ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第11期
2014年11月15日

目 次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 …… 邵平,安俊琳,杨辉,林旭,吉东生(4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 …… 邹嘉南,安俊琳,王红磊,邵平,段卿,薛国强,庞博(4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 …… 袁亮,银燕,李琦,肖辉,李力(4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 …… 廖志恒,范绍佳,黄娟,孙家仁(4061)
在线单颗粒气溶胶质谱SPAMS对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 …… 付怀于,闫才青,郑玫,蔡靖,李小滢,张延君,周振,傅忠,李梅,李磊,张远航(4070)
PM_{10}可替代源成分谱的建立方法及其应用 …… 陈强,景毅,吴焕波,王芳(4078)
夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 …… 王敬,陆小兰,杨桂朋,徐冠球(4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 …… 王娅,赵铮,木志坚,王定勇(4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 …… 刘娜娜,李斌,刘瑞霞,宋永会, 吴畏(4103)
深圳湾流域TN和TP入海年通量变化规律研究 …… 赵晨辰,张世彦,毛献忠(4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 …… 熊强,焦立新,王圣瑞,彭希珑(4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 …… 周晓红,刘龙梅,陈曦,陈志刚,张金萍,李义敏,刘彪(4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 …… 谢婷,罗东霞,杨瑞强(4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 …… 袁宏林,李星宇,王晓昌(4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 …… 武子澜, 杨毅,刘敏,陆敏,于英鹏,汪青,郑鑫(4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 …… 陈昱霖,李田,顾俊青(4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 …… 杜尔登,郑璐,冯欣欣,高乃云(4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 …… 蒋新跃,栾清,丛海兵,徐思涛,刘玉娇,朱学源(4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 …… 王旭东,张银辉,王磊,张慧慧,夏四清(4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 …… 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎(4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 …… 刘春苗,丁杰,刘先树,程旺斌(4192)
铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及As(Ⅲ)吸附性能研究 …… 张伟,陈静,张高生(4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 …… 楼菊青,杨东叶,曹永青,孙培德,郑平(4205)
光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 …… 唐青青,方治国,嵇雯雯,夏会龙(4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 …… 任玉辉,王科,李相昆,马凯丽,张杰(4218)
Fe^{2+}和Fe^{3+}对厌氧氨氧化污泥活性的影响 …… 李祥,黄勇,巫川,王孟可,袁怡(4224)
CSTR中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 …… 阴方芳,刘文如,王建芳,吴鹏,沈耀良(4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中N_2O产生量的影响 …… 王珊珊,梁红,高大文(4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 …… 曾国驱,贾晓珊,郑小红,杨丽平,孙国萍(4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 …… 王成,夏学齐,张义,廖启林,杨忠芳,季峻峰(4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 …… 苏思慧,何江涛,杨蕾,乔肖翠,崔亚丰(4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 …… 张俊,罗方园 ,熊浩徽,焦少俊,叶波平(4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 …… 刘若萱,贺纪正,张丽梅(4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 …… 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文(4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 …… 王莲阁,高岩红,丁长欢,慈恩,谢德体(4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中DDT还原脱氯影响 …… 刘翠英,徐向华,王壮,姚童言(4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 …… 卫泽斌,郭晓方,吴启堂,龙新宪(4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 …… 李洪建,高玉凤,严俊霞,李君剑(4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 …… 李平,郎漫,徐向华,李煜姗,朱淑娴(4321)
转Cry1Ac基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 …… 潘建刚,焦海华,白志辉,齐鸿雁,马安周,庄国强,张洪勋(4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 …… 郑顺安, 韩允垒, 郑向群(4338)
1-硝基芘和1,2-萘醌的联合细胞毒性和致DNA损伤 …… 尚羽,蒋玉婷,张玲,李怡(4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 …… 卜贵军,于静,邸慧慧,罗世家,周大寨,肖强(4352)
污泥预植重金属Cu炭化及炭中重金属的稳定性研究 …… 窦晓敏,陈德珍,戴晓虎(4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 …… 田颖,王珅,徐期勇(4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场N_2O产生的影响 …… 卞荣星,孙英杰,李晶晶,张欢欢(4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 …… 蒋晶晶,叶斌,计军平,马晓明(4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 …… 赵海霞,蒋晓威,崔建鑫(4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 …… 张雪莹,温宗国(4395)
大气棕色碳的研究进展与方向 …… 闫才青, 郑玫, 张远航(4404)
《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N_2O 产生量的影响

王珊珊[1], 梁红[1*], 高大文[1,2]
(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用好氧 SBR 反应器, 考察盐度在 0、5、10 g·L^{-1}条件下好氧颗粒污泥全程硝化过程中N_2O产生量的变化情况以及对系统脱氮效果的影响. 结果显示, 随着污水中盐度增加, N_2O产生量呈递增趋势. 在 3 个盐度下(0、5、10 g·L^{-1}), 溶解态N_2O产生量分别为 1.21、8.99、24.81 mg·m^{-3}, 释放态N_2O产生量分别为 0.95、3.46、16.45 mg·m^{-3}. 在盐度为 5 g·L^{-1}和 10 g·L^{-1}条件下, N_2O释放速率分别为 0 g·L^{-1}时的 3.6 倍和 17.4 倍. 在 3 种盐度条件下无论是溶解态N_2O还是释放态N_2O产生量在硝化过程的变化趋势均是先上升后下降, 且溶解态N_2O产生量大于释放态产量. 另外当盐度浓度较低时(低于 5 g·L^{-1}), 对NH_4^+-N去除效果影响较小, NH_4^+-N的去除率与盐度为 0 g·L^{-1}时基本相同, 均在 98% 以上; 但当盐度升至 10 g·L^{-1}后, NH_4^+-N 的去除率降到了 70%. 因此, 污水中盐度增加不仅影响NH_4^+-N的去除效率, 而且增加N_2O产生量.

