

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



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)

PM₁₀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)

Fe²⁺和 Fe³⁺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 N₂O 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, 高若红, 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, 朱淑娟 (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-硝基萘和 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, 邱慧慧, 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, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 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)

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

(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: 通过改变进水碱度、光照条件和溶解氧, 对以陶粒为填料的常温低基质上向流厌氧氨氧化生物滤柱的脱氮性能进行了研究。借助克隆测序技术对滤柱内的微生物菌群进行了分析。结果表明, 水温为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 水力停留时间为 3 h 条件下, 当进水碱度在 $44 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随着碱度的降低, 氨氮去除率从 97.2% 降至 75.6%, 总氮去除率从 89.7% 降至 75.1%, 而亚硝氮去除率稳定在 99.7%, 进水碱度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水亚硝氮浓度突跃至 $4.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。当进水碱度恢复至 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 存在自然光照情况下, 氨氮去除率较没有光照时的氨氮去除率降低 12.3%。水力停留时间为 1.5 h 条件下, 当进水 DO 小于 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 平均氨氮去除率和亚硝氮去除率分别为 99.7% 和 100%, 平均总氮去除负荷为 $1.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。16S rRNA 克隆测序鉴定结果表明, 滤柱下部的厌氧氨氧化菌种类为 *Candidatus Jettenia asiatica* 和 *Candidatus Brocadia* sp., 这两种菌对 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 水温有很好的适应性。

关键词: 厌氧氨氧化; 常温; 生物滤柱; 克隆测序; FISH

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4218-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.11.025

Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration

REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, MA Kai-li, ZHANG Jie

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: A lab-scale up-flow ANAMMOX bioreactor with ceramics as biomass carrier was started up. The influence of alkalinity and dissolved oxygen on ANAMMOX reaction at normal temperature and low substrate concentration was investigated. The results showed that, at $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ and an HRT of 3 h, when the alkalinity was between $44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the ammonia removal efficiency was decreased from 97.2% to 75.6% and the TN removal efficiency was decreased from 89.7% to 75.1% as the alkalinity reduced. Meanwhile, the nitrite removal efficiency was stabilized at 99.7%. When the alkalinity was $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the effluent nitrite concentration was increased to $4.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Ammonia removal efficiency was decreased by 12.3% because of light. When the HRT was 1.5 h, the DO value was $< 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the average removal efficiencies of ammonia and nitrite were 99.7% and 100%, respectively, the nitrogen removal rate was $1.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 16S rRNA phylogenetic analysis was applied to analyze the microbial community structure. Results revealed that *Candidatus Jettenia asiatica* and *Candidatus Brocadia* sp. were adapted to normal temperature.

Key words: ANAMMOX; normal temperature; biofilter; 16S rRNA clone sequencing; FISH

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonia oxidation, ANAMMOX) 是指在厌氧或缺氧条件下, 厌氧氨氧化菌以氨氮为电子供体, 以亚硝态氮为电子受体, 将两者转化为氮气的过程^[1,2]。与传统硝化-反硝化工艺相比, 厌氧氨氧化具有耗氧量低、污泥产量低、无需外加碳源和无二次污染等优点^[2], 是目前最简捷的废水生物脱氮途径。

影响厌氧氨氧化反应的因素很多, 主要包括温度^[3]、pH 值^[4]、溶解氧 (dissolved oxygen, DO)^[5]、废水水质^[6]、光照^[1]和生物量^[7]等, 厌氧氨氧化菌生长缓慢, 倍增时间长达 11 d ^[8], 并且只有高细胞浓度时才具有活性。由于厌氧氨氧化反应的最适温度在 $30 \sim 43^{\circ}\text{C}$ ^[9] 之间, 最适 pH 值在 $6.70 \sim 8.40$ ^[8] 之间, 因此, 目前厌氧氨氧化的研究主要集中在污泥

消化上清液和垃圾渗滤液等高温高氨氮废水^[10,11], 但对常温低基质下的厌氧氨氧化工艺还研究甚少^[12]。本文研究了进水碱度、光照条件和 DO 对常温低基质上向流厌氧氨氧化生物滤柱的脱氮性能的影响, 同时利用 16S rRNA 克隆测序及荧光原位杂交 (fluorescence *in situ* hybridization, FISH) 技术对滤柱内的厌氧氨氧化菌群进行了分析, 旨在为以后厌氧氨氧化工艺应用于处理城市污水工程中碱度和溶解氧的控制作参考。

