

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响

孙洪伟¹, 吕心涛¹, 魏雪芬¹, 赵华南¹, 马娟¹, 方晓航^{2*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 本试验采用 3 个标记为 R_{Ahead} 、 R_{Exact} 和 R_{Exceed} 的序批式反应器(SBR), 在实现短程硝化的基础上, 深入研究了游离氨(FA)耦合曝气时间对氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂-OB)活性的抑制影响. 本试验在 3 种 FA 浓度(0.5、5.1、10.1 mg·L⁻¹)耦合 3 种曝气时间(t_{Exact} : 氨被完全氧化时停曝气; t_{Ahead} : 氨被完全氧化前 30 min 停曝气; t_{Exceed} : 氨被完全氧化后 30 min 停曝气)的条件下进行. 结果表明, 当 FA 浓度达到 10.1 mg·L⁻¹ 时, 3 种系统均实现了短程硝化, 但短程硝化实现的快慢关系为: R_{Ahead} 最快、 R_{Exact} 次之、 R_{Exceed} 最慢, 其所需运行周期分别为 56、62 和 72. 此外, 3 种系统中, 相对于 AOB, NO₂-OB 活性受到的抑制作用更强, 导致 AOB 活性始终高于 NO₂-OB 活性, 且 AOB 和 NO₂-OB 菌属活性(η)强弱关系差异较大, AOB 活性强弱关系: $\eta_{\text{RExceed}} > \eta_{\text{RExact}} > \eta_{\text{RAhead}}$, 其值分别为 104.4%、100% 和 85.8%, NO₂-OB 活性强弱关系: $\eta_{\text{RExceed}} > \eta_{\text{RExact}} > \eta_{\text{RAhead}}$, 其值分别为 71.2%、64.9% 和 50.2%.

关键词: 游离氨; 曝气时间; 亚硝酸盐积累率; 硝化菌活性

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1075-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.037

Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria

SUN Hong-wei¹, LÜ Xin-tao¹, WEI Xue-fen¹, ZHAO Hua-nan¹, MA Juan¹, FANG Xiao-hang^{2*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Three sequencing batch reactors (SBRs) labeled with R_{Ahead} , R_{Exact} and R_{Exceed} were employed to investigate the synergetic inhibition effect of free ammonia (FA) and length of aeration phase on the activity of ammonia-oxidizing bacteria (AOB) and nitrite-oxidizing bacteria (NOB) after shortcut nitrification was achieved in the systems. The experiments were conducted under the conditions of three FA concentrations (0.5, 5.1, 10.1 mg·L⁻¹) combined with three kinds of aeration time (t_{Exact} : the time when ammonia oxidation was completed; t_{Ahead} : 30 min ahead of the time when ammonia oxidation was completed; t_{Exceed} : 30 min exceeded when the time ammonia oxidation was completed). It was found that short-cut nitrification could be successfully established in three reactors with a FA level of 10.1 mg·L⁻¹. Meanwhile, the speed of achieving nitrification was in the sequence of $R_{\text{Ahead}} > R_{\text{Exact}} > R_{\text{Exceed}}$ with operational cycles of 56, 62 and 72, respectively. Compared to AOB, NOB in the three reactors was observed to be more sensitive to FA, resulting in AOB activity higher than NOB activity throughout the whole experimental period. Moreover, there was great difference in the activity coefficient (η) between AOB and NOB. The activity coefficients of AOB were in the order of $\eta_{\text{RExact}} > \eta_{\text{RExceed}} > \eta_{\text{RAhead}}$ with the values of 104.4%, 100% and 85.8%, respectively. Nevertheless, the activity coefficients of NOB were in the order of $\eta_{\text{RExceed}} > \eta_{\text{RExact}} > \eta_{\text{RAhead}}$ with the values of 71.2%, 64.9% and 50.2%, respectively.

Key words: free ammonia; aeration length; nitrite accumulation ratio; activity of nitrifying bacteria

短程生物脱氮是氨氧化菌(AOB)将氨氮氧化为亚硝酸盐氮,通过反硝化菌将亚硝酸盐氮还原成氮气的生化反应过程.与全程生物脱氮相比,短程生物脱氮可减少 25% 曝气量和 40% 碳源投加量^[1,2],并缩短 4.3 倍的反应历程^[3].短程生物脱氮实质是将硝化反应控制在亚硝化阶段,防止亚硝酸盐氮被亚硝酸盐氧化菌(NO₂-OB)进一步氧化为硝酸盐氮.