关键词: 盐度; 好氧颗粒污泥; 生物脱氮; 硝化过程; N_2O
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)11-4237-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.11.028

Effects of Salinity on N_2O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge

WANG Shan-shan[1], LIANG Hong[1], GAO Da-wen[1,2]
(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: An aerobic SBR biological wastewater treatment system was adopted to measure the N_2O production and nitrogen removal using aerobic granular sludge nitrification process under 0, 5, 10 g·L^{-1} salinity conditions. The results showed that the N_2O production increased with the increase of salinity concentration. At three salinity levels (0, 5, 10 g·L^{-1}), the dissolved N_2O production was 1.21, 8.99, 24.81 mg·m^{-3}, respectively, and the released N_2O was 0.95, 3.46, 16.45 mg·m^{-3}, respectively. The N_2O release rates at the 5 g·L^{-1} and 10 g·L^{-1} salinity levels were 3.6 and 17.4 times as high as that at the 0 g·L^{-1} salinity level. Under various salinity conditions both the dissolved and releasing state N_2O production first increased and then decreased, and the dissolved N_2O production was greater than that in the releasing state. In addition, when the salinity was low (less than 5 g·L^{-1}), the NH_4^+-N removal rate was less affected and almost the same with the condition of 0 g·L^{-1}, both over 98%. When the salinity was increased to 10 g·L^{-1}, the NH_4^+-N removal rate dropped to 70%. Thus, increasing the salinity of wastewater not only affected the system nitrogen removal rate but also increased the amount of N_2O production.

Key words: salinity; aerobic granular sludge; biological nitrogen removal; nitrification process; N_2O

随着全球变暖, 温室效应受到越来越多的关注. 大气中的气体种类繁多, N_2O是其中一种非常重要的痕量气体, 是引起地球表面气温上升的三大温室气体(N_2O、CH_4、CO_2)之一[1]. N_2O的温室效应是CO_2的 300 倍左右[2], CH_4的 20~30 倍[3], 对全球温室效应的贡献约占 5%~6%[4]. 目前有研究表明, 废水处理中的微生物脱氮过程所排放的N_2O量是人为排放的N_2O量的重要组成部分[5]. 在污水生物脱氮过程中每天约有 $(0.3\sim3)\times10^9$ t 的N_2O排放到大气中去, 占全球N_2O排放总量的 2.5%~25%[6]. N_2O的产生主要发生在污水生物脱氮过程中的硝化阶段, 反硝化阶段产生的N_2O量相对较少[7~9]. 国内外很多研究对废水生物处理脱氮过程中N_2O的产生机制[10]、释放量[11]和影响因素[12]等进行了报道, 但大多集中在传统的絮状活性污泥及生物膜方面, 而好氧颗粒污泥方面的相关研究较少. 好氧颗粒污泥是一种沉降速度远快于絮状活性污泥的微生物颗粒状聚合体[13], 其具有生物结构致密、沉降速度快、同步脱氮除磷等优点[14~15], 在污水生物处理方面具有很好的应用前景.

随着淡水资源的紧缺, 许多沿海城市开始直接

收稿日期: 2014-04-18; **修订日期**: 2014-06-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(21177033); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20092302110059)
作者简介: 王珊珊(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向污水生物脱氮过程中温室气体的释放, E-mail: 1186223749@qq.com
* 通讯联系人, E-mail: hongliang@nefu.edu.cn

利用海水,从而产生了含盐废水,含盐废水主要来源于直接利用海水的工业生产、生活污水和食品加工厂、制药厂、化工厂及石油天然气的采集加工等[16]. 目前国内外在含盐废水的基础上针对不同菌群,不同盐度冲击,不同 C/N 对N_2O释放量的影响做了一些研究[17],但在好氧颗粒污泥的基础上开展的较少. 盐度不仅干扰微生物正常的新陈代谢,而且影响污水处理过程中的效率[18]; 因此,研究盐度对N_2O释放量的影响对于温室效应的控制和含盐废水的处理都具有重要的意义.

本试验通过调节配水中 NaCl 的投加量,在尚会来等[19]絮状活性污泥研究的基础上进一步了解盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中脱氮效果及N_2O产生量的影响.

1 材料与方法

1.1 试验用水及种泥

本试验采用人工模拟废水,水质情况为: COD (150 ± 10) mg·L^{-1},NH_4^+-N(40 ± 2) mg·L^{-1},PO_4^{3-}-P (4 ± 0.5) mg·L^{-1},同时投加适量营养液(1 mL·L^{-1})以提供体系内微生物的生理活动所需的必要微量元素. 微量元素 (g·L^{-1})组成: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 1.5; H_3BO_3 0.15; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.03; KI 0.18; EDTA 10; $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 0.12; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.12; $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.15.