收稿日期: 2014-04-26; 修订日期: 2014-06-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA063503)

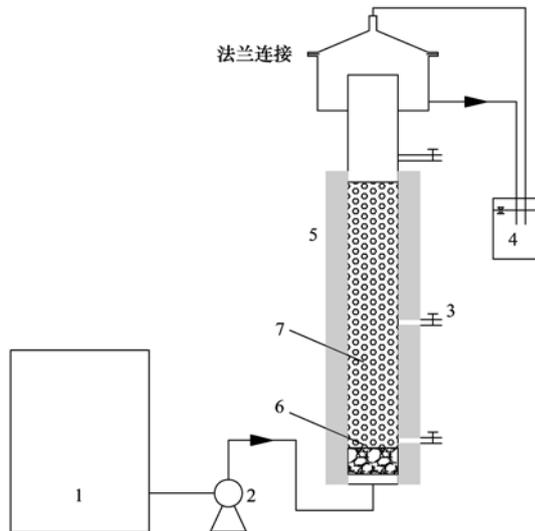
作者简介: 任玉辉 (1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水生物脱氮新技术, E-mail: renyhhit@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xkli312@163.com

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验是在一个有效容积 3.8 L 的上向流生物膜反应器中进行,采用 1~5 mm 粒径的页岩陶粒作为载体,孔隙率为 39.8%,反应器装置如图 1. 本实验初期,反应器外侧用黑色塑料布覆盖,以防止光对厌氧氨氧化菌活性的影响,待考察光照对反应器效能的影响时,再将塑料布揭开.



1. 进水箱; 2. 蠕动泵; 3. 取样口; 4. 出水导气;
5. 水浴套; 6. 承托层; 7. 陶粒滤层

图 1 实验装置及流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the ANAMMOX reactor

1.2 实验用水和接种污泥

厌氧氨氧化反应器实验用水成分^[13]为: KHCO_3 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 27.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CaCl_2 136 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, EDTA 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素 1 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ (EDTA 15000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 430 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 240 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 990 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 220 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 190 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 210 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_3BO_3 14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), NaNO_2 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 分别提供电子受体和电子供体,其添加量适时调整. 反应器进水用氮气进行吹脱以降低 DO 含量. 进水碱度、DO、pH 随实验阶段的不同而变化. 本实验开始前,反应器已经在高温 ($33^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) 和常温 ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) 条件下分别运行了 338 d 和 111 d^[14], 常温阶段平均总氮去除负荷为 1.1 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

1.3 分析方法

NH_4^+-N : 纳氏试剂分光光度法; NO_2^--N : *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO_3^--N : 麝香草酚分光光度法; pH 采用 inoLab pH740 pH 测定仪; DO、*T* 均采用 inoLab Oxi730 溶解氧仪; 碱度 (CaCO_3): 酸碱指示剂滴定法.

1.4 总 DNA 提取

第 141 d, 取 200 mL 滤柱下部微生物样品, 12.000 g, 4°C 离心 10 min, 收集沉淀. 沉淀加入 10 mL, $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸缓冲液 (PBS, pH 8.0) 重悬 2 次. 总 DNA 提取参考文献^[15] 进行, 之后进行纯化回收.

1.5 PCR 扩增

采用细菌通用引物 27F (5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3') 和 1492R (5'-GGT TAC CTT GTT ACG ACT T-3')^[16] 进行扩增, 反应体系组成为: DNA 模板 1.0 μL , $10\times$ Buffer 2.5 μL , dNTPs ($2.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 2.0 μL , 上游引物和下游引物 ($20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 各 0.5 μL , *Ex Taq* 酶 ($5 \text{ U}\cdot\mu\text{L}^{-1}$) 0.125 μL , 补水至终体积为 25 μL . PCR 扩增条件为: 95°C , 5 min; 95°C , 45 s; 55°C , 45 s; 72°C , 1 min; 30 个循环; 72°C , 10 min. PCR 产物采用 DNA 纯化回收试剂盒 (天根, 中国) 纯化回收.