从微生物菌属种群变化角度看,短程生物脱氮是硝化反应过程使 AOB 菌属优势增殖,成为硝化菌群中的优势菌种^[4].实现 AOB 富集的主要因素包括:游离氨(FA)^[5-8]、pH 值^[9]、温度(T)^[10]、溶解氧(DO)^[6,11]、曝气时间(t)^[12-14]

等.众多研究表明,相对于 AOB,NOB 对 FA 的抑制作用更加敏感^[15],AOB 活性受到 FA 的短暂抑制后,其活性又迅速恢复.此外,曝气时间也是实短程硝化的主要控制因素.Gao 等^[13]研究表明,曝气时间过长会使亚硝酸盐氮积累率下降,导致短程硝化向全程硝化转变,且曝气时间比越小越有利于亚硝酸盐氮积累^[14].已有资料大多研究了

收稿日期: 2015-09-24; 修订日期: 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168028,51168027)

作者简介: 孙洪伟(1976~)男,博士,副教授,主要研究方向为高氨氮污水生物脱氮及过程控制, E-mail: shw@emails.bjtu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: fangxiaohang@scies.org

FA、 t 、DO 和 T 等单一因素对硝化菌活性的影响,较少涉及 FA 耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响. 基于上述背景,本试验采用 3 个平行的 SBR 反应器,考察了 FA 耦合曝气时间对硝化菌(AOB 和 NOB)活性的抑制作用.

1 材料与方法

1.1 试验装置、废水特性及接种污泥

本试验采用 SBR 反应器,有机玻璃构成,内、外径分别为 14 cm 和 15 cm,有效容积为 5 L. SBR 运行方式:瞬时进水(2 min),曝气硝化,投加碳源(95% 无水乙醇),缺氧搅拌,沉淀、排水(5 min),排水比 1:2.

表 1 实际生活污水水质特性

项目	COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO _x ⁻ -N/mg·L ⁻¹	pH
范围	147.7~315.6	29.4~44.6	0.05~0.25	7.1~7.8
平均值	203.3	40.7	0.07	7.4

1.2 试验方案

采用实际生活污水对接种污泥进行驯化,驯化时间 20 d. 污泥驯化结束后,均分入 3 个 SBR 反应器(分别表示为 R_{Exact} :硝化结束停曝气; R_{Ahead} :硝化结束前 30 min 停曝气; R_{Exceed} :硝化结束后 30 min 停曝气),反应器内污泥浓度为 2 500 mg·L⁻¹ 左右. 为了获得不同曝气时间,3 个反应器运行策略:首先,同时启动 R_{Exact} 和 R_{Exceed} ,30 min 后启动 R_{Ahead} . 其次,当 R_{Exact}

硝化和反硝化时间均采用 DO 和 pH 实时控制.

试验用水取自兰州交通大学生活区污水,其水质如表 1 所示. 通过投加 NH₄Cl 溶液(100 g·L⁻¹)调节初始 NH₄⁺-N 浓度,初始 pH 值通过 0.1 mol·L⁻¹ HCl 和 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 来调节,通过加热棒来控制反应器的运行温度(见表 2),硝化过程为不使 DO 成为硝化反应的限制因素,DO 浓度通过在线自动实时控制维持在 (2.5 ± 0.25) mg·L⁻¹ 范围内,曝气强度维持恒定为 0.15 m³·h⁻¹,氧转移效率在 10%~15% 范围内. 接种污泥取自兰州市安宁区七里河安宁污水处理厂,其性质为:MLSS = 8 000 mg·L⁻¹, pH 为 7.21~7.46.

硝化结束时(通过在线实时控制准确判断硝化反应终点),停止 R_{Exact} 和 R_{Ahead} 曝气,获得了硝化结束停曝气(R_{Exact})和硝化结束前 30 min 停曝气(R_{Ahead})两种条件. 最后, R_{Exceed} 继续运行 30 min,停曝气,获得了硝化结束后 30 min 停曝气运行条件.

依据试验设定 FA 浓度梯度(通过调节初始 NH₄⁺-N 浓度、pH 值和温度),将试验分为 3 个阶段,具体运行条件见表 2.

表 2 3 个 SBR 反应器运行参数¹⁾

运行条件	运行阶段		
	阶段 I ($n=20$)	阶段 II ($n=20$)	阶段 III ($n=52$)
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	30.0 ± 5.0	75.0 ± 6.3	90.00 ± 27
$T/^\circ\text{C}$	18.0 ± 0.8	25.0 ± 0.5	28.00 ± 0.5
pH	7.7 ± 0.2	8.0 ± 0.15	8.15 ± 0.15
FA/mg·L ⁻¹	0.5 ± 0.15	5.0 ± 0.45	10.00 ± 2.4
MLVSS/mg·L ⁻¹	2 500 ± 280	2 800 ± 210	3 000 ± 200

1) 表中数值为平均值 ± 标准偏差; n 为系统运行周期数

1.3 分析项目及检测方法

从反应器中取 100 mL 水样,用定量滤纸过滤,滤纸残余物在 105℃ 的烘箱内烘至恒重,冷却后测量 MLSS. 然后在 600℃ 的马弗炉内烘至恒重,冷却后测量 MLVSS. 过滤后的水样中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N, COD 均采用国家标准方法测定^[16], WTW-Multi 3420 测定仪检测 pH、DO 和温度.