试验所用污泥为实验室已经培养成熟的具有稳定硝化功能的好氧颗粒污泥,成熟的颗粒污泥大小均衡,平均粒径为 2 mm,呈圆形或椭圆形,色泽为金黄色,结构密实[20]. 系统污泥浓度维持在 4 000 mg·L^{-1}.

1.2 试验装置及运行方式

试验装置采用 SBR 反应器,有效容积为 3.2 L,具体结构参见文献[21]. 试验采用时间控制模式,曝气时间固定为 180 min; 利用反应器底部的微孔曝气头,通过鼓风机和转子流量计来调节曝气量,曝气量恒定为 0.35 $m^3 \cdot h^{-1}$; 利用 Multi340i 型(WTW 公司)便携式多功能 DO、pH、ORP 测定仪在线测定体系内 DO 值、pH 值以及 ORP 值的动态变化,系统 DO 维持在 6 mg·L^{-1}以上,进水 pH 7 ~ 8; 温度采用温控仪实时控制反应器温度为(31 ± 0.5)℃; 试验过程中每天运行 3 个周期,定期取样.

试验过程中采用 NaCl 调节污水的盐度,初始盐度设为 0 g·L^{-1},然后以 5 g·L^{-1}为单位逐渐增加系统的盐度,其他运行条件保持不变.

1.3 分析方法

1.3.1 水样分析

试验水质中 COD、NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N等指标采用国家标准方法[22]测定.

1.3.2 N_2O检测方法

脱氮过程中产生的N_2O由两部分组成,其中逸出反应器,释放于大气中的一部分N_2O气体,称为释放态N_2O; 溶解于污泥混合液中的N_2O气体,称为溶解态N_2O. 释放态N_2O测定: 用 50 mL 玻璃注射器从反应器气阀处伸入反应器,在反应器上部的空气中抽取 30 mL 气样经过过滤塞后进行检测. 本试验采用日本岛津 2010 气相色谱仪,Porapak Q 色谱柱(30 m × 0.53 mm × 20 μm)测定N_2O. 色谱条件为进样口温度 150℃,柱温 70℃,ECD 检测器 300℃. 溶解态N_2O测定: 采用上部空间法测定. 用 50 mL 玻璃注射器取 20 mL SBR 反应器中颗粒污泥混合液,加入 1 mL 浓度 1 mol·L^{-1}的 H_2SO_4 用来抑制微生物活性,同时抽取 30 mL 的空气,手摇 2 min 后,静置 1 h[23]. 1 h 后取注射器内上部的气体进入气相色谱检测.

2 结果与分析

2.1 盐度对硝化过程中NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N变化的影响

盐度是微生物活性的重要影响因素. 反应器启动后经过 50 个周期的运行,颗粒污泥的脱氮效果基本稳定,达到 98% 以上. 逐级改变盐度,在盐度为 5 g·L^{-1}和 10 g·L^{-1}条件下分别运行 30 个周期,反应器达到稳定状态后进行水样分析和N_2O的检测. 可以看出,3 个盐度条件下的氨氮浓度呈现逐渐下降的趋势(图 1). 当反应周期结束时,在 0 g·L^{-1}和 5 g·L^{-1}盐度条件的NH_4^+-N浓度均低于 1 mg·L^{-1},去除率达到 98% 以上,系统的NH_4^+-N去除率非常好,可见将盐度增加到 5 g·L^{-1}并未对系统的脱氮效果产生较大影响,说明在该盐度范围内硝化菌通过调节自身的渗透压,对外界的渗透压变化进行了适应[24],从而缓冲了盐度的抑制作用; 在这两种盐度条件下系统中NO_2^--N浓度的变化趋势基本相同,前 120 min 均为上升的态势, 120 min 至试验结束NO_2^--N浓度逐渐下降,即前 120 min 2 个系统NO_2^--N的产生速度均高于NO_2^--N的氧化速度,之后NO_2^--N的氧化速度高于NO_2^--N的产生速度. 而盐度为 10 g·L^{-1}时NO_2^--N浓度始终呈直线上升的趋势没有逐渐下降的趋势,说明整个过程中NO_2^--N的产生速度

始终高于NO_2^--N的氧化速度. 但是图中显示在 0 g·L^{-1}和5 g·L^{-1}两个盐度条件下的NO_2^--N积累量和产生速度是不同的,120 min 时两个系统中的NO_2^--N浓度分别为4.46 和 7.20 mg·L^{-1},而且是随着盐度的升高,NO_2^--N的积累量和产生速度逐渐升高. 试验结束时它们的NO_2^--N浓度分别降至0.24 和 4.31 mg·L^{-1}. NO_2^--N积累量的减小速度分别为 0.070 mg·(L·min)$^{-1}$和0.048 mg·(L·min)$^{-1}$. 由此可见,NO_2^--N的产生速率和氧化速率受氨氮和亚硝酸盐的浓度影响,而且 AOB 受盐度影响也较为明显,随盐度的升高NO_2^--N的产生速度和氧化速度均逐渐升高. 将盐度为 0 g·L^{-1}和 5 g·L^{-1}这两个条件下NO_3^--N浓度变化曲线进行对比可以看出,在一定盐度范围内,随着盐度的增加,NO_3^--N的产生量和产生速度均随之升高,周期运行结束时,NO_3^--N出水浓度分别为24.69 mg·L^{-1}和42.21 mg·L^{-1}. 说明在一定盐度范围内硝酸盐氧化菌的活性并没有受到抑制. 而当盐度增加到 10 g·L^{-1}后,高盐度的突然冲击使得硝化细菌的活性受到了严重的抑制,系统中硝态氮几乎没有. 同时,对比同样盐度条件下亚硝态氮浓度的变化可以发现,系统的全程硝化颗粒污泥转化为了短程硝化.