1.6 克隆测序及系统发育分析

将纯化回收的 PCR 产物连接到载体 pMD19-T (TaKaRa, 日本) 上, 并转化到感受态细胞 *Escherichia coli* DH5 α (天根, 中国) 中. 阳性克隆送交上海生工生物公司 (中国) 进行测序. 获得的序列通过 NCBI 网站的 BLAST 工具搜索相近序列, 并进行比对. 本研究所测得的 ANAMMOX 菌 16S rRNA 序列已提交至 GenBank, 登录号为 KF810104 ~ KF810111.

1.7 FISH 分析

第 141 d, 另取 10 mL 滤柱下部微生物样品, 按照 Amann 等^[17] 的操作方法进行 FISH 分析. 所用的寡核苷酸探针列于表 1. 最后用 DAPI 溶液 ($10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 复染所有微生物, 室温下染色 5 min, 超纯水冲洗, 空气风干. 采用 OLYMPUS BX-51 荧光显微镜对污泥样品随机拍摄 20 张照片进行定量分析^[18,19].

2 结果与讨论

2.1 进水碱度及光照对厌氧氨氧化反应器效能的影响

实验滤柱为已稳定运行 449 d 的厌氧氨氧化生

表 1 FISH 分析中采用的寡核苷酸探针

探针	荧光染料	φ (甲酰胺) ¹⁾ /%	$c(\text{NaCl})$ ²⁾ /mmol·L ⁻¹	探针序列(5'-3')	目标菌	文献
Amx820	Cy3	40	56	AAA ACC CCT CTA CTT AGT GCC C	Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria	[20]
Nit3	FITC	40	56	CCT GTG CTC CAT GCT CCG	<i>Nitrobacter</i> spp.	[21]
NSR1156	FITC	30	112	CCC GTT CTC CTG GGC AGT	<i>Nitrospira</i> spp.	[21]

1) 杂交缓冲液中甲酰胺体积分数; 2) 杂交清洗液中 NaCl 浓度

物滤柱. 其中高温 ($33\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和常温 ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) 条件下分别运行了 338 d 和 111 d^[14], 常温阶段平均总氮去除负荷为 $1.1\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 水力停留时间 (hydraulic residence time, HRT) 为 3 h, 平均进水氨氮和亚硝氮浓度分别为 $72\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $77\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均进水碱度为 $350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 碱度是厌氧氨氧化菌的重要基质. 通过逐渐降低进水碱度/氨氮浓度 (Alkalinity/ammonia, A/a), 分别在平均进水 A/a 值为 5、1.9、1.2、0.6、0 的条件下考察厌氧氨氧化反应器效能, 见图 2 (1~38 d). 随着平均进水 A/a 值的降低, 进水 pH 值从 7.61 依次降至 6.6, 出水氨氮浓度从最初的 $1.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 持续升高至 $20.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮去除率从 97.2% 降至 71.6%, 当平均进水 A/a 值 ≥ 0.6 时, 出水亚硝氮浓度为 $0.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硝氮去除率稳定在 99.7%, 仅当平均进水 A/a 值降至 0 时, 出水亚硝氮

浓度突跃至 $4.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在整个过程中, 由于配水中不含碳源, 反应器中反硝化菌的活性受到抑制^[22], 而随着碱度的降低, 出水硝氮浓度从 $13.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $19.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮去除率从 $89.7\% \pm 1.7\%$ 降至 $70.6\% \pm 0.3\%$, 说明进水碱度 $\leq 350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 碱度的变化对于厌氧氨氧化菌活性的影响较大. 碱度的降低对于亚硝氮去除率的影响较小, 原因可能是反应器进水用自来水配水, 虽然用氮气进行吹脱除氧, 但仍含有一定浓度的 DO, 由于长时间的运行, 反应器内存在一定数量的硝酸菌, 而在常温条件下, 这些硝酸菌对于碱度或者 pH 的耐受范围较强所致, 出水硝氮浓度的增加也证实了碱度的降低对于硝酸菌活性影响较小.