FA 浓度的计算见式(1):

$$\text{FA} = \frac{17}{14} \frac{[\text{NH}_4^+-\text{N}] \times 10^{\text{pH}}}{\exp\left(\frac{6334}{273+T}\right) + 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

式中,FA 为游离氨浓度,mg·L⁻¹; [NH₄⁺-N] 为 NH₄⁺-N 浓度,mg·L⁻¹; T 为温度,℃; pH 为 pH 值.

AOB 活性的计算见式(2):

$$\eta_{\text{AOB活性}} = \left[1 + \frac{(\text{SAOR}_n - \text{SAOR}_M)}{\text{SAOR}_M} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\eta_{\text{AOB活性}}$ 为 AOB 活性,%; SAOR _{n} 为第 n 试验周期曝气结束时 SAOR(以 N/VSS 计),g·(g·d)⁻¹; SAOR _{M} 为第 M 试验阶段曝气结束时 SAOR 的平均值(以 N/VSS 计),g·(g·d)⁻¹.

NOB 活性的计算见式(3):

$$\eta_{\text{NOB活性}} = \left[1 + \frac{(\text{SNaPR}_n - \text{SNaPR}_M)}{\text{SNaPR}_M} \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\eta_{\text{NOB活性}}$ 为 NOB 活性, %; SNaPR_n 为第 n 试验周期曝气结束时 SNaPR (以 N/VSS 计), $\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$; SNaPR_M 为第 M 试验阶段曝气结束时 SNaPR 的平均值 (以 N/VSS 计), $\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 氨氮去除特性

图 1 为 R_{Exact} 、 R_{Ahead} 和 R_{Exceed} 系统内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除特性. 其中, 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度是 3 个 SBR 系统进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度平均值. 3 个阶段的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别为 29.4、72.0 和 90.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但 3 个系统的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度差异较大. 对于 R_{Exact} 和 R_{Exceed} , 整个试验过程中, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别低于 5.0

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 虽然进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度波动大, 但由于曝气时间充足, R_{Exact} 和 R_{Exceed} 获得了良好的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除特性.

对于 R_{Ahead} 系统, FA 浓度从阶段 I 的 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步提高到阶段 II 的 5.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 再进一步提高到阶段 III 的 10.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在阶段 I 和 II, 虽然曝气时间不足, 但 FA 浓度较低, 未对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除产生影响, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度平均值分别为 3.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 3.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而在阶段 III, 虽然曝气时间与阶段 I 和 II 相同, 但 FA 浓度增加, 导致从第 40 周期开始, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐增加, 其值均大于 13.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明 FA 对 AOB 活性产生抑制, 而文献资料报道, 能够抑制 AOB 的 FA 抑制范围是 10 ~ 150 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [17], 因此支持本现象. 而从第 72 周期后, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐减少, 表明 AOB 对 FA 产生了适应性. 对比 R_{Exact} 和 R_{Exceed} 均未出现此现象, 说明曝气时间充足, 可以避免 FA 对 AOB 的短期抑制.

