浓度下的系统污泥量及其沉降性能

图 7 为 FNA 投加量对系统内污泥量及其沉降性能的影响。从中分析可知,试验进行的前 20 d,系统混合液的 MLSS 值由 $4963 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。分析原因,FNA 的抑制作用致使部分微生物被杀灭或细胞增殖量低于排泥量,然而,经过

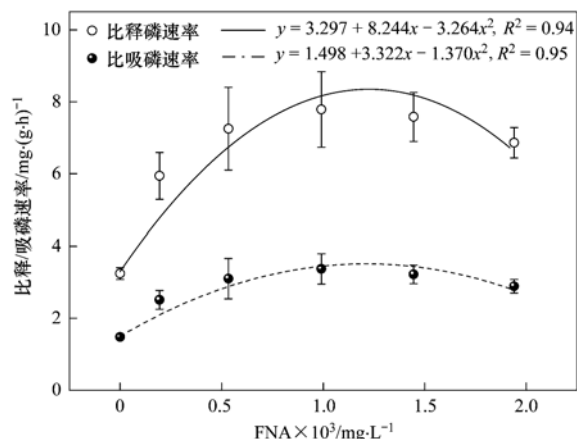


图 5 不同 FNA 浓度下系统的比释磷速率和比吸磷速率

Fig. 5 Specific anaerobic phosphate release rate and specific aerobic phosphate uptake rate under different FNA levels

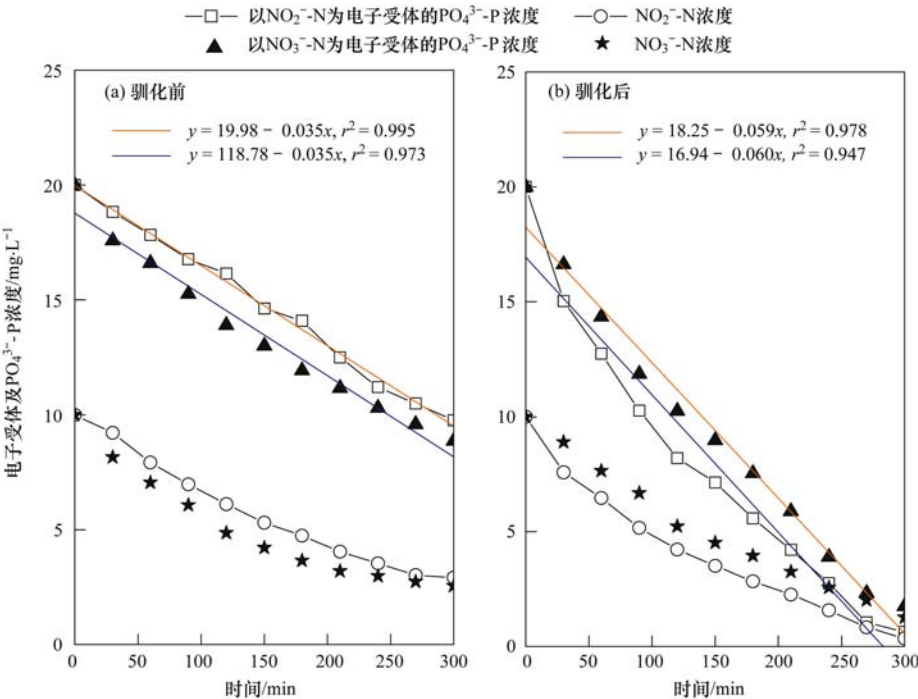


图 6 FNA 驯化前后污泥的缺氧吸磷能力

Fig. 6 Anoxic phosphate uptake capacity of the sludge before and after acclimation to FNA

一段时间后,尤其是投加 $0.99 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 FNA 后污泥浓度趋于平稳,说明系统内污泥进入适应期. 由不同 FNA 浓度下反应器内污泥体积指数(SVI)的变化可见,随着试验的进行,SVI 逐步降低直至稳定,这与污泥浓度变化趋势一致. 分析原因:一方面,FNA 抑制了丝状菌的生长;另一方面,图 4 显示的比释磷速率和比吸磷速率的增大表明 PAOs 活性增强或数量增多,因而活性污泥比重较大,更有利于污泥的沉降.