从第 40 d 起, 进水碱度恢复至 $350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 进水 pH 为 7.6, 反应器进行了两周的活性恢复阶段, 总氮去除率恢复至第 1 d 的水平, 随后, 第

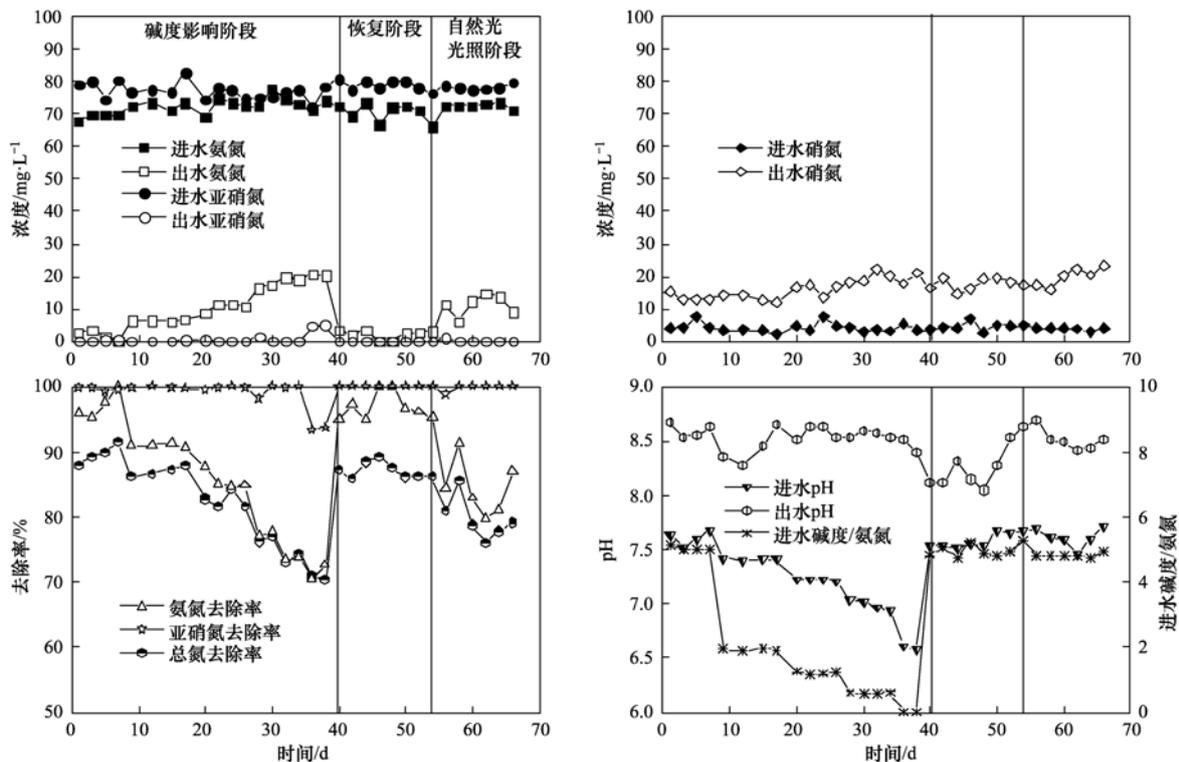


图 2 进水碱度及光照对反应器效能的影响 (HRT = 3 h)

Fig. 2 Effects of alkalinity and light on nitrogen removal performance in the reactor (HRT = 3 h)

56 ~ 66 d, 揭去覆盖在反应器外侧的黑色塑料布。当存在自然光照情况下, 氨氮去除率较没有光照时的氨氮去除率降低 12.3%。光能抑制厌氧氨氧化菌的活性, 降低 30% ~ 50% 的氨氮去除率^[1]。但是由于反应器是以陶粒为填料的生物滤柱, 自然光由于外部陶粒的阻挡, 内部陶粒表面的生物膜不受其影响, 所以氨氮去除率下降较少。

2.2 DO 对厌氧氨氧化反应器效能的影响

第 119 d, 进水氨氮和亚硝氮浓度分别降至 29 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但进水量加倍, 故总进水负荷不变, HRT 从 3 h 缩短至 1.5 h。本研究暂不讨论 HRT 因素的影响。随后当 HRT 为 1.5 h 时, 考察了 DO 的变化对于厌氧氨氧化反应器效能的影响, 见图 3。第 120 ~ 145 d 和前 120 d 一样, 进水配水用氮气进行吹脱除氧, 同时配水桶用氮气袋进行密封, 平均进水 DO < 2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总氮去除率升高并稳定在 87.1% \pm 2.7%, 厌氧氨氧化活性得到恢复。第 146 ~ 165 d, 进水配水不再用氮气进行吹脱除氧, 仅配水桶用氮气袋进行密封。由于氮气袋的存在, 隔绝了外界的空气, 而配水桶或自来水里存在一定量