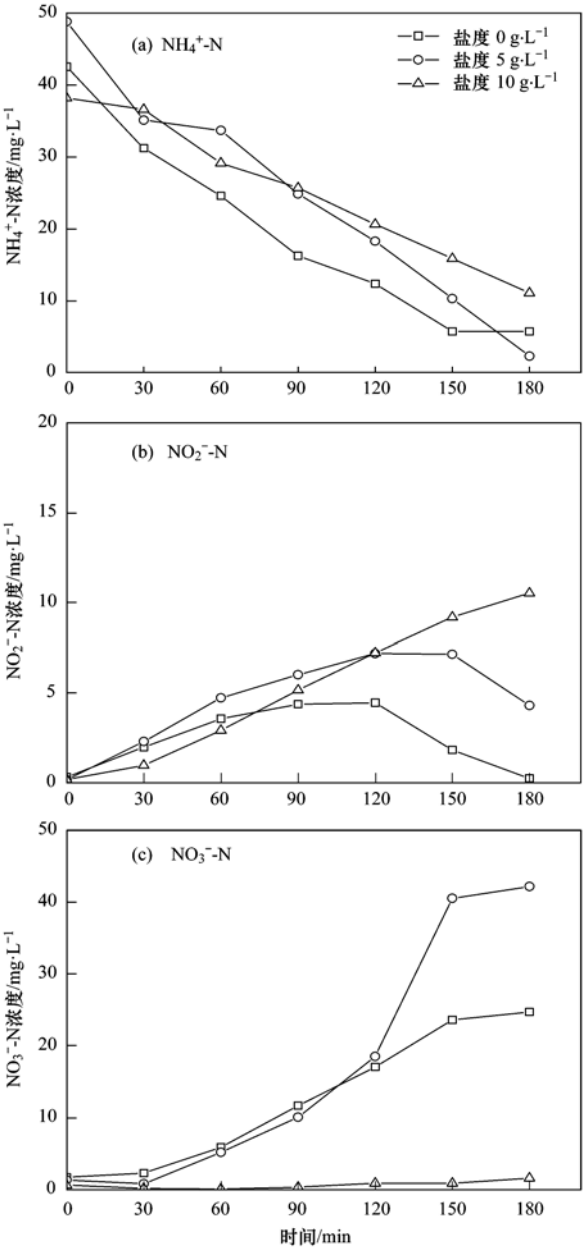

图 1　不同盐度下NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N变化情况

Fig. 1　Changes of NH_4^+-N, NO_2^--N and NO_3^--N at different salinity levels

在0 g·L^{-1}和5 g·L^{-1}盐度条件下,NH_4^+-N去除率均在98%以上,NO_2^--N转化率较低,在9%以下,硝态氮转化率维持在 83% 左右; 而 10 g·L^{-1}时NH_4^+-N去除率仅为71.04%; NO_2^--N的转化率由原来的 0.57% 上升到 27.58%, NO_3^--N 转化率由50.99%降到4.05%. 另外,计算 3 个盐度条件下前120 min 的NH_4^+-N氧化速率得出,它们的氧化速率分别为 0.260 mg·(L·min)$^{-1}$、 0.203 mg·(L·min)$^{-1}$和0.173 mg·(L·min)$^{-1}$. 可以看出,盐度的增加对污泥中微生物的活性产生了明显的抑制作用[25]. 通过计算总的氮平衡可知,颗粒污泥内部在进行硝化过程的同时也在进行着反硝化作用,盐度增加到 10 g·L^{-1}时,硝化作用和反硝化作用都减弱,说明高盐度对氨氧化菌和反硝化菌的酶活性都起到了抑制的作用,使其新陈代谢速率减慢[26].

2.2　盐度对硝化过程中N_2O产生量的影响

以稳定运行的典型周期为例,随着盐度的改变,释放态和溶解态的N_2O产生量都呈增加的趋势(图2). 盐度为0 g·L^{-1}时,释放态和溶解态的产生量基

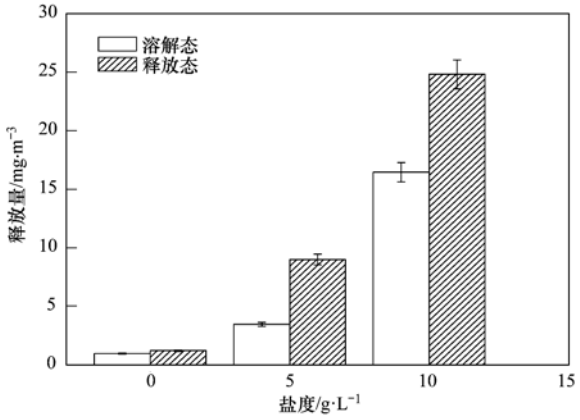

图 2　不同盐度下N_2O产生量

Fig. 2　Amount of N_2O production at different salinity levels

本一致,且都低于 1.5 mg·m^{-3}; 盐度为 5 g·L^{-1}时,释放态和溶解态产量均小于 10 mg·m^{-3},当盐度增加到 10 g·L^{-1},释放态和溶解态产量均大于 10 mg·m^{-3},且溶解态多于释放态. 比较释放态和溶解态N_2O产生量的变化趋势可以看出,单个盐度下,释放态产生量少于溶解态的产生量. 在 3 个盐度下(0、5、10 g·L^{-1}),释放态N_2O产生量分别为 0.95、3.46、16.45 mg·m^{-3},溶解态N_2O产生量分别为 1.21 、8.99、24.81 mg·m^{-3},在盐度为 5 g·L^{-1}和 10 g·L^{-1}条件下,N_2O释放速率分别为 0 g·L^{-1}时的 3.6 倍和 17.4 倍.

