

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)

北京大气 PM_{2.5} 与惰性 SiO₂ 的生物毒性比较 刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)

APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)

2000 ~ 2014 年北京市 SO₂ 时空分布及一次污染过程分析 程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)

利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)

长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)

珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)

春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)

洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)

大辽河主要污染源营养盐输入特征 马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)

三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)

不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)

周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)

华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例 孔晓乐, 王仕琴, 赵焱, 袁瑞强 (4051)

某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)

乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)

青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)

多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)

降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)

重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)

三峡水库消落带植物汞的分布特征 梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)

物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)

超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)

载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)

TiO₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)

单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)

间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)

单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究 杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)

水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)

氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)

厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)

同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)

HCO₃⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)

活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)

温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙酉, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)

污染场地修复技术筛选方法及应用 白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)

基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析 杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)

大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)

缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)

不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 兰木岭, 高明 (4252)

生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)

不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)

组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文毅, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)

水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)

大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)

覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)

阳极内添加阳离子交换树脂提升钼压“三合一”膜电极 MFC 性能 梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)

应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的萘和苯并芘 李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)

《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)

乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征

贺惠¹, 甄毓^{2,3*}, 米铁柱^{2,3}, 张玉², 付璐璐¹, 于志刚⁴

(1. 中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266003; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 3. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 4. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 氮素循环是海洋生态系统物质循环的重要组成部分, 对维持海洋生态平衡具有重要意义. 由好氧氨氧化微生物 (aerobic ammonia-oxidizing microorganism, AOM) 推动的氨氧化过程是硝化作用的限速步骤. 本研究通过荧光定量 PCR 技术, 并结合潜在硝化速率 (potential nitrification rates, PNR) 的测定, 研究了 2014 年 8 月乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物种群分布特征. 结果表明, 3 个采样站位中氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB) *amoA* 拷贝数均高于氨氧化古菌 (ammonia-oxidizing archaea, AOA); 活性 AOB 占总 AOB 的比值低于 1%, 而活性 AOA 未检出; 添加可抑制 AOB 活性的氨基苄青霉素后, 潜在硝化速率显著降低 ($P < 0.05$). 由此可知, AOB 在 8 月乳山湾邻近海域沉积物氨氧化过程中发挥了重要作用. 溶解氧浓度、温度及铵盐浓度对乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物的种群丰度起着重要的调控作用.

关键词: 乳山湾; 沉积物; 好氧氨氧化微生物; 潜在硝化速率

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4068-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.11.016

Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay

HE Hui¹, ZHEN Yu^{2,3*}, MI Tie-zhu^{2,3}, ZHANG Yu², FU Lu-lu¹, YU Zhi-gang⁴

(1. College of Marine Life Science, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. Key Laboratory of Marine Chemical Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Nitrogen cycle is a key process in material circulation of marine ecosystem, which plays an important role in maintaining ecological balance. The ammonia oxidation process promoted by aerobic ammonia-oxidizing microorganism (AOM) is a rate-limiting step of nitrification. Real-time quantitative polymerase chain reaction (qPCR), along with the determination of potential nitrification rates (PNR) was carried out in this study to understand the distribution of AOM in sediments of adjacent waters of Rushan Bay in August, 2014. The results indicated that the abundance of total ammonia-oxidizing bacteria (AOB) was always greater than that of total ammonia-oxidizing archaea (AOA) in the three sampling stations; the ratio of active AOB to total AOB was less than 1%, while no active AOA was detected in this study; the PNR significantly decreased after adding ampicillin which could inhibit the activity of AOB ($P < 0.05$). It was speculated that AOB might play a more important role in the ammonia oxidation in sediments of adjacent waters of Rushan Bay in August, 2014. Dissolved oxygen concentrations, temperature and ammonium concentrations played a significant role in distribution of AOM in sediments of adjacent waters of Rushan Bay.

Key words: Rushan Bay; sediments; aerobic ammonia-oxidizing microorganisms; potential nitrification rates

氨氧化过程作为硝化作用的限速步骤, 在全球氮素循环中发挥着极为重要的作用. 一直以来, 氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 被认为是氨氧化过程的主要驱动者. 随着技术手段的不断进步, 特别是宏基因组技术和高通量测序的发展, 研究者在海洋中发现了一类新的氨氧化微生物——氨氧化古菌 (ammonia-oxidizing archaea, AOA)^[1,2], 且其广泛存在于各种环境中^[3~5]. 很多环境中 AOA 在数量上较 AOB 占明显优势, 表明由其推动的氨氧化过程可能比 AOB 更为强烈^[6~8]. AOA 和 AOB 对氨氧化过程的相对贡献, 一直都是氮素循环研究中最重要研究问题之一.