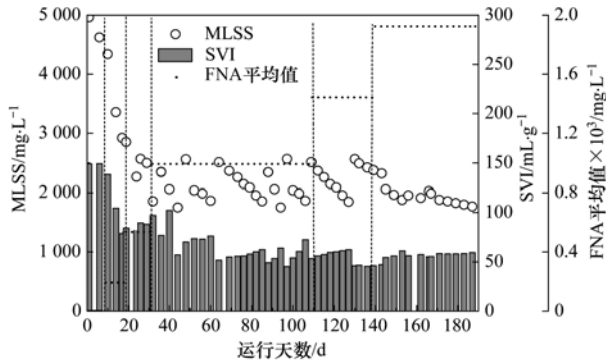


图 7 FNA 对系统污泥量及其沉降性能的影响

Fig. 7 Influence of FNA on sludge concentration and its settling properties of the system

3 结论

(1) FNA 为 $0 \sim 1.46 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,出水无 NO_2^- -N 积累, NO_3^- -N 积累量随着 FNA 投

加量的增大而增多,总氮损失率均高于 80%, NO_2^- -N 损失量由 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $11.495 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FNA 为 $1.94 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,系统内逐步出现 NO_2^- -N 的积累.

(2) 投加 FNA 后污泥的释磷和吸磷能力不仅未受到抑制,比释磷速率和比吸磷速率反而高于投加前. FNA 低于 $0.53 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,系统除磷率均大于 96.9%; 当 FNA 浓度提高至 0.99×10^{-3} 、 1.46×10^{-3} 、 $1.94 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,除磷率均有大幅下降,分别经过 50、12、30 d 的运行,除磷性能恢复至 64.42%、67.33%、44.14%,说明抑制作用导致的除磷性能恶化可以恢复且长期驯化作用能缩短恢复过程.

(3) 投加 FNA 驯化后,污泥的 NO_3^- 型和 NO_2^- 型缺氧吸磷能力分别为驯化前的 3.35 倍和 3.86 倍且吸磷方式有所转变,说明向好氧吸磷系统内长期投加 FNA 有利于系统内富集以 NO_2^- 为电子受体的反硝化聚磷菌;而且,长期驯化过程有利于系统内污泥的沉降.

参考文献:

[1] Vargas M, Guisasaola A, Artigues A, et al. Comparison of a nitrite-based anaerobic-anoxic EBPR system with propionate or acetate as electron donors[J]. Process Biochemistry, 2011, 46 (3): 714-720.
[2] Wentzel M C, Lötter L H, Loewenthal R E, et al. Metabolic