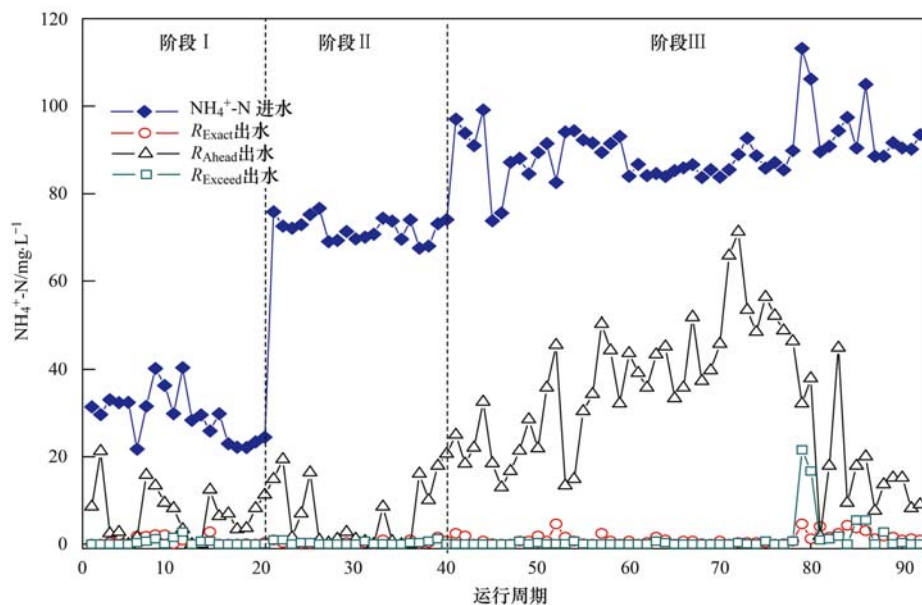


图 1 3 种 SBR 系统内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

Fig. 1 Ammonia removal in the three SBRs

2.2 FA 耦合曝气时间对硝化反应类型的影响

图 2 描述了不同 FA 浓度阶段, R_{Ahead} 、 R_{Exact} 和 R_{Exceed} 系统硝化反应类型的转变规律. 3 个系统中, 在阶段 I 和 II, 硝化结束时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均为主要硝化产物 (3 个系统在阶段 I 和 II, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均值分别为 14.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 44.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度始终低于 8.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此外, NiAR 始终维持在 0 ~ 25% 之内, 表明 3 个系统处于全程硝化阶段. 在阶段 III, 3 个系统内 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 的变化共同趋势为: 随着运行周

期增加, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度逐渐降低, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐升高, 导致 NiAR 逐渐升高, 表明系统的硝化反应类型从全程硝化向短程硝化转变. 当 3 个系统分别运行至第 56、62 和 72 周期时, 系统以 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为主要硝化产物, 其浓度均大于 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NiAR 维持在 52% ~ 60% 之间, 再进行 35、7 和 10 个周期后, 系统内 NiAR 均在 90% 以上, 表明系统完全处于稳定的短程硝化阶段. 此外, 结合表 3 可以看出, R_{Ahead} 最快实现短程硝化、 R_{Exact} 次之、 R_{Exceed} 最慢, 表明曝气

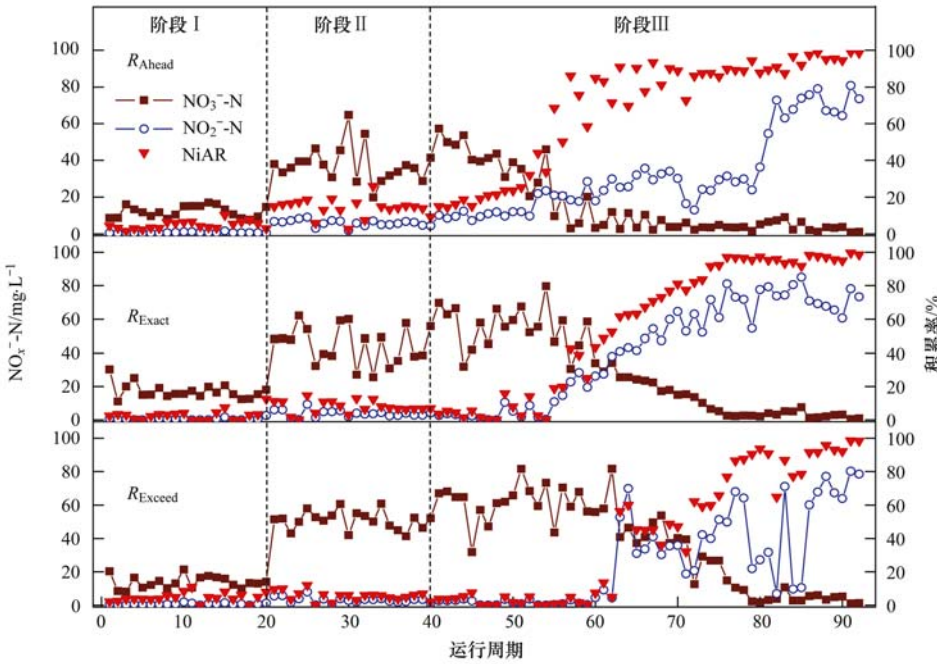


图 2 不同 FA 浓度阶段,系统内 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 NiAR 的变化规律

Fig. 2 Evolution of nitrite, nitrate and NiAR in the system under different FA concentrations

时间是短程硝化实现的不利因素.

相关研究表明^[12~14,18],延长曝气时间可以进一步促进NO₂⁻-N转化为NO₃⁻-N,破坏短程硝化,但本试验在过曝气条件下,FA 浓度达到 10.1 mg·L⁻¹时,NOB 的活性受到抑制,系统短程硝化并未被破坏,这与 Gao 等^[13]获得的过曝气容易引起短程硝化向全程硝化转变的试验结论不同,分析其原因在于:本试验利用 FA 对 NOB 活性的抑制作用实现短程硝化,也就是说,当 FA 浓度控制在

较高浓度值(10.1 mg·L⁻¹)时,FA 对 NOB 活性产生了强烈的抑制作用,NOB 完全失去了活性,因而在较短的过曝气时间(30 min)内,其活性尚未得到恢复.而 Gao 等^[13]是利用高温(28±0.5℃)实现短程硝化,其原理是创造了有利于 NOB 增殖的生理特性条件.在此高温条件下,AOB 活性高于 NOB 活性,导致氨氧化速率高于亚硝酸盐氧化速率,并未出现 NOB 活性被抑制的情况,因此,过曝气可使 NOB 活性迅速恢复.

表 3 3 种曝气时间下,短程硝化实现及维持过程对比

Table 3 Contrast of achieving and maintaining shortcut nitrification under three aeration patterns

系统	全程硝化稳定 运行周期	短程硝化实现 过程周期	短程硝化稳定 运行周期	硝化类型折点 出现周期
<i>R</i> _{Exact}	55	7	30	62
<i>R</i> _{Ahead}	21	35	36	56
<i>R</i> _{Exceed}	62	10	20	72

2.3 SBR 系统典型周期内氮的转化规律

为了更加清楚地表明 SBR 系统氮的转化规律及过程控制的作用,图 3 给出了 *R*_{Exact} 内 4 个典型周期内(第 6、37、63 和 69 周期)FA、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、pH 和 DO 的变化规律(由于 *R*_{Ahead} 和 *R*_{Exceed} 内典型周期内氮的转化规律与 *R*_{Exact} 内相似,本研究以 *R*_{Exact} 为例进行说明).

由图 3 可以看出,随着反应的进行,4 个典型周期 NH₄⁺-N 浓度均随反应时间增加而逐渐降低,曝气

结束时,出水 NH₄⁺-N 浓度均为 0.5 mg·L⁻¹ 以下.在第 6 和 37 周期,硝化结束时出现 NO₃⁻-N 浓度峰值(分别为 16.9 mg·L⁻¹ 和 57.2 mg·L⁻¹),未出现 NO₂⁻-N 积累,表明 NH₄⁺-N 主要被氧化为 NO₃⁻-N.然而在第 37、63 和 69 周期,硝化结束时出现 NO₂⁻-N 积累,其中在第 63 和 69 周期中,NO₂⁻-N 浓度出现峰值(分别为 44.3 mg·L⁻¹ 和 50.0 mg·L⁻¹),但也出现 NO₃⁻-N 的积累,表明 NH₄⁺-N 被氧化为 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N,其中 NO₂⁻-N 为主要硝化产物.这充分说明,

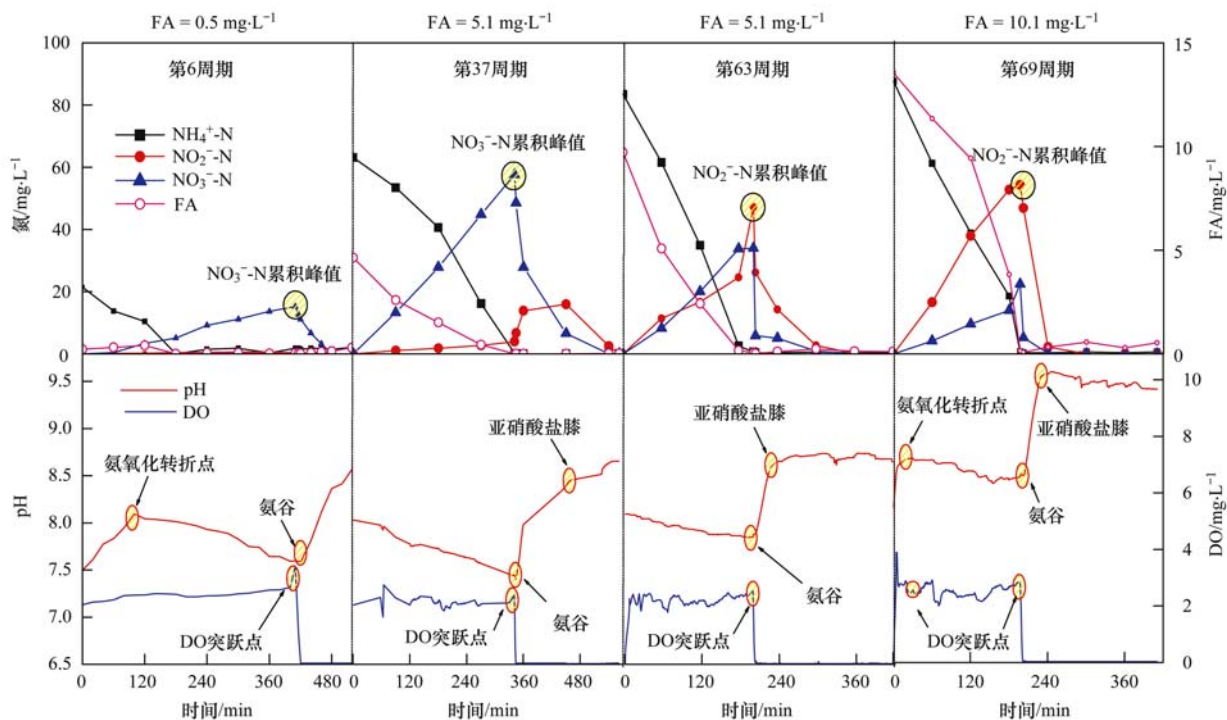


图3 不同FA浓度阶段, R_{Exact} 系统典型周期内氮的转化规律

Fig. 3 Typical variations of nitrogen at different stages of FA in the R_{Exact} system

在整个试验过程中, SBR 系统硝化类型由全程硝化逐步转变为短程硝化。

此外, 随着反应的进行, FA 浓度逐渐降低, 导致 FA 对 NOB 抑制作用逐渐减弱。如果不能准确把握硝化终点, 过曝气会导致系统长期在低 FA 条件下运行, 能失去 FA 对 NOB 活性的抑制作用, NO_2^- -N 进一步被 NOB 氧化为 NO_3^- -N。脱氮过程中, DO 和 pH 值的变化可以指示生化反应的进行^[14]。启动 SBR 反应器, 随着曝气的开始, 在易生物降解 COD 降解完成时, 系统好氧量需求下降, 在 DO 曲线上出现“第一个突跃点”(DO breakpoint), 系统进入硝化阶段, 由于硝化反应产酸, 在 pH 曲线上就会出现由上升到下降的“氨氧化转折点”(ammonia oxidizing point)。随着硝化反应的进行, 系统中 NH_4^+ -N 浓度、pH 值均逐渐降低, NO_2^- -N 浓度逐渐上升, 系统的需氧量逐渐减小, DO 浓度随之缓慢上升。当 NH_4^+ -N 基本被降解完时, 由于硝化反应结束不再消耗碱, 且继续曝气使 CO_2 逸出, 系统的碱度增加, 导致 pH 突然升高, 系统的 DO 浓度大幅增加, 在 DO 曲线上出现“第二个跳跃点”(DO breakpoint), pH 曲线上出现由下降转为上升的拐点, 称为“氨谷”^[15,19](ammonia valley)。投加外碳源乙醇, 系统开始进行反硝化, DO 浓度迅速下降为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 直至反硝化结束。由于反硝化过程产生碱度, 导致 pH 迅速升高。当系统

中 NO_2^- -N 浓度降为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反硝化结束, pH 曲线上出现了由急速上升到缓慢下降的点, 被称为“亚硝酸盐膝”(nitrite knee), 这主要是由于反硝化结束系统中不再产生碱度, 进入厌氧产酸阶段。DO 和 pH 值的变化规律与硝化和反硝化过程呈现较好的相关性。因此, 可以通过在线监测反应过程中, DO 和 pH 值的变化来间接地了解体系内氮的转化情况, 根据 pH 曲线的“氨谷”和 DO 曲线的“突跃点”来判断短程硝化终点, 从而控制曝气时间^[19], 使得 NOB 生长始终处于受抑制状态, 从而实现 SBR 系统稳定的短程硝化。

2.4 FA 耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响

图4给出了 R_{Exact} 、 R_{Ahead} 和 R_{Exceed} 系统 FA 耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响。可以看出, 3 个系统中, AOB 和 NOB 活性变化规律具有一定的相似性。当 FA 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时, AOB 和 NOB 活性较低, 分析原理在于: 根据莫诺 (Monod) 方程, 由于 FA 是 AOB 的基质底物, 当其浓度较低时, AOB 氧化 NH_4^+ -N 速率较低, 导致生成的 NO_2^- -N 较少, 因此, NOB 利用基质底物 (NO_2^- -N) 较少, 引起较低的 NOB 氧化 NO_2^- -N 速率。当 FA 浓度增加至 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, AOB 和 NOB 活性有所升高, 分析原因在于: FA 浓度的增加引起 AOB 利用的基质增加, 其氧化 NH_4^+ -N 的速率加快, 生成较多的 NO_2^- -N, NOB 可

利用的基质底物增加,使其具有较高的活性.然而,当 FA 浓度进一步增加至 $10.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, AOB 和 NOB 的活性表现出较大差异性. AOB 和 NOB 活性均表现出逐步降低的趋势,但 AOB 活性缓慢降低,当降低至一定程度时,其活性不再变化.而 NOB 活性迅速降低,直至降低至最低值 0.9% . 这充分表明:①FA 对 AOB 和 NOB 活性均产生抑制作用;②相对于 AOB,FA 对 NOB 的抑制作用更强.这也从微生物学角度解释了 3 个系统中,实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累的本质原因.