由 *amoA*、*amoB* 和 *amoC* 这 3 个结构基因构成的氨单加氧酶 (ammonia monooxygenase, AMO), 是好氧氨氧化微生物所特有的一种胞内酶, 其中 *amoA* 基因编码该酶的活性中心, 催化由铵盐到羟胺的过程, 为该微生物提供能量^[9,10]. *amoA* 基因编码直接参与氨氧化过程的酶, 与 16S rRNA 基因序列相比, 其序列变化更能反映种群差异, 对微生物的差异

收稿日期: 2015-05-27; 修订日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金重大国际 (地区) 合作项目 (40920164004)

作者简介: 贺惠 (1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海洋生态学, E-mail: hehui-07@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhenyu@ouc.edu.cn

分析具有更高的分辨力^[11]. 目前, 基于 *amoA* 基因序列的分析已被广泛应用于好氧氨氧化微生物分子生态学研究, 通常采用引物 Arch-*amoA*F 和 Arch-*amoA*R 检测 AOA^[3], 引物 *amoA*-1F 和 *amoA*-2R 检测 AOB^[10].

在最适温度条件下, 通过向环境样品中添加过量氨氮测定潜在硝化速率 (potential nitrification rates, PNR)^[12], 可以比较硝化微生物转化氨氮的速率, 这对于了解 AOA 和 AOB 对硝化作用的相对贡献具有重要的参考价值. 已有研究表明 PNR 与好氧氨氧化微生物 *amoA* 基因拷贝数之间存在相关性, 如 Caffrey 等^[13] 发现美国几个东南部河口区域的 PNR 与氨氧化古菌 *amoA* 拷贝数有显著正相关关系, 而与氨氧化细菌 *amoA* 拷贝数没有明显的相关性; Zheng 等^[14] 发现崇明岛东部潮间带沉积物中夏、冬两季的 PNR 与好氧氨氧化微生物总 *amoA* 拷贝数均有显著的正相关关系.

乳山湾位于山东半岛, 为一半封闭的浅水海湾, 是重要的经济贝类养殖区. 养殖业的迅速发展导致排海的有机物显著增加, 大量有机质和还原性物质在经历一系列生物、化学过程后消耗了底层海水的大量氧气, 使得乳山湾及近海水体溶解氧浓度明显降低^[15]. 研究表明, 夏季乳山湾近海海域存在一个溶解氧低值区^[16]. 溶氧低值区的存在会破坏表层沉积物的氧化性环境, 这可能会影响该海域物质形态和循环过程^[17], 特别会对硝化反应的进行及氨氧化微生物的种群丰度造成影响^[13,18,19]. 本研究以好氧氨氧化微生物为对象, 通过实时荧光定量 PCR 技术和潜在硝化速率模拟培养实验, 揭示沉积物中好

氧氨氧化微生物的种群活性特征, 以期为乳山湾邻近海域沉积物中氮素生物地球化学过程研究提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集和理化参数测定

2014 年 8 月采集乳山湾近岸海域表层沉积物样品, 采样站位为 A3 站 (121.297°E, 36.583°N)、C2 站 (121.493°E, 36.662°N) 及 E3 站 (121.660°E, 36.642°N) (图 1). 利用 CTD 多参数温盐深仪对各个站位底层水的温度、盐度、溶解氧浓度等理化参数进行现场测定, 营养盐浓度利用营养盐自动分析仪测定, 具体理化参数见表 1. 沉积物分装在灭菌铝盒中, 置于 -80℃ 超低温冰箱中用于核酸提取. 部分沉积物样品低温保存立即带回实验室进行模拟培养实验.

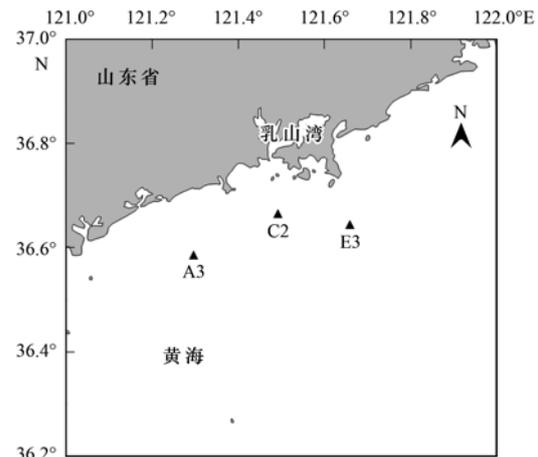


图 1 乳山湾邻近海域采样站位示意

Fig. 1 Sampling stations in adjacent waters of Rushan Bay

表 1 乳山湾邻近海域底层水的理化参数

Table 1 Physiochemical parameters of bottom water in adjacent waters of Rushan Bay

站位	温度/℃	盐度/PSU	溶解氧/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ /μmol·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ /μmol·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /μmol·L ⁻¹
A3	22.555	30.764	4.384	1.089	0.278	2.548
C2	23.294	30.516	4.133	0.617	0.382	3.059
E3	21.581	30.579	4.455	0.891	2.317	2.997

1.2 核酸提取与 PCR 扩增

分别用 PowerSoil[®] DNA Isolation kit (MoBio, USA) 和 RNