

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 李源逵, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择

乔昕¹, 王博¹, 郭媛媛², 彭永臻^{1*}

(1. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用国家工程实验室, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 信开水环境投资有限公司, 北京 101101)

摘要: 有效抑制亚硝酸盐氧化菌(NO₂-oxidizing bacteria, NOB)是实现稳定短程硝化的关键. 使用运行方式为厌氧/好氧/缺氧(A/O/A)的SBR反应器, 探究羟胺(NH₂OH)对氨氧化菌(AOB)和NOB的竞争性选择. 在混合液NH₂OH浓度分别为3 mg·L⁻¹和5 mg·L⁻¹条件下采用不同处理频率观察短程硝化的启动情况. 结果表明, 每2个周期投加1次混合液浓度为5 mg·L⁻¹的NH₂OH时, 亚硝态氮积累率(NAR)在6 d内从0.1%增长到57.4%, 并保持在(62.0 ± 4.6)%至实验结束; 通过分析第6 d的典型周期中可以看出: 好氧阶段结束时, 氨氮浓度由26.05 mg·L⁻¹降至8.06 mg·L⁻¹, 同时生成9.02 mg·L⁻¹的亚硝态氮和6.70 mg·L⁻¹的硝态氮; AOB最大活性(rAOB)与NOB最大活性(rNOB)的比值从第1 d的1.05增长到第9 d的4.22; 通过进一步qPCR分析可以看出: 实验第9 d时, AOB与NOB丰度分别下降至处理前的30.2%和19.1%. 因此, 基于NH₂OH对AOB和NOB的竞争性选择有望为城市污水短程硝化的快速启动提供可能.

关键词: 城市污水; 序批式反应器(SBRs); 短程硝化; 羟胺; 快速启动

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3765-08 DOI: 10.13227/j.hjx.201911190

Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria

QIAO Xin¹, WANG Bo¹, GUO Yuan-yuan², PENG Yong-zhen^{1*}

(1. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Xinkai Water Environmental Investment Co., Ltd., Beijing 101101, China)

Abstract: The effective inhibition of nitrite oxidizing bacteria (NOB) is the key to realizing satisfactory nitrite accumulation and achieving effective nitrification. In order to explore the selective effect of hydroxylamine (NH₂OH) on ammonia oxidizing bacteria (AOB) and NOB, a sequencing batch reactor (SBR) with the operation mode of anaerobic/aerobic/anoxia (A/O/A) was used to observe the start-up of nitrification at different concentrations and frequencies of NH₂OH. The results showed that when 5 mg·L⁻¹ of NH₂OH was added once every 2 cycles, the nitrite accumulation rate (NAR) increased from 0.1% to 57.4% in 6 days, and was maintained at (62.0 ± 4.6)% until the end of the trials. In the typical cycle on day 6, the NH₄⁺-N dropped from 26.05 mg·L⁻¹ to 8.06 mg·L⁻¹, thus producing 9.02 mg·L⁻¹ of NO₂⁻-N and 6.70 mg·L⁻¹ of NO₃⁻-N. Meanwhile, the ratio of the maximum activity of AOB (rAOB) to NOB (rNOB) increased from 1.05 on day 1 to 4.22 on day 9. Moreover, qPCR results indicated that the abundance of AOB and NOB decreased to 30.2% and 19.1%, respectively, on day 9 in comparison to the original sample. The results indicate that the selective effect of AOB and NOB based on NH₂OH is expected to provide a feasible application for the rapid start-up nitrification of municipal wastewater.

Key words: municipal wastewater; sequencing batch reactor(SBRs); nitrification; hydroxylamine; rapid start-up

目前大部分城市污水处理厂采用硝化反硝化工艺去除氮污染物,但往往伴随着高能耗的特点.将硝化过程控制在亚硝态氮积累的短程硝化反硝化技术可以节约25%的曝气能耗和40%的碳源消耗^[1,2],基于以上优点,短程硝化及其相关工艺成为了近年来的研究热点.根据文献报道,短程硝化工艺在处理垃圾渗滤液和消化污泥脱水液等高氨氮废水中容易实现^[3,4],而在低氨氮废水如城市污水中启动困难,其瓶颈在于难以有效抑制NOB的增殖或活性.现有实现短程硝化的方法如游离氨(FA)^[5,6]、游离亚硝酸(FNA)^[7,8]和pH联合曝气实时控制^[9,10]等(表1),普遍存在启动时间长,需要增加旁侧处理等限制因素,因此探究一种快速高效启动城市污水短程

硝化的方法,将是实现短程硝化工程化应用的先决条件.

羟胺(NH₂OH)是短程硝化过程的中间产物,在短程硝化中,氨氮经氨单加氧酶(AMO)氧化为NH₂OH, NH₂OH再由羟胺氧化酶(HAO)氧化为亚硝态氮^[21], NH₂OH可以对亚硝化产生促进作用^[22~24]. Kindaichi等^[23]的研究表明: ① 250

收稿日期: 2019-11-21; 修订日期: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401102); 北京市教委资助项目; 国家自然科学基金项目(21806006); 中国博士后科学基金项目(2019T120032)

作者简介: 乔昕(1994~),男,硕士,主要研究方向为城市污水脱氮, E-mail: 914438096@qq.com

* 通信作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_2OH 使 NOB 菌落从密集的球形菌落转变为分散的单个菌落,而对 AOB 菌落影响较小;② $250\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_2OH 会促进 AMO 和 HAO

酶活性,有利于 AOB 生长代谢进而生成更多的亚硝态氮. 综上,通过 NH_2OH 对 AOB 和 NOB 的竞争性选择或许能够快速实现短程硝化.