2.3 不同盐度下典型周期内NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N变化与N_2O产生量的关系

3 个盐度条件下无论是释放态N_2O还是溶解态N_2O均是先升后降的变化趋势. 释放态和溶解态的N_2O产生量的峰值均以盐度为 5 g·L^{-1}时的最高,10 g·L^{-1}盐度条件其次,最低的是盐度为 0 g·L^{-1}时. 释放态N_2O产生量的峰值出现的时间是相同的. 但是,溶解态N_2O产生量的峰值出现的时间有所不同,盐度为 5 g·L^{-1}时出现的时间较盐度为 0 g·L^{-1}时出现的时间提前; 盐度为 10 g·L^{-1}时较 0 g·L^{-1}时推后(图 3). 盐度为 0 g·L^{-1}时,释放态的N_2O产生量前 60 min 是不断上升,峰值出现在 60 min 时,为 17.14 mg·m^{-3},试验结束时的释放态N_2O产生量降至 0.95 mg·m^{-3}; 盐度为 5 g·L^{-1}时,; 前 60 min 释放态N_2O产生量逐渐上升,60 min 达到峰值 35.85 mg·m^{-3},周期结束时降至 3.46 mg·m^{-3}; 盐度为 10 g·L^{-1}时N_2O产生量与前两个盐度条件有相似的变化趋势,释放态N_2O前 60 min 逐渐上升,60 min 达到峰值 25.12 mg·m^{-3},60 min 后逐渐下降,周期结束时降至 16.45 mg·m^{-3}. 溶解态的N_2O产生量,120 min 时达到峰值 18.40 mg·m^{-3},周期结束时降至 1.21 mg·m^{-3}; 盐度为 5 g·L^{-1}时,180 min 时达到峰值 41.57 mg·m^{-3},周期结束时降至 8.99 mg·m^{-3}; 盐度为 10 g·L^{-1}时,N_2O产生量 180 min 达到峰值 35.53 mg·m^{-3},之后逐渐下降至 24.81 mg·m^{-3}. 说明盐度对释放态N_2O产生量的峰值出现时间没有产生影响,对溶解态N_2O产生量的峰值出现的时间有一定的影响[27].

为了能够更准确地了解盐度对该系统中N_2O产生量的影响,分别用公式[28]计算出不同盐度条件下好氧颗粒污泥硝化过程中的硝化速率和N_2O的释放速率.

表 1 给出了不同盐度条件下硝化速率和N_2O释放速率的变化情况. 从表 1 数据可以发现,在盐度逐渐增加的过程中污泥的硝化速率有小幅的波动,盐度为 5 g·L^{-1}时,硝化能力最强,盐度达到 10 g·L^{-1}后硝化能力有小幅下降,说明盐度的突然改变影响了微生物的硝化能力,但并未完全抑制微生物的活性. 同时盐度增加后N_2O的释放速率也发生了明显的变化,盐度增加,释放速率加快.