的好氧菌, 使得平均进水 DO 在配水 2 h 后降至 2.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。如图 3 所示, 平均氨氮去除率和亚硝氮去除率维持在接近 100%, 总氮去除率最开始呈现了缓慢下降的趋势, 但逐渐稳定在 83.8% $\pm 0.6\%$ 。第 166 ~ 177 d, 进水配水不再用氮气进行吹脱除氧, 配水桶也不用氮气袋进行密封, 平均进水 DO 为 8.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。如图 3 所示, 出水氨氮浓度升至 5.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明高溶解氧对于厌氧氨氧化菌的活性有抑制作用。但当进水 DO $\leq 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 总氮去除率依然保持较高的水平, 平均氨氮去除率和亚硝氮去除率分别为 99.7% 和 100%, 平均总氮去除负荷为 1.0 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。对于生物滤柱反应器, 生物膜外侧的亚硝酸菌和硝酸菌消耗一定量的 DO, 从而保护生物膜内层的厌氧氨氧化菌, 同时水相中的 DO 进入到生物膜内部也需要一定的阻力^[23], 因此厌氧氨氧化菌活性得到维持, 平均总氮去除负荷较本实验进行前的 1.1 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 下降很少。

2.3 克隆测序分析

实验得到 36 条 16S rRNA 有效序列, 序列长度为 1 505 bp 左右。测序结果在 GenBank 数据库中进

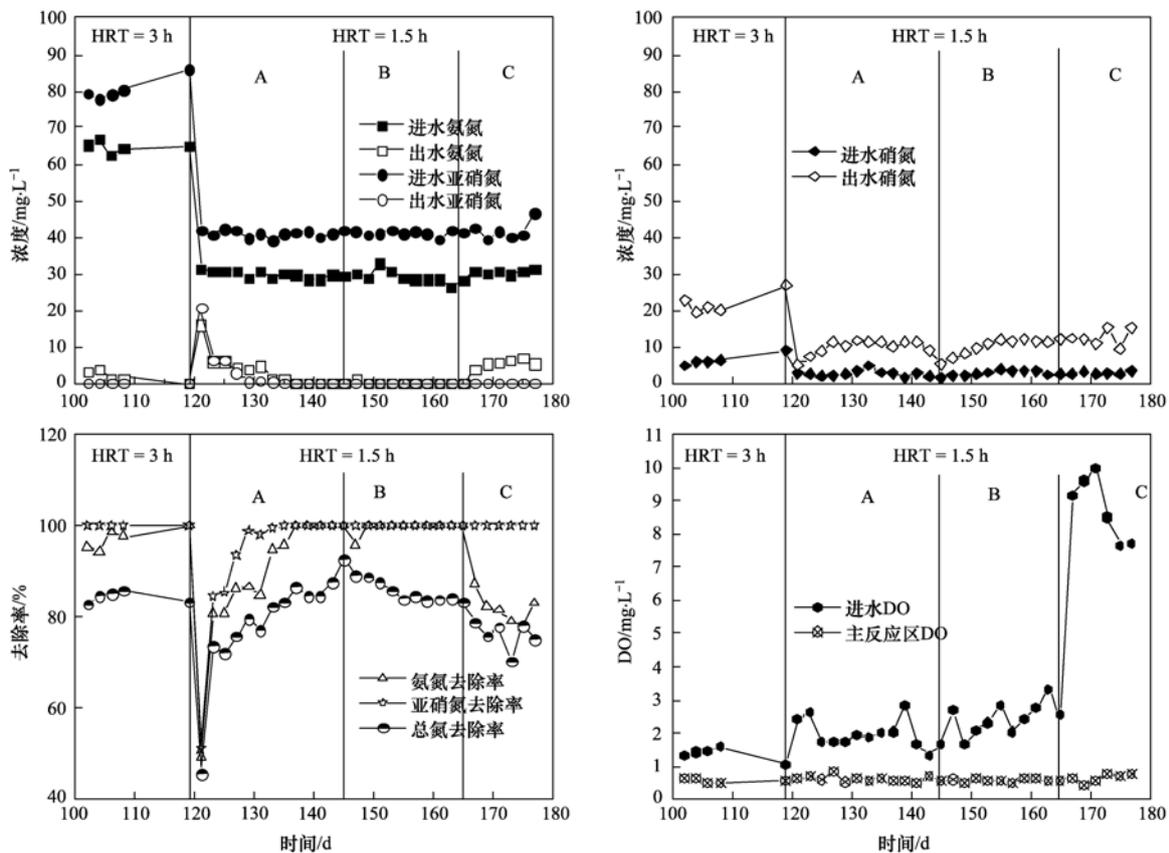


图 3 进水 DO 对反应器效能的影响 (HRT = 1.5 h)

Fig. 3 Effects of DO on nitrogen removal performance in the reactor (HRT = 1.5 h)

行 Blast 比对. 将序列比对结果相同的克隆子定义为一个操作单元 (operational taxonomic unit, OTU), 共得到 15 个 OTU, 属于厌氧氨氧化菌的有 2 个 OTU, 其中所含克隆子比例及相似菌株见表 2. 16S rRNA 克隆测序鉴定结果表明, 滤柱下部的厌氧氨氧化菌种类为 *Candidatus Jettenia asiatica* 和