表 1 短程硝化启动的方法与启动条件

Table 1 Methods and conditions of the initial partial nitrification

方法	反应器	容量/L	启动时间/d	文献
低 DO: $0.6\sim 1.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ + 高温	CSTR	1.9	56; 44	[11]
好氧饥饿 + 高温	SBR	500	35	[12]
生物强化	连续流	28	15	[13]
低 DO: $0.7\sim 1.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ + 高温	SBR	12	17 周期	[14]
低 DO: $1.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ + 高温	SBR	13	50	[15]
FA $25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SBR	5	6	[16]
$0.5\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{NH}_2\text{OH}$	CRI	24	13	[17]
FA $0.13\sim 0.39\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ + 高温	SBR	8	8	[18]
间歇曝气	SBR	100	90	[19]
污泥发酵物 + 实时控制	SBR	10	60	[20]

Li 等^[22]向絮体活性污泥系统中每周周期投加 $5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{NH}_2\text{OH}$,使得亚硝态氮积累率(NAR)在 5 d 后大于 95%; Xu 等^[24]在好氧颗粒污泥系统中每天投加 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_2OH 经过 7 d 成功启动短程硝化. 然而已有的研究并没有对实现短程硝化的 NH_2OH 适宜用量进行说明. 另外,投加 NH_2OH 实现短程硝化的策略在实际应用中也存在以下 2 个难点:①少量的 NH_2OH 难以起到促进亚硝化的作用;②过量的 NH_2OH 会抑制氨氮的氧化^[17],而且应用于实际工程中不够经济. 针对以上现状,本研究通过投加不同浓度和频率的 NH_2OH ,探究了 NH_2OH 对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择,借以寻求高效且经济的 NH_2OH 投加策略来启动短程硝化.

1 材料方法

1.1 实验用水和接种污泥

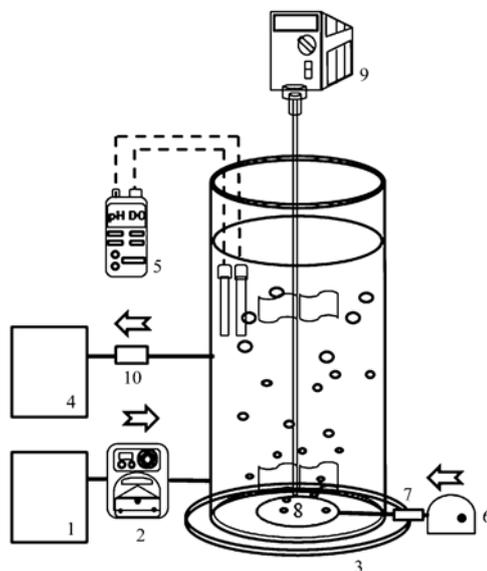
本实验用水取自北京市某污水处理厂曝气沉砂池出水渠,具体水质:COD 平均浓度为 $171.74\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4^+-N 平均浓度为 $42.87\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NO_2^--N 和 NO_3^--N 平均浓度均小于 $1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 实验用种泥为北京市某污水处理厂分段进水多级 AO 工艺的剩余污泥,污泥性质:MLSS 浓度为 $5\ 610\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; MLVSS 浓度为 $4\ 160\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.2 实验装置与运行工序

1.2.1 实验装置

如图 1 所示,本实验采用 3 个敞口 SBR 反应器,材质为有机玻璃,有效容积均为 10 L,排水比 50%,采用机械搅拌的混合方式和微孔曝气的曝气方式,并且采用转子流量计控制曝气量维持在 $0.2\sim 0.5\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,实验阶段 SBR 每日运行 10 h,分为

2 个周期,每个周期采用缺氧 1h/好氧 3h/缺氧 1h (AOA) 运行方式;每个反应器配有便携水质检测仪 (WTW340i, Germany),监测反应过程中的 DO、pH 和温度变化.



1. 进水箱; 2. 蠕动泵; 3. SBR 反应器; 4. 出水箱;
5. DO、pH 和温度便携检测仪; 6. 曝气泵;
7. 流量计; 8. 曝气头; 9. 搅拌器; 10. 电动排水阀

图 1 SBR 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the SBR

1.2.2 实验方法

本实验分为两部分,以下分别称作短期实验和长期实验. 短期实验的目的是探究活性污泥对于不同浓度 NH_2OH 短期处理后的适应能力和亚硝态氮积累情况,以选取选择性抑制 AOB 和 NOB 的 NH_2OH 浓度;长期实验使用短期实验得到的最佳 NH_2OH 浓度来探究系统快速启动短程硝化的最佳 NH_2OH 投加频率.

(1)短期实验 将接种的活性污泥分6个批次投入SBR反应器内,调整初始污泥浓度 $3\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SBR以AOA方式运行,在开始曝气时加入盐酸羟胺溶液,6个批次中加入的盐酸羟胺的量分别为63.2、105.3、210.6、315.9、421.2和526.5 mg.对应的反应器内混合溶液 NH_2OH 浓度(以 NH_2OH 计)为3、5、10、15、20和 $25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每个批次分别运行一个周期.

(2)长期实验 将接种的污泥分6组放入反应器内,调整初始污泥浓度 $3\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SBR以AOA方式运行,在曝气阶段开始立即加入盐酸羟胺溶液,加入的盐酸羟胺的质量分别为63.18 mg和105.30 mg.对应的反应器内混合溶液 NH_2OH 浓度(以 NH_2OH 计)为 $3\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.运行工况如表2,工况1~3运行9 d,工况4~6运行11 d(表2).

表2 投加 NH_2OH 的浓度及频率

Table 2 Concentration and frequency of NH_2OH

工况	$\text{NH}_2\text{OH}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	投加频率
1	3	1次/每4周期
2	3	1次/每2周期
3	3	1次/每1周期
4	5	1次/每4周期
5	5	1次/每2周期
6	5	1次/每1周期

1.3 分析项目及测定方法

MLSS和MLVSS采用重量法测定;水样经定性滤纸过滤后测定以下参数: NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定; NO_2^--N 采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO_3^--N 采用麝香草酚分光光度法测定;温度与DO采用便携水质检测仪(WTW340i,Germany).