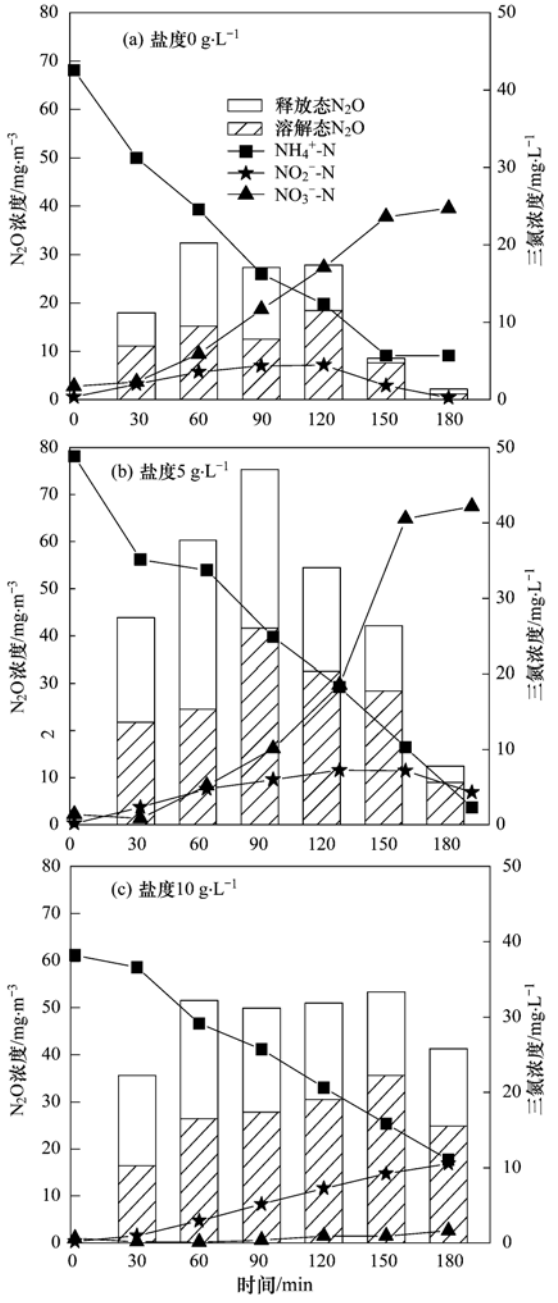

图 3 不同盐度下典型周期内NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N和N_2O的变化情况

Fig. 3 Changes of NH_4^+-N, NO_2^--N, NO_3^--N and N_2O in a typical cycle at different salinity levels

表 1　不同盐度条件下硝化速率和N_2O的产生及释放速率

Table 1　Nitrification rate and production and releasing rates of N_2O under different salinity conditions

盐度 /g·L^{-1}	硝化速率 /mg·(g·min)$^{-1}$	N_2O产生速率 /mg·(m^3·min)$^{-1}$	N_2O释放速率 /mg·(m^3·min)$^{-1}$
0	0.050 2	0.012 0	0.005 30
5	0.055 8	0.069 2	0.019 2
10	0.048 9	0.229	0.091 4

2.4　盐度对硝化过程中氮平衡的影响

在盐度为 0 g·L^{-1}条件下，以第 50 个稳定运行的周期为例[图 4(a)]. 截止到好氧曝气结束时，体系中剩余的NH_4^+-N为 5.71 mg·L^{-1}，占总投加量的 13.42%. 产生的NO_2^--N为 0.24 mg·L^{-1}，占总投加量的 0.57%. NO_3^--N浓度为 24.69 mg·L^{-1}，占总投加量的 58.04%. N_2O的产生量为 2.16 mg·m^{-3}，占总投加量的 0.01%，体系存在 27.96% 的氮损失.

在盐度为 5 g·L^{-1}条件下，以第 80 个稳定运行的周期为例[图 4(b)]. 截止到好氧曝气终止时，体系中剩余的NH_4^+-N为 2.27 mg·L^{-1}，占总投加量的 3.86%. 产生的NO_2^--N为 4.31 mg·L^{-1}，占总投加量的 7.32%. NO_3^--N浓度 42.21 mg·L^{-1}，占总投加量的 71.74%. N_2O的产生量为 12.45 mg·m^{-3}，占总投加量的 0.02%，体系存在 17.06% 的氮损失.

在盐度为 10 g·L^{-1}条件下，以第 110 个稳定运行的周期为例[图 4(c)]. 截止到反应周期结束，体系中剩余的NH_4^+-N为 11.06 mg·L^{-1}，占总投加量的 28.95%. 产生的NO_2^--N为 10.53 mg·L^{-1}，占总投加量的 27.58%. NO_3^--N浓度 1.61 mg·L^{-1}，占总投加量的 4.21%. N_2O的产生量为 41.26 mg·m^{-3}，占总投加量的 0.11%，体系存在 39.15% 的氮损失.

3 个盐度条件下体系均有一定的氮损失，这部分氮损失包括活性污泥的同化作用，用于合成微生物自身的细胞组织，但主要还是因为好氧颗粒污泥内部发生了同步硝化反硝化的现象. 随着盐度的增加，NO_2^--N在氮平衡中占的比例由 0.57% 上升到 7.32%，最后达到 27.58%；而NO_3^--N所占的比例则由原来的 58.04% 先上升到 71.74%，然后下降到 4.21%；N_2O的产生量和在氮平衡中所占的比例则是逐渐增加与NO_2^--N变化趋势一致. N_2O通常被认为是硝化作用或者是反硝化作用不完全而产生的气态副产物，大量研究表明N_2O主要还是在好氧硝化阶段生成且好氧段的N_2O释放主要来源于以 *Nitrosomonas* 属为主体的硝化细菌的反硝化作用[29]；对比图 4，盐度由 0 g·L^{-1}增加到 5 g·L^{-1}氮损失减少，到 10 g·L^{-1}时氮损失又增多，而N_2O产量却一直呈现增加的趋势，说明除了硝化细菌的反硝化作用，亚硝化过程中也产生N_2O，一方面可能是由亚硝化过程的第一个中间体 NH_2OH 在羟氨氧化还原酶的作用下氧化生成[30]，另一方面可能是由于亚硝化过程的第二个中间体 NOH 通过双分子聚合反