Candidatus Brocadia sp., 这两种菌对 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 水温有很好的适应性. 大多数对于废水处理厌氧氨氧化菌的研究发现, 虽然不同反应器内 ANAMMOX 菌属可能不同, 但其种类比较单一, 以某一种为主^[24], 本实验反应器内 ANAMMOX 菌属以 *Candidatus Jettenia asiatica* 为主.

表 2 反应器内厌氧氨氧化菌 16S rRNA 测序结果

Table 2 16S rRNA sequence of ANAMMOX bacteria in the reactor

OTU 编号	OTU 所含克隆子比例/%	最相似序列(登录号)	相似度/%
1	19.4	<i>Candidatus Jettenia asiatica</i> (DQ301513)	99.6
2	2.8	<i>Candidatus Brocadia</i> sp. (AM285341)	99.2

2.4 FISH 分析

利用 ANAMMOX 菌的特异性探针 Amx820 (红色) 和 NOB 的特异性探针 Nit3 (绿色)、NSR1156 (绿色) 对反应器底部第 141 d 微生物样品进行杂交, FISH 结果如图 4 所示. 当反应器运行到第 141 d 时, ANAMMOX 菌占总菌群的比例为 $38.1\% \pm 1.7\%$, NOB 为 $1.9\% \pm 0.3\%$. 说明在常温 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 主反应区存在一定量 DO 的情况下, ANAMMOX 菌是系统中的优势菌属, 其对 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 水温有很好的适应性. 另外, 反应器中存在一定量的硝化细菌, 能够消耗水中的溶解氧为 ANAMMOX 菌去除氧毒^[25], 与之前分析结果一致. 反应器的总氮去除负荷依然保持在很高的水平, 实现厌氧氨氧化菌工艺的的稳定运行, 为以后厌氧氨氧化工艺应用于处理城市污水工程提供一定参考.

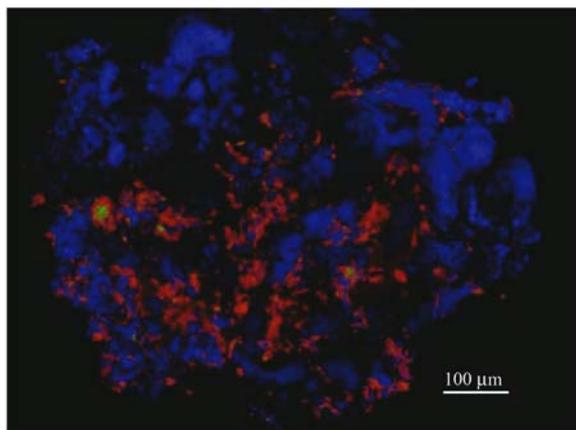


图 4 反应器底部微生物的荧光原位杂交图像(141 d)

Fig. 4 FISH micrograph of microorganisms obtained from the bottom of the reactor (141 d)

3 结论

(1) 当进水碱度 $\leq 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 随着碱度的降低, 总氮去除率从 $89.7\% \pm 1.7\%$ 降至 $70.6\% \pm$

0.3% , 当进水碱度为 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 总氮去除率稳定在 $89.7\% \pm 1.7\%$.