采用特异性引物对AOB的 amoA 功能基因、属于NOB菌群的*Nitrospira*和*Nitrobacter*的16S rRNA

进行实时定量qPCR(real-time qPCR)扩增,采用MX3000P Real-Time PCR系统进行检测.每个样品设置平行,最终以每克干污泥中菌的基因拷贝数表示该菌的含量.扩增所用引物与核苷酸序列见表3.

表3 扩增所用引物

Table 3 Primers used for amplification

菌种	引物
<i>Nitrosomonas</i>	amoA-1F/amoA-2R
<i>Nitrospira</i>	NSR 1113F/NSR 1264R
<i>Nitrobacter</i>	FGPS 872F/FGPS 1269R

氨氮去除率(NRR)计算方法:

$$\text{NRR} = \frac{\text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{好氧始}} - \text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{好氧末}}}{\text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{好氧始}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $\text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{好氧始}}$ 和 $\text{NH}_4^+-\text{N}_{\text{好氧末}}$ 分别表示好氧阶段开始时和结束时氨氮浓度.

亚硝积累率(NAR)计算方法:

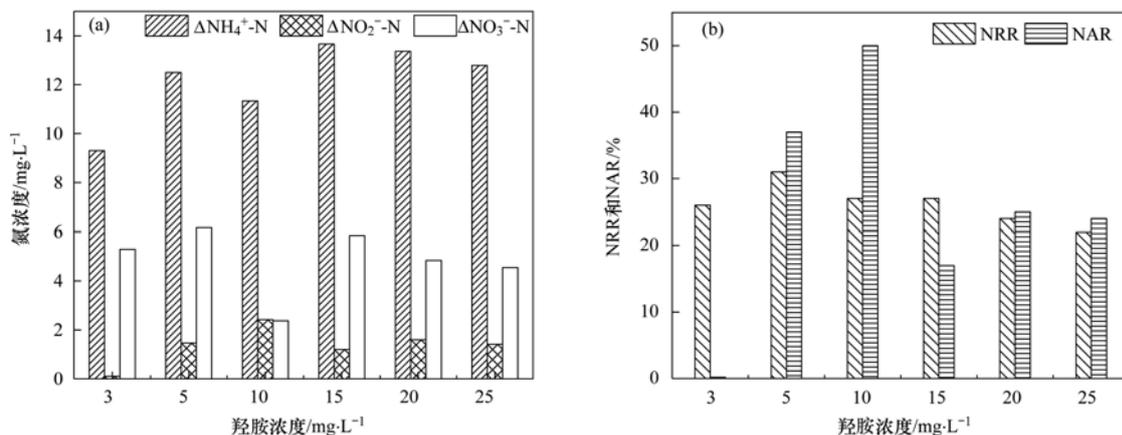
$$\text{NAR} = \frac{\text{NO}_2^--\text{N}_{\text{好氧末}}}{\text{NO}_2^--\text{N}_{\text{好氧末}} + \text{NO}_3^--\text{N}_{\text{好氧末}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\text{NO}_2^--\text{N}_{\text{好氧末}}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}_{\text{好氧末}}$ 分别表示好氧阶段结束时亚硝态氮和硝态氮浓度.

2 结果与讨论

2.1 NH_2OH 浓度对硝化过程中NAR的影响

在 NH_2OH 浓度为3~ $25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下考察了活性污泥对不同浓度 NH_2OH 的适应能力和亚硝态氮积累情况.在不同 NH_2OH 浓度下好氧阶段始末氮浓度变化量如图2所示:当投加 NH_2OH 浓度大于等于 $5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时好氧末出现亚硝态氮的积累,其中 NH_2OH 浓度为 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时亚硝态氮积累量最多为 $2.42\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时NAR为50.46%;当 NH_2OH 浓度上升至15、20和 $25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,NAR没有继续增大.此外,盐酸羟胺属于有机物,其存在会



(a)好氧阶段始末氮浓度变化量;(b)NAR和NRR

图2 NH_2OH 处理后氮浓度、NRR和NAR的变化

Fig. 2 Variations of the nitrogen concentration, NAR, and NRR after treatment with NH_2OH

影响氨氮测量的吸光度值,使得氨氮测量值大于实际值^[25],尤其当 NH_2OH 浓度超过 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时影响更加明显,给测量和分析带来困难.

在 NH_2OH 浓度为 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,虽然短期投加没有达到最佳的亚硝态氮积累,但是引入系统总氮较少,而且存在对 NOB 抑制的趋势;在投加 NH_2OH 浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,不仅可以得到较高的亚硝态氮积累,且此时较低浓度 NH_2OH 用量也更经济.