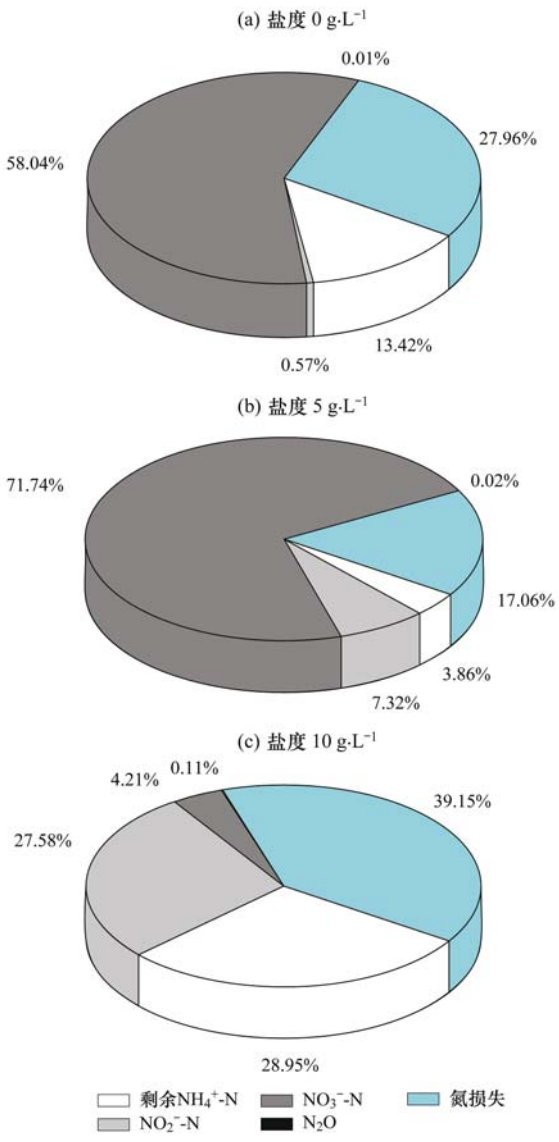

图 4　不同盐度下好氧硝化阶段的氮平衡

Fig. 4　Nitrogen balance under different salinity during aerobic nitrification stage

应生成次亚硝酸盐,然后进一步水解生成N_2O逸出[31]. 同时,盐度的增加使NO_2^--N与NO_3^--N的比例发生改变,系统的硝化类型由原来的全程硝化转变为短程硝化.

3 结论

(1)盐度为 0 g·L^{-1}与 5 g·L^{-1}条件下,体系NH_4^+-N去除率均达到 98% 以上; 但当盐度升至 10 g·L^{-1}时,NH_4^+-N的去除率降到 70%. 说明盐度的升高影响了系统中微生物的酶活性,使脱氮效果下降.

(2)随着盐度的增加,溶解态和释放态N_2O产生量逐渐增加,且溶解态N_2O产生量大于释放态. 其中,盐度为 5 g·L^{-1}时溶解态与释放态N_2O峰值数最高,而且每个盐度条件下释放态N_2O最大产生量均出现在 60 min 时,溶解态峰值出现时间则随着盐度的不同提前或者延迟出现,表明盐度对系统中的亚硝酸盐还原酶(Nir)和一氧化氮还原酶(Nor)产生了促进或抑制作用.

(3)在逐渐升高盐度的过程中,NO_2^--N出水浓度由原来的 0.2 mg·L^{-1}逐渐上升到 10.53 mg·L^{-1}; NO_3^--N出水浓度由最初的 21.69 mg·L^{-1}下降到 2 mg·L^{-1}以下. 可见盐度的变化,改变了系统中微生物的组成,使系统的硝化类型在盐度逐渐升高的过程中由原来的全程硝化转变成短程硝化.

参考文献:

[1] 张婷婷, 张建, 杨芳, 等. 温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1283-1287.

[2] Beline F, Martinez J, Chadwick D, *et al*. Factors affecting nitrogen transformations and related nitrous oxide emissions from aerobically treated piggery slurry [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, **73**(3): 235-243.

[3] Houghton J T, Meiro Filho L G, Callander B A, *et al*. Climate change 1995: the science of climate change: contribution of working group Ito the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.

[4] 刘秀红, 彭永臻, 马涛, 等. 硝化类型对污水脱氮过程中N_2O产生量的影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 633-637.

[5] Avrahami S, Conrad R, Braker G. Effect of soil ammonium concentration on N_2O release and on the community structure of ammonia oxidizers and denitrifiers [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(11): 5685-5692.

[6] Liu M, Liu T T, Peng Y Z, *et al*. Effect of salinity on N_2O production during shortcut biological nitrogen removal from landfill leachate[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, **117**(5): 582-590.

[7] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. SRT 对于污水脱氮过程中N_2O产生的影响[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(4): 754-758.

[8] Hanaki K, Hong Z, Matsuo T. Production of nitrous oxide gas during denitrification of wastewater [J]. Water Science and Technology, 1992, **26**(5-6): 1027-1036.

[9] Zheng H, Hanaki K, Matsuo T. Production of nitrous oxide gas during nitrification of wastewater [J]. Water Science and Technology, 1994, **30**(6): 133-141.

[10] 刘秀红, 杨庆, 吴昌永, 等. 不同污水生物脱氮工艺中N_2O释放量及影响因素[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(12): 1940-1947.

[11] 吴昌永, 彭永臻, 刘秀红, 等. 污水生物脱氮过程中温室气体N_2O的产生与控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, **40**(10): 1586-1589.

[12] Kim J K, Park K J, Cho K S, *et al*. Aerobic nitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains[J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(17): 1897-1906.

[13] 彭永臻, 吴蕾, 马勇, 等. 好氧颗粒污泥的形成机制、特性及应用研究进展[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 273-281.

[14] Tallec G, Garnier J, Billen G, *et al*. Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(7): 2200-2209.

[15] 谢珊, 李小明, 曾光明, 等. SBR 系统中好氧颗粒污泥脱氮特性研究[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(3): 355-359.