在阶段Ⅲ,3 个系统 AOB 和 NOB 活性表现出明显差异性,3 个系统 AOB 活性平均值分别为 132.8% 、 108.5% 和 142.1% ,故 R_{Exceed} 中 AOB 活性最高、 R_{Exact} 次之、 R_{Ahead} 最低.这是由于 R_{Ahead} 曝气时间较短,导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基质未完全反应,进而导致 AOB 生长缓慢,同时未反应的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基质导致系统中存在一定浓度的 FA,对 AOB 的活性产生抑制作用.此外, R_{Exceed} 系统 NOB 活性降低幅度最小、 R_{Exact} 次之、 R_{Ahead} 最大,其活性维持在极低水平,其值分别为 8.2% 、 6.4% 和 11.1% ,这主要是由于 FA 抑制耦合不同曝气时间引起的.

DO 是影响硝化过程的重要因素之一,低溶解氧条件下易发生亚硝酸盐氮积累,其机制在于:AOB 的氧饱和常数 ($K_{\text{O,AOB}}$) 一般为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 NOB 的氧饱和常数 ($K_{\text{O,NOB}}$) 为 $1.2 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [19]. 因此当反应体系中的 DO 浓度成为限制性因素时,即在较低的 DO 浓度下, AOB 的增殖速率加快,补偿了由于低 DO 所造成的代谢活动下降,使得氨氮氧化为亚硝酸盐氮的过程未受到明显影响.而 NOB 代谢能力大幅度下降,其氧化亚硝酸盐氮的能力大为减弱,从而造成体系中亚硝酸盐氮的积累.因此本试验所控制的 DO 浓度范围不利于 AOB 增殖,而有利于 NOB 增殖,不利于实现短程硝化,也就是说,该 DO 浓度条件,并未促进短程硝化的实现,也进一步证明了本试验短程硝化主要是利用 FA 抑制耦合曝气时间的控制来实现的.

对于 R_{Exact} 、 R_{Ahead} 和 R_{Exceed} 这 3 个系统中,硝化菌活性的变化差异体现了 FA 耦合曝气时间长期运行的结果,在 AOB 活性未受到完全抑制的前提下,提前停曝气可增加 FA 抑制 NOB 活性的程度,而过曝气可减缓 FA 抑制 NOB 的程度.此外,FA 浓度的突然大幅提升,对 AOB 和 NOB 活性均会产生强烈抑制作用,且 NOB 受抑制效应更为明显,甚至不可恢复.这也表明,曝气时间对 AOB 和 NOB 的活性

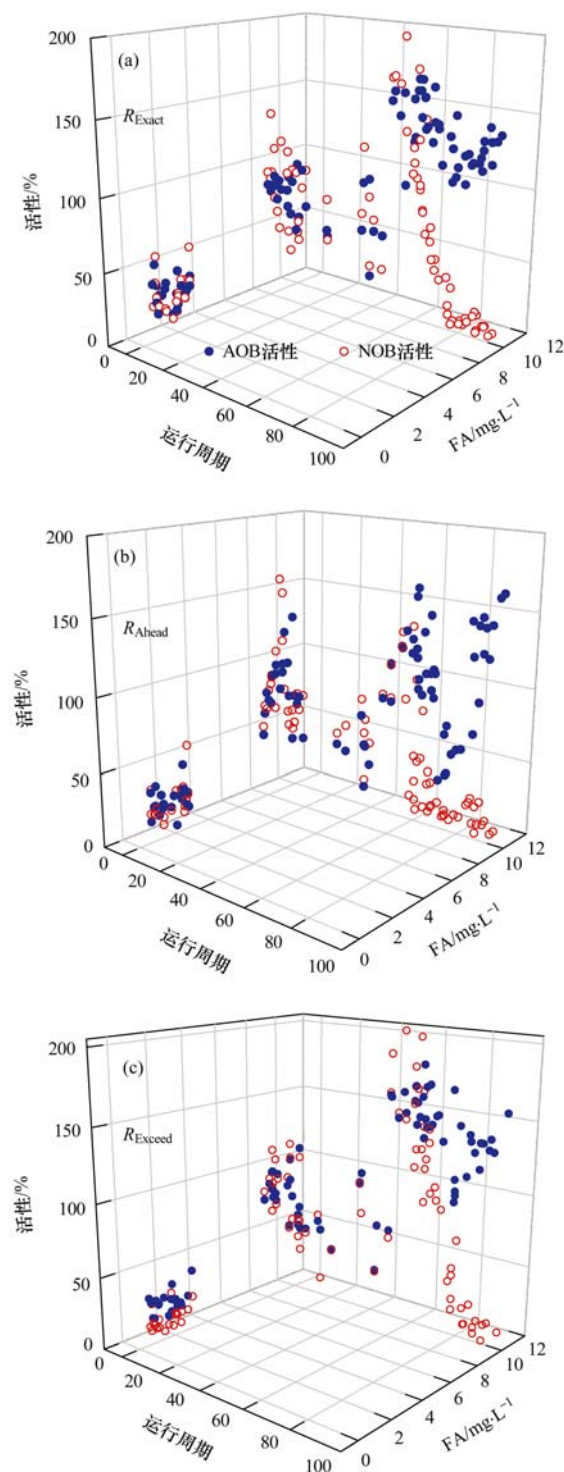


图 4 3 种系统,FA 耦合曝气时间对 AOB 和 NOB 活性的影响

Fig. 4 Effect of FA and aeration length on AOB and NOB activity in the three systems

产生一定的影响,通过延长曝气时间,可减缓 FA 对 NOB 的抑制程度.