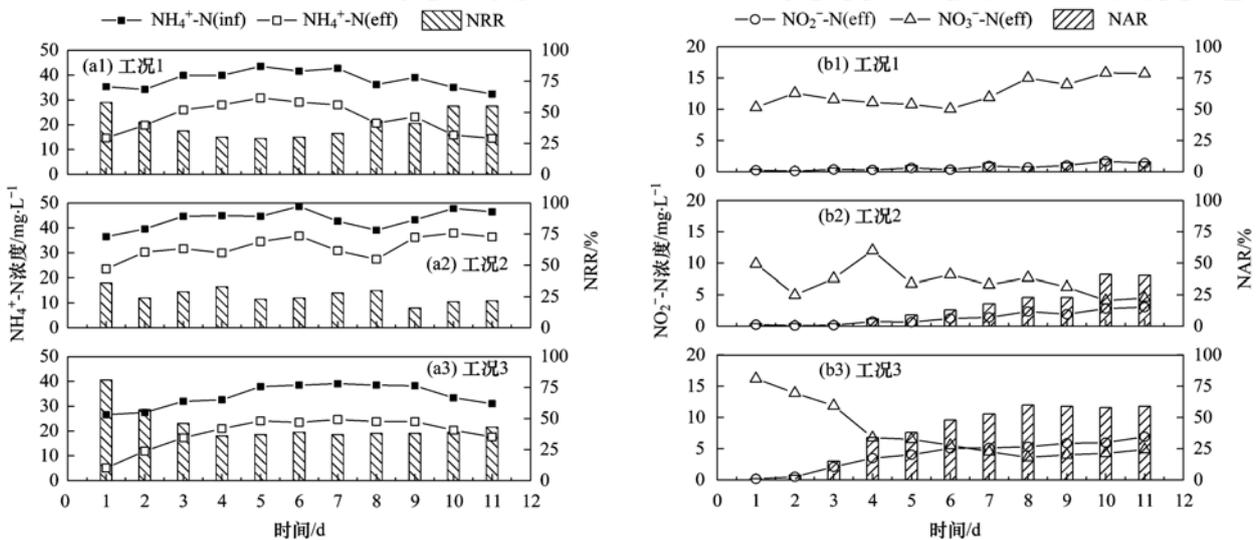
2.2 NH_2OH 投加频率对短程硝化启动的影响

对短期实验中得到两种 NH_2OH 投加量 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别设置 3 种不同投加频率,即 1 次/4 周期、1 次/2 周期和 1 次/1 周期,考察在不同 NH_2OH 投加频率下系统的短程硝化启动情况.

2.2.1 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择

从实验第 2 d 开始投加 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH ,图 3 (a) 是好氧阶段始末氨氮浓度和 NAR,可以看出 3

组实验的 NRR 随时间变化整体呈现下降趋势.其中工况 1 的 NRR 受影响最小,从第 6 d 的 30.0% 恢复至第 10 d 的 55.0%,这是因为 NH_2OH 投加频率较低,硝化菌受抑制后恢复较快,这与陈佼等^[17]的结论相似: $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_2OH 对 AOB 几乎没有抑制作用;工况 2 和工况 3 在反应后期即第 6 d 开始,NRR 表现稳定,分别维持在 $(25.5 \pm 4.5)\%$ 和 $(40.0 \pm 3.0)\%$. 相比较 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 的实验组, $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 的实验组中 NRR 低是由于此阶段温度较低 (17.6°C),赵昕燕等^[26]的研究中也发现当温度从 21.9°C 下降到 9.6°C 时,相应的氨氮氧化速率(以 N 计)从 $7.1 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 下降到 $1.9 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 图 3(b) 是好氧阶段始末亚硝态氮浓度和 NRR,3 组实验好氧阶段末的亚硝态氮随时间变化均呈上升状态.其中工况 3 的 NAR 上升最快,在 NH_2OH 投加第 3 d 就出现的亚硝态氮积累,在第 8 d 达到稳定,NAR 维持在 $(58.9 \pm 0.6)\%$ 直至第 11 d 实验结束.



(a) 好氧阶段始末氨氮浓度和 NAR; (b) 好氧阶段始末亚硝态氮浓度和 NRR; 工况 1: 每 4 个周期投加 1 次 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH ; 工况 2: 每 2 个周期投加 1 次 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH ; 工况 3: 每 1 个周期投加 1 次 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH

图 3 工况 1~3 氮浓度、NAR 和 NRR 变化

Fig. 3 Variations of the nitrogen concentration, NAR, and NRR in conditions 1-3

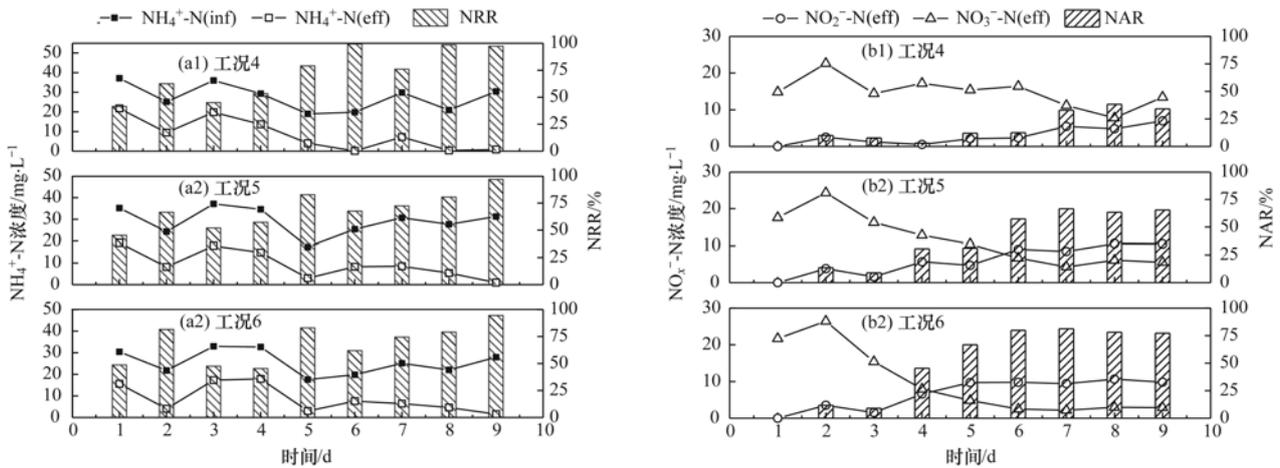
2.2.2 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择