[16] Yang Q, Liu X H, Peng C Y, *et al*. N_2O production during nitrogen removal via nitrite from domestic wastewater: Main sources and control method [J]. Environmental Sciences and Technology, 2009, **43**(24): 9400-9406.

[17] Adocuani N, Lendormi T, Limousy L, *et al*. Effect of the carbon source on N_2O emissions during biological denitrification [J]. Resources Conservation and Recycling, 2010, **54**(5): 299-302.

[18] 文湘华, 占新民, 王建龙, 等. 含盐废水的生物处理研究进展[J]. 环境科学, 1999, **20**(3): 104-106.

[19] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 盐度对污水硝化过程中N_2O产量的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1079-1083.

[20] 陈丽丽, 高大文. 微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N_2O产生量的研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3533-3577.

[21] 韩雪, 高大文. 不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中N_2O产生量的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 204-208.

[22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-284.

[23] Shiskowski D M. Nitrous oxide a powerful greenhouse gas with a wastewater treatment connection [A]. In: Proceedings of the Water Environment Federation[C]. 2007. 1279-1290.

[24] Teixeira C, Magalhaes C, Joye S B, *et al*. The role of salinity in shaping dissolved inorganic nitrogen and N_2O dynamics in estuarine sediment-water interface [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **66**(1-2): 225-229.

[25] Sovik A K, Klove B. Emission of N_2O and CH_4 from a

constructed wetland in southeastern Norway[J]. Science of the Total Environment, 2007, **380**(1-3): 28-37.

[26] Desloover J, Vlaeminck S E, Clauwaert P, *et al*. Strategies to mitigate N_2O emissions from biological nitrogen removal systems [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2012, **23**(3): 474-482.

[27] Tsuneda S, Mikami M, Kimochi Y, *et al*. Effect of salinity on nitrous oxide emission in the biological nitrogen removal process for industrial wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, **119**(1-3): 93-98.

[28] 杨姣玲, 高大文, 彭永臻. 温度对颗粒污泥脱氮过程中N_2O产生量的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(12): 1622-1626.

[29] Yu R, Kampschreur M J, van Loosdrecht M C M, *et al*. Mechanisms and specific directionality of autotrophic nitrous oxide and nitric oxide generation during transient anoxia[J]. Environmental Science Technology, 2010, **44**(4): 1313-1319.

[30] Liang H, Yang J L, Gao D W. N_2O emission from nitrogen removal via nitrite in oxic-anoxic granular sludge sequencing batch reactor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(3): 537-541.

[31] Wunderlin P, Mohn J, Joss A, *et al*. Mechanisms of N_2O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions[J]. Water Research, 2012, **46**(4): 1027-1037.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2014 年 9 月 26 日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续 13 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 11

Nov. 15, 2014

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb ····· SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, *et al.* (4031)

Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China ····· ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, *et al.* (4044)

Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility ····· YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, *et al.* (4052)

Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013 ····· LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, *et al.* (4061)

Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter ····· FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, *et al.* (4070)

Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM_{10} ····· CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, *et al.* (4078)

Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer ····· WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, *et al.* (4085)

Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region ····· WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, *et al.* (4095)

Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds ····· LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, *et al.* (4103)

Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen ····· ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)

Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake ····· XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, *et al.* (4118)

Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake ····· ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, *et al.* (4127)

Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet ····· XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)

Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an ····· YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)

Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff ····· WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, *et al.* (4148)

Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality ····· CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)

Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process ····· DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, *et al.* (4163)

Microcystin Safety Study During *Cyanobacteria* Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process ····· JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, *et al.* (4171)

Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein ····· WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, *et al.* (4176)

Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution ····· CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, *et al.* (4185)

Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor ····· LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, *et al.* (4192)

Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(Ⅲ) Removal from Aqueous Solutions ····· ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)

Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress ····· LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, *et al.* (4205)

Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of *Chlorella pyrenoidosa* ····· TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, *et al.* (4212)

Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration ····· REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, *et al.* (4218)

Effect of Fe^{2+} and Fe^{3+} on the Activity of ANAMMOX ····· LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, *et al.* (4224)

Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor ····· YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, *et al.* (4230)

Effects of Salinity on N_2O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge ····· WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)

Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor ····· ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, *et al.* (4244)

Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique ····· WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, *et al.* (4251)

Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing ····· SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, *et al.* (4257)

Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil ····· ZHANG Jun , LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, *et al.* (4267)

Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil ····· LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)

Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle ····· JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, *et al.* (4284)

Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils ····· WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, *et al.* (4291)

Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(*p*-chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragric Acrisols ····· LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, *et al.* (4298)

Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator ····· WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, *et al.* (4305)

Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales ····· LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, *et al.* (4313)

Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years ····· LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, *et al.* (4321)

Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing Cry1Ac Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity ····· PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, *et al.* (4329)

Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables ····· ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)

Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells ····· SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, *et al.* (4345)

Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals ····· BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, *et al.* (4352)

Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char ····· DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)

Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer ····· TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)

Impact of Nitrate Continuous Injection on N_2O Releases from Bioreactor Landfill ····· BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, *et al.* (4371)

Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth ····· JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, *et al.* (4378)

Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta ····· ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)

Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation ····· ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)

Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon ····· YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2014 年 11 月 15 日　第 35 卷　第 11 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 11　Nov. 15, 2014

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：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行