- behaviour of *Acinetobacter* spp. in enhanced biological phosphorus removal—A biochemical model[J]. *Water SA*, 1986, **12**(4): 209-224.
- [3] Arun V, Mino T, Matsuo T. Biological mechanism of acetate uptake mediated by carbohydrate consumption in excess phosphorus removal systems[J]. *Water Research*, 1988, **22**(5): 565-570.
- [4] 余鸿婷, 李敏. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷机制及其在废水处理中的应用[J]. *微生物学报*, 2015, **55**(3): 264-272.
- [5] Yoshida Y, Takahashi K, Saito T, *et al.* The effect of nitrite on aerobic phosphate uptake and denitrifying activity of phosphate-accumulating organisms[J]. *Water Science & Technology*, 2006, **53**(6): 21-27.
- [6] Sin G, Niville K, Bachis G, *et al.* Nitrite effect on the phosphorus uptake activity of phosphate accumulating organisms (PAO) in pilot-scale SBR and MBR reactors[J]. *Water SA*, 2008, **34**(2): 249-260.
- [7] Weng D C, Peng Y Z, Wang X X, *et al.* Inhibition of nitrite on denitrifying phosphate removal process[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, **955-959**: 1944-1950.
- [8] 宋姬晨, 王淑莹, 杨雄, 等. 亚硝酸盐对 A_2O 系统脱氮除磷的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(9): 2231-2238.
- [9] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 等. 游离氨和游离亚硝酸对亚硝态氮氧化菌活性的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1242-1247.
- [10] 赵建伟, 李小明, 杨麒, 等. 游离亚硝酸对好氧/延长闲置序批式反应器除磷性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(7): 1661-1667.
- [11] 委燕, 王淑莹, 马斌, 等. 亚硝酸盐对外碳源反硝化过程 N_2O 还原的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1722-1727.
- [12] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Development of a 2-sludge, 3-stage system for nitrogen and phosphorous removal from nutrient-rich wastewater using granular sludge and biofilms[J]. *Water Research*, 2008, **42**(12): 3207-3217.
- [13] Blackburne R, Vadivelu V M, Yuan Z G, *et al.* Kinetic characterisation of an enriched *Nitrospira* culture with comparison to *Nitrobacter*[J]. *Water Research*, 2007, **41**(14): 3033-3042.
- [14] Zhou Y, Oehmen A, Lim M, *et al.* The role of nitrite and free nitrous acid (FNA) in wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4672-4682.
- [15] 彭永臻, 刘牡, 宋燕杰, 等. FNA 对 NO_2^- 为电子受体反硝化的抑制动力学研究[J]. *北京工业大学学报*, 2012, **38**(6): 890-897.
- [16] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on anoxic phosphorus uptake and denitrification by poly-phosphate accumulating organisms[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **98**(4): 903-912.
- [17] Pijuan M, Ye L, Yuan Z G. Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2010, **44**(20): 6063-6072.
- [18] Zhou Y, Ganda L, Lim M, *et al.* Response of poly-phosphate accumulating organisms to free nitrous acid inhibition under anoxic and aerobic conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **116**: 340-347.
- [19] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, *et al.* The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [20] Zhou Y, Pijuan M, Zeng R J, *et al.* Free nitrous acid inhibition on nitrous oxide reduction by a denitrifying-enhanced biological phosphorus removal sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(22): 8260-8265.
- [21] Ma J, Yang Q, Wang S, *et al.* Effect of free nitrous acid as inhibitors on nitrate reduction by a biological nutrient removal sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 518-523.
- [22] 马娟, 王丽, 彭永臻等. FNA 的抑制作用及反硝化过程的交叉影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 1030-1035.
- [23] 李璐, 马娟, 宋相蕊. FNA 在污水生物脱氮除磷中的抑制效应[J]. *工业水处理*, 2014, **34**(6): 5-9.
- [24] Hesselmann R P X, Werlen C, Hahn D, *et al.* Enrichment, phylogenetic analysis and detection of a bacterium that performs enhanced biological phosphorus removal in activated sludge[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**: 454-465.
- [25] Hellenga C, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Model based design of a novel process for nitrogen removal from concentrated flows[J]. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 1999, **5**(4): 351-371.
- [26] Aiba S, Shoda M, Nagatani M. Kinetics of product inhibition in alcohol fermentation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1968, **10**(6): 845-864.
- [27] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [28] Sijbesma W F H, Almeida J S, Reis M A M, *et al.* Uncoupling effect of nitrite during denitrification by *Pseudomonas fluorescens*: An in vivo 31P-NMR study[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, **52**(1): 176-182.
- [29] Yoshida Y, Kim Y, Saito T, *et al.* Development of the modified activated sludge model describing nitrite inhibition of aerobic phosphate uptake[J]. *Water Research*, 2009, **53**(6): 21-27.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行