从第 2 d 开始投加 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_2OH ,图 4 (a) 是好氧阶段始末氨氮浓度和 NAR,可以看出工况 4、工况 5 和工况 6 在 9 d 的实验过程中 NRR 分别从 41.4%、45.2% 和 48.6% 升高到 97.7%、96.9% 和 94.5%. 引起 NRR 上升的主要原因是此时水温较高 (19.6°C),可见此时因投加 NH_2OH 而带来的活性抑制较弱,系统主要表现出因硝化细菌生长引起的活性增长,因此导致 NRR 整体上升. 图

4(b) 是好氧阶段始末亚硝态氮浓度和 NRR,可以看出这 3 种工况的 NAR 都随着运行时间而上升,工况 5 和 6 的 NAR 随着运行时间上升速度较快,第 4 d 好氧末亚硝态氮就分别达到 $5.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,并且在第 6~9 d NAR 分别稳定至 $(62.0 \pm 4.6)\%$ 和 $(79.3 \pm 2.0)\%$.

2.2.3 NH_2OH 对硝化菌最大活性的影响

工况 1~3 AOB 和 NOB 的最大活性如图 5(a) 所示.可见工况 1 中 rAOB 与 rNOB 先下降后上升,二者趋势保持一致,可以看出此时 NH_2OH 对 AOB



(a) 好氧阶段始末氨氮浓度和 NAR; (b) 好氧阶段始末亚硝态氮浓度和 NRR; 工况 4: 每 4 个周期投加 1 次 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}$; 工况 5: 每 2 个周期投加 1 次 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}$; 工况 6: 每 1 个周期投加 1 次 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}$

图 4 工况 4~6 氮浓度、NAR 和 NRR 变化

Fig. 4 Variations of the nitrogen concentration, NAR, and NRR in conditions 4-6

与 NOB 均有抑制作用,但是抑制效果较弱,所以系统并没有表现出亚硝态氮积累.抑制作用随着时间增长会逐渐降低,可能是活性污泥适应了 NH_2OH 的抑制作用,李佳等^[27]的研究中指出,重复用 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NH_2OH 来抑制 NOB 恢复 PN/A 工艺并不可行; 工况 2 和工况 3 中 rAOB 均呈先下降后上升的趋势,而相对应的这两个工况的 rNOB 在持续降低,说明 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}$ 在 1 次/2 周期和 1 次/1 周期的投加频率下对 AOB 抑制经过 5 d 后呈现出恢复趋势,而在同样条件下 NOB 没有表现出活性恢复的趋势.

工况 4~6 AOB 和 NOB 的最大活性如图 5(b) 所示.可见工况 4~6 中 rAOB 随着时间变化均不大,甚至有缓慢上升趋势.而相对应各工况的 rNOB 都是持续降低,相较于 NH_2OH 处理前, rNOB 活性在处理分别降低了 67.1%、75.9% 和 46.9%.可

以看出在投加 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}$ 时,工况 4~6 均对 NOB 活性产生了显著抑制.这个结果证明了:在不超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_2\text{OH}$ 范围内,随着投加量和投加频率的增大,对 NOB 最大活性的抑制也逐渐明显,而对 AOB 的最大活性影响始终不大^[28,29].

2.3 典型周期内氮污染物变化

如图 6 所示,分析工况 5 第 6 d 典型周期内氮污染物浓度、COD、pH 值和 DO 变化. 0~60 min 为反硝化过程.此时异养菌以原水 COD 为电子供体将上一周期内剩余的硝态氮和亚硝态氮还原为氮气, pH 从 7.8 上升至 8.0,这是由于反硝化过程中会产生碱度使得溶液 pH 上升^[30]. 60~240 min 为短程硝化过程,在好氧阶段结束时,氨氮浓度由 $26.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $8.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,同时生成 $9.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚硝态氮,由于 NOB 并没有被完全抑制,此时仍然有 $6.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝态氮生成; DO 在曝气末为 1.60