3 结论

(1) 在相同 FA 浓度梯度下,曝气时间对

NH_4^+-N 去除效果影响较大. R_{Exact} 和 R_{Excess} 可获得 90% 以上的 NH_4^+-N 去除效果. 对于 R_{Ahead} , 由于曝气时间不足和 FA 初始抑制作用, 导致 R_{Ahead} 出水 NH_4^+-N 浓度在 $13.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 去除率仅为 63.9%.

(2) 相对 FA 耦合实时控制和延迟停曝气系统, FA 耦合提前停曝气系统更易于实现短程硝化, 过曝气是实现短程硝化的不利因素, 但当存在 FA 抑制作用时, 可避免过曝气对短程硝化的破坏.

(3) FA 耦合曝气时间可显著影响硝化菌活性, 对 NOB 活性的抑制作用大于对 AOB 的活性的抑制作用. 3 个系统内, 两类菌属活性的强弱关系为: R_{Exact} 的 AOB 活性最强、 R_{Exceed} 次之、 R_{Ahead} 最弱, 而 R_{Exceed} 的 NOB 活性最强、 R_{Exact} 次之、 R_{Ahead} 最弱.

参考文献:

- [1] Li J P, Elliott D, Nielsen M, *et al.* Long-term partial nitrification in an intermittently aerated sequencing batch reactor (SBR) treating ammonium-rich wastewater under controlled oxygen-limited conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **55**(3): 215-222.
- [2] Gali A, Dosta j, van Loosdrecht M C M, *et al.* Two ways to achieve an anammox influent from real reject water treatment at lab-scale: Partial SBR nitrification and SHARON process[J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42**(4): 715-720.
- [3] Chung J W, Bae W. Nitrite reduction by a mixed culture under conditions relevant to shortcut biological nitrogen removal[J]. *Biodegradation*, 2002, **13**(3): 163-170.
- [4] Zeng W, Zhang Y, Li L, *et al.* Control and optimization of nitrifying communities for nitritation from domestic wastewater at room temperatures[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2009, **45**(3): 226-232.
- [5] 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.
- [6] 孙家君, 刘芳, 胡筱敏. 溶解氧和曝气时间对好氧反硝化菌脱氮效果的影响[J]. *环境工程*, 2014, **33**(12): 62-64.
- [7] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 826-834.
- [8] 赵志瑞, 侯彦林. 半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2834-2842.
- [9] Zhang C S, Zhang S Q, Zhang L Q, *et al.* Effects of constant pH and unsteady pH at different free ammonia concentrations on shortcut nitrification for landfill leachate treatment[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(8): 3707-3713.
- [10] Gabarró J, Ganigué R, Gich F, *et al.* Effect of temperature on AOB activity of a partial nitritation SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **126**(24): 283-289.
- [11] 王莎, 戴晓虎, 曹达文, 等. 高氨氮废水的亚硝化调控因素研究[J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(11): 9-13.
- [12] 彭永臻, 杨岸明, 李凌云, 等. 短程硝化最优曝气时间控制与硝化种群调控[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, **45**(2): 101-105.
- [13] Gao D W, Peng Y Z, Li B K, *et al.* Shortcut nitrification-denitrification by real-time control strategies[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(7): 2298-2300.
- [14] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 曝停时间比对间歇曝气 SBR 短程硝化的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1152-1158.
- [15] 孙洪伟, 尤永军, 赵华南, 等. 游离氨对硝化菌活性的抑制及可逆性影响[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 95-100.
- [16] 国家环境保护总局. 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. 200-281.
- [17] Wu L, Peng Y Z, Ma Y, *et al.* The short-term effects of temperature and free ammonia on ammonium oxidation in granular and floccular nitrifying system[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, **20**(5): 1016-1023.
- [18] 李建政, 孟佳, 赵博玮, 等. 养猪废水厌氧消化液 SBR 短程硝化系统影响因素[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, **46**(8): 27-33.
- [19] 吴煌州, 邱凌峰, 陈益明, 等. 不同曝气量对短程硝化特性的影响[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2014, **42**(1): 161-166.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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

国内外公开发刊