(2) 当存在自然光照情况下, 氨氮去除率较没有光照时的氨氮去除率降低 12.3% .

(3) 当进水 $\text{DO} \leq 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 总氮去除率依然保持较高的水平, 平均氨氮去除率和亚硝氮去除率分别为 99.7% 和 100% , 平均总氮去除负荷为 $1.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

(4) 16S rRNA 克隆测序鉴定结果表明, 滤柱下部的厌氧氨氧化菌种类为 *Candidatus Jettenia asiatica* 和 *Candidatus Brocadia* sp., 这两种菌对 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 水温有很好的适应性.

参考文献:

- [1] Jetten M S M, Strous M, van de Pas-Schoonen K T, et al. The anaerobic oxidation of ammonium [J]. FEMS Microbiology Reviews, 1998, 22(5): 421-437.
- [2] Kartal B, Kuenen J G, van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox [J]. Science, 2010, 328(5979): 702-703.
- [3] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响 [J]. 环境科学, 2006, 27(4): 691-695.
- [4] 田智勇, 李冬, 张杰. 厌氧氨氧化过程中 COD 及 pH 与基质浓度之间的关系 [J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3342-3346.
- [5] Strous M, van Gerven E, Kuenen J G, et al. Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(6): 2446-2448.
- [6] Gut L, Plaza E, Trela J, et al. Combined partial nitrification/Anammox system for treatment of digester supernatant [J]. Water Science and Technology, 2006, 53(12): 149-159.
- [7] Dapena-Mora A, Campos J L, Mosquera-Corral A, et al. Stability of the ANAMMOX process in a gas-lift reactor and a SBR [J]. Journal of Biotechnology, 2004, 110(2): 159-170.
- [8] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, 50(5): 589-596.

- [9] Isaka K, Sumino T, Tsuneda S. High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2007, **103**(5): 486-490.
- [10] Szatkowska B, Cema G, Plaza E, *et al.* A one-stage system with partial nitrification and anammox processes in the moving-bed biofilm reactor [J]. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(8-9): 19-26.
- [11] van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [12] Hendrickx T L G, Wang Y, Kampman C, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from low strength waste water at low temperature [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2187-2193.
- [13] van de Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [14] Ren Y H, Li D, Li X K, *et al.* High-rate nitrogen removal and microbial community of an up-flow anammox reactor with ceramics as biomass carrier [J]. *Chemosphere*, 2014, **113**: 125-131.
- [15] Zhou J Z, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(2): 316-322.
- [16] Weisburg W G, Barns S M, Pelletier D A, *et al.* 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study [J]. *Journal of Bacteriology*, 1991, **173**(2): 697-703.
- [17] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology [J]. *Journal of Bacteriology*, 1990, **172**(2): 762-770.
- [18] Dytczak M A, Londry K L, Oleszkiewicz J A. Activated sludge operational regime has significant impact on the type of nitrifying community and its nitrification rates [J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 2320-2328.
- [19] Rodriguez-Caballero A, Ribera A, Balcázar J L, *et al.* Nitrification *versus* full nitrification of ammonium-rich wastewater: comparison in terms of nitrous and nitric oxides emissions [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **139**: 195-202.
- [20] Desloover J, de Clippeleir H, Boeckx P, *et al.* Floc-based sequential partial nitrification and anammox at full scale with contrasting N₂O emissions [J]. *Water Research*, 2011, **45**(9): 2811-2821.
- [21] Zhang B, Chen Z, Qiu Z G, *et al.* Dynamic and distribution of ammonia-oxidizing bacteria communities during sludge granulation in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor [J]. *Water Research*, 2011, **45**(18): 6207-6216.
- [22] Chamchoi N, Nitisravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3331-3336.
- [23] Jetten M S M, Horn S J, van Loosdrecht M C M. Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(9): 171-180.
- [24] Kartal B, Rattray J, van Niftrik L A, *et al.* *Candidatus* "Anammoxoglobus propionicus" a new propionate oxidizing species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2007, **30**(1): 39-49.
- [25] Kindaichi T, Tsushima I, Ogasawara Y, *et al.* *In situ* activity and spatial organization of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria in biofilms [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(15): 4931-4939.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O 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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (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 ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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