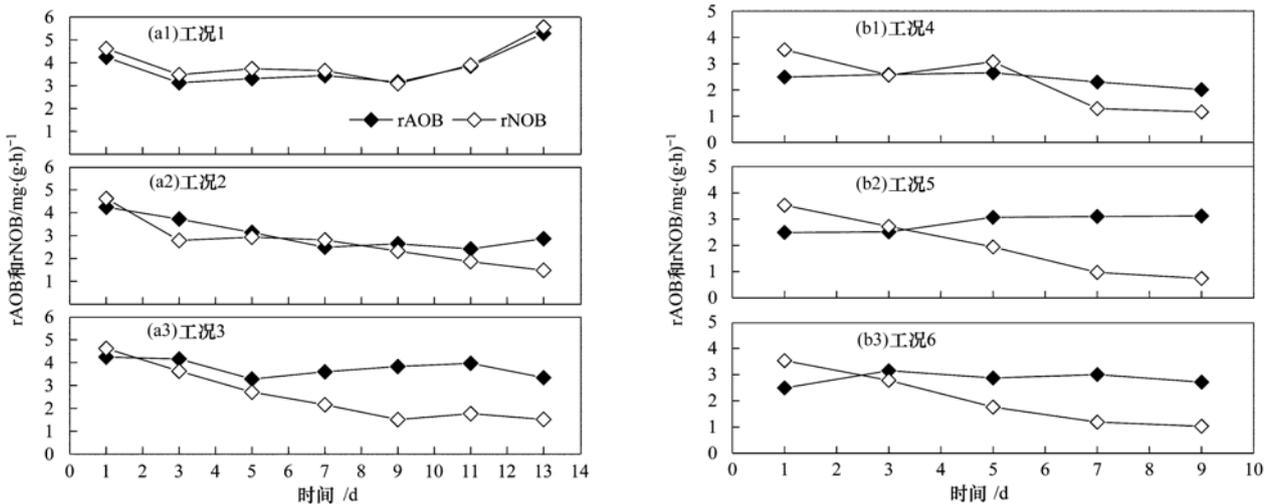


图 5 工况 1~6 AOB 和 NOB 最大活性变化

Fig. 5 Variations of the maximum activity of AOB and NOB in conditions 1-6

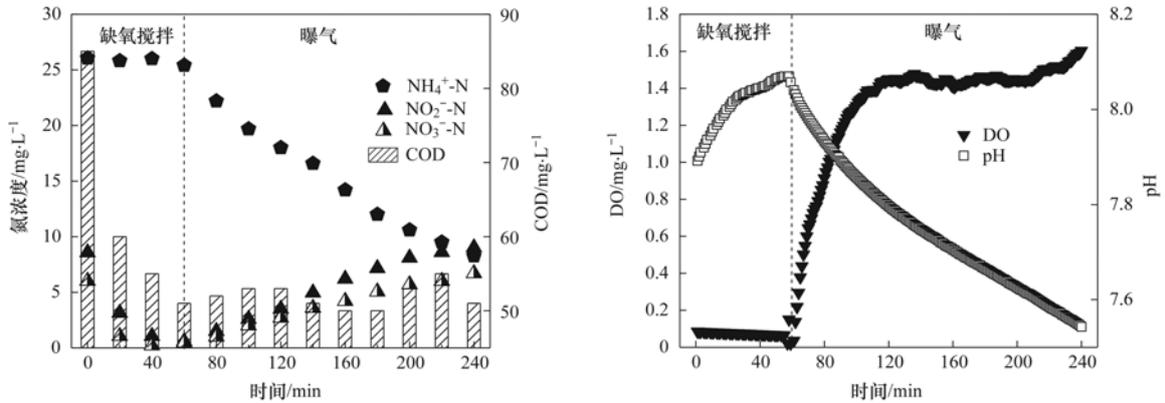


图 6 工况 5 第 6 d 典型周期内氮污染物浓度、COD、pH 值和 DO

Fig. 6 Variations of the nitrogen concentrations, COD, pH, and DO in a typical cycle on day 6 of condition 5

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 呈下降趋势, 由于氨氮并没有完全反应完, 因此没有出现氨谷. 此典型周期说明: 在每 2 个周期投加 1 次 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的 NH_2OH 启动短程硝化时, 第 6 d 就呈现出较好的运行状态, NAR 达到 57.4%, 且生成的亚硝态氮与剩余氨氮浓度之比为 1.12, 可以进一步为厌氧氨氧化提供底物^[31], 具有实现短程硝化/厌氧氨氧化的潜在能力.

2.4 AOB 和 NOB 菌群丰度分析

为了更好地了解系统的运行状态, 对系统内主要功能菌 AOB 和 NOB (*Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 之和) 丰度进行 qPCR 分析. 工况 1~6 第 9 d AOB 和 NOB 丰度对比如图 7 所示: 原始接种污泥 AOB 丰度 (以 VSS 计) 为 1.48×10^8 copies·g⁻¹, NOB 丰度为 5.79×10^9 copies·g⁻¹. 工况 1~6 中 AOB 丰度分别为处理前丰度的 137.07%、104.53%、105.69%、47.75%、30.24% 和 28.02%; NOB 丰度分别为处理前丰度的 146.31%、80.69%、85.36%、94.47%、19.09% 和 2.86%. 采用 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 处理的工况 1~3 中 AOB 与 NOB 的种群丰度与原始接种污

泥相比未出现太大变化, 基因拷贝数仍处于同一个数量级. 采用 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 处理的工况 4~6 中, AOB 与 NOB 丰度较原始污泥中均有下降.

结合硝化菌最大活性来分析, 在工况 2~4 中 NH_2OH 的投加并没有改变 AOB 与 NOB 的种群丰度, 仅仅是对 AOB 和 NOB 活性的选择性抑制, 使得系统表现出亚硝态氮积累. 而在工况 5 和 6 中 AOB 活性保持不变, 但丰度有了小幅度下降, 相应的 NOB 丰度与活性都有显著地降低, 因此这种情况下 NH_2OH 同时抑制了 NOB 的活性和丰度, 使系统表现出亚硝态氮积累. 在 Harper 等^[32]的研究中也发现: 在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 处理 14 d 后, *nxrA* 丰度相较处理前下降了一个数量级. 种群结构分析的结果表明, NH_2OH 对 AOB 和 NOB 丰度的选择性抑制是系统维持短程硝化的根本原因^[33].

3 结论

(1) 投加 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的 NH_2OH 在单次好氧处理的情况下可以实现一定量的亚硝态氮积累, 同时不会将过多氮污染物引入系统造成二次污染.

(2) 每 2 个周期投加 1 次 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 时, NAR 在第 6 d 超过 50%, 并以 $(62.0 \pm 4.6)\%$ 稳定维持, 且 NRR 不受影响.

(3) NOB 丰度的降低是短程硝化实现的根本原因, 当每 2 个周期投加 1 次 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_2OH 时, NOB 和 AOB 丰度在第 9 d 分别降低为处理前丰度的 19.1% 和 30.2%.

参考文献:

[1] 祝贵兵, 彭永臻, 郭建华. 短程硝化反硝化生物脱氮技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(10): 1552-1557.
Zhu G B, Peng Y Z, Guo J H. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(10): 1552-1557.
[2] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 控制 pH 实现短程硝化反硝化生

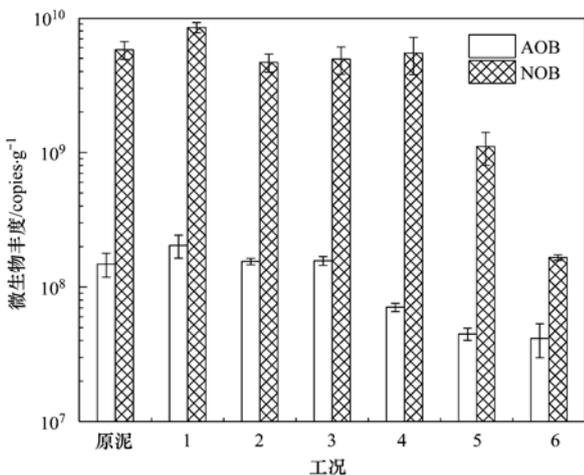
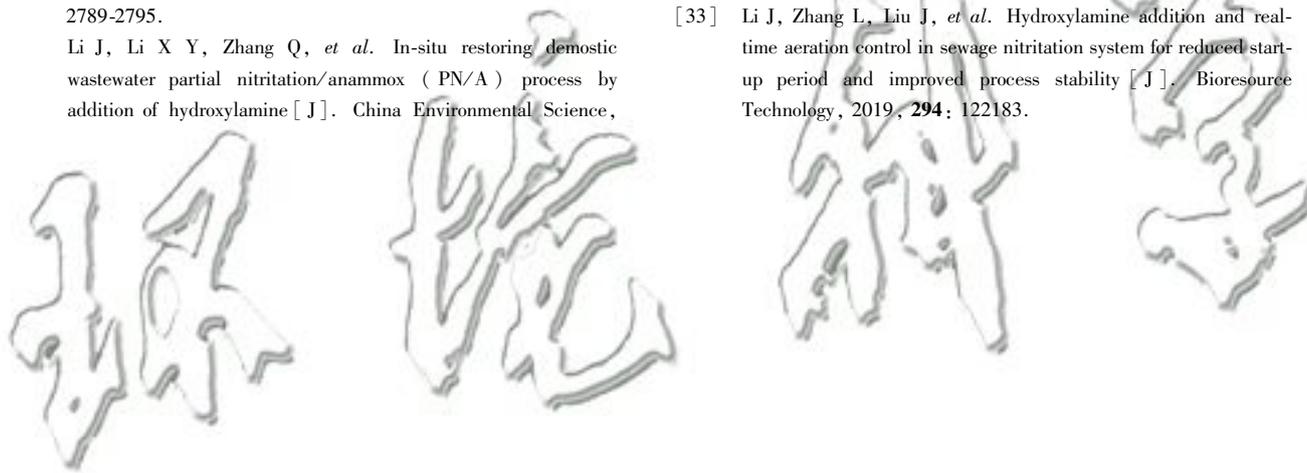


图 7 工况 1~6 第 9 d AOB 和 NOB 丰度变化

Fig. 7 Variations of the AOB and NOB abundance on the day 9 of condition 1-6

- 物脱氮技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(12): 1664-1666.
- Gao D W, Peng Y Z, Wang S Y. Nitrogen removal from wastewater via shortcut nitrification-denitrification achieved by controlling pH[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, **37**(12): 1664-1666.
- [3] 刘牡, 彭永臻, 宋燕杰, 等. 厌氧-好氧组合工艺处理垃圾渗滤液短程硝化的二次启动[J]. 水处理技术, 2011, **37**(2): 52-58.
- Liu M, Peng Y Z, Song Y J, *et al.* The second startup of the short-cut nitrification of landfill leachate by the anaerobic-aerobic process[J]. Technology of Water Treatment, 2011, **37**(2): 52-58.
- [4] 张树军, 孟凡能, 吕鑑, 等. 高浓度氨氮消化污泥脱水液半短程硝化试验研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1437-1441.
- Zhang S J, Meng F N, Lü J, *et al.* Half-nitrosification of dewatering liquid of digested sludge with high ammonia [J]. Environmental Science, 2009, **30**(5): 1437-1441.
- [5] 杨宏, 吴城锋, 王小乐, 等. 固定化包埋填料高氨氮负荷下短程硝化稳定运行特征[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(6): 3369-3374.
- Yang H, Wu C F, Wang X L, *et al.* Shortcut nitrification of stable operation of immobilized active filler under high ammonia loading [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(6): 3369-3374.
- [6] 李柏林, 杨丹丹, 黄馨, 等. 基于 DO 和游离氨联合控制的短程硝化快速启动及稳定运行研究[J]. 环境污染与防治, 2018, **40**(11): 1219-1223.
- Li B L, Yang D D, Huang X, *et al.* Study on rapid start-up and stability of partial nitrification based on controlling DO and free ammonia [J]. Environmental Pollution and Control, 2018, **40**(11): 1219-1223.
- [7] 傅金祥, 汪洋, 杨勇. FA 与 FNA 对 A/O 工艺短程硝化处理垃圾渗滤液的影响[J]. 工业水处理, 2012, **32**(5): 48-51.
- Fu J X, Wang Y, Yang Y. Effect of FA and FNA on the short-cut nitrification of landfill leachate in an A/O system [J]. Industrial Water Treatment, 2012, **32**(5): 48-51.
- [8] 刘禹晟, 朱薇, 端允. 微氧条件下 FA、FNA 和 pH 对半短程硝化的影响[J]. 太原理工大学学报, 2019, **50**(5): 572-578.
- Liu Y S, Zhu W, Duan Y. Effect of FA, FNA and pH on partial-nitrification under micro-aerobic conditions[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, **50**(5): 572-578.
- [9] 姜超, 隋倩雯, 陈梅雪, 等. 实时控制序批式膜生物反应器处理养猪废水的短程硝化[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(11): 5868-5876.
- Jiang C, Sui Q W, Chen M X, *et al.* Shortcut nitrification in a pilot-scale real-time control sequencing batch membrane bioreactor treating swine wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(11): 5868-5876.
- [10] 邓仕槐, 李晓璐, 李远伟, 等. 实时控制 SBR 系统中的短程硝化反硝化[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(8): 70-73.
- Deng S H, Li X L, Li Y W, *et al.* Research of shortcut nitrification-denitrification in SBR under the real-time control [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, **1**(8): 70-73.
- [11] 张婷, 吴鹏, 沈耀良, 等. CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3399-3405.
- Zhang T, Wu P, Shen Y L, *et al.* Fast start-up of shortcut nitrification in a CSTR and an MBR [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3399-3405.
- [12] 徐浩, 李捷, 罗凡, 等. 城市污水短程硝化的快速启动试验研究[J]. 中国给水排水, 2018, **34**(23): 96-99, 104.
- Xu H, Li J, Luo F, *et al.* Rapid start-up of short-cut nitrification process for treatment of urban sewage [J]. China Water & Wastewater, 2018, **34**(23): 96-99, 104.
- [13] 彭轶, 马斌, 委燕, 等. 基于生物强化技术实现城市污水处理系统稳定短程硝化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(11): 3965-3969.
- Peng Y, Ma B, Wei Y, *et al.* Achieving stable nitritation in domestic wastewater treatment system based on bioaugmentation technology [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(11): 3965-3969.
- [14] 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 等. 玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2756-2762.
- Long B S, Liu X L, Liu H B, *et al.* Shortcut nitrification rapid start and stability of corn starch wastewater [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2756-2762.
- [15] 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 等. 厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5065-5073.
- Yu D S, Yuan M F, Wang X X, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal characteristics of an anaerobic/aerobic operated SPNDPR system treating low C/N urban Sewage [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5065-5073.
- [16] 薛通, 薛源, 杨凤林, 等. 污泥厌氧水解与短程硝化反硝化耦合工艺处理低碳氮比城市污水[J]. 高校化学工程学报, 2010, **24**(1): 150-155.
- Xue T, Xue Y, Yang F L, *et al.* Nitrogen removal efficiency of a shortcut nitrification-denitrification process integrated with sludge anaerobic hydrolysis for treating low C/N ratio municipal wastewater [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2010, **24**(1): 150-155.
- [17] 陈佼, 张建强, 文海燕, 等. 羟胺抑制协同 pH 调控对人工快渗系统短程硝化的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3728-3735.
- Chen J, Zhang J Q, Wen H Y, *et al.* The effect of hydroxylamine inhibition and pH control on achieving shortcut nitrification in constructed rapid infiltration system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3728-3735.
- [18] 温婧玉, 成浩楠, 李竹君, 等. 短程硝化的快速启动调控研究[J]. 水处理技术, 2019, **45**(8): 125-129, 132.
- Wen J Y, Cheng H N, Li Z J, *et al.* Study on quick start-up regulation of partial nitrification [J]. Technology of Water Treatment, 2019, **45**(8): 125-129, 132.
- [19] Zhang T, Wang B, Li X Y, *et al.* Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **335**: 330-337.
- [20] Liu J J, Yuan Y, Li B K, *et al.* Enhanced nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in an anaerobic-aerobic-anoxic sequencing batch reactor with sludge fermentation products as carbon source [J]. Bioresource Technology, 2017, **244**: 1158-1165.
- [21] Anderson I C, Levine J S. Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1986, **51**(5): 938-945.
- [22] Li J, Zhang Q, Li X Y, *et al.* Rapid start-up and stable maintenance of domestic wastewater nitritation through short-term hydroxylamine addition [J]. Bioresource Technology, 2019,

- 278: 468-472.
- [23] Kindaichi T, Okabe S, Satoh H, *et al.* Effects of hydroxylamine on microbial community structure and function of autotrophic nitrifying biofilms determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49** (11-12): 61-68.
- [24] Xu G J, Xu X C, Yang F L, *et al.* Partial nitrification adjusted by hydroxylamine in aerobic granules under high DO and ambient temperature and subsequent Anammox for low C/N wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **213**: 338-345.
- [25] GB 7479-1987, 水质 铵的测定 纳氏试剂比色法[S].
- [26] 赵昕燕, 卞伟, 侯爱月, 等. 季节性温度对短程硝化系统微生物群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1366-1374.
Zhao X Y, Bian W, Hou A Y, *et al.* Characteristics of microbial community structure in the stable operation of the partial cut nitrification system with seasonal temperature [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1366-1374.
- [27] 李佳, 李夕耀, 张琼, 等. 投加羟胺原位恢复城市污水短程硝化-厌氧氨氧化工艺[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2789-2795.
Li J, Li X Y, Zhang Q, *et al.* In-situ restoring domestic wastewater partial nitritation/anammox (PN/A) process by addition of hydroxylamine [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2789-2795.
- [28] Sui Q W, Wang Y Y, Wang H Y, *et al.* Roles of hydroxylamine and hydrazine in the in-situ recovery of one-stage partial nitritation-anammox process; characteristics and mechanisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **707**: 135648.
- [29] Wang Z, Zhang L, Zhang F Z, *et al.* Nitrite accumulation in comammox-dominated nitrification-denitrification reactors: Effects of DO concentration and hydroxylamine addition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **384**: 121375.
- [30] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
Ma J, Peng Y Z, Wang L, *et al.* Effect of temperature on denitrification and profiles of pH during the process [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
- [31] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox; recent advances [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 981-990.
- [32] Harper Jr W J, Terada A, Poly F, *et al.* The effect of hydroxylamine on the activity and aggregate structure of autotrophic nitrifying bioreactor cultures [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 2009, **102**(3): 714-724.
- [33] Li J, Zhang L, Liu J, *et al.* Hydroxylamine addition and real-time aeration control in sewage nitritation system for reduced start-up period and improved process stability [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **294**: 122183.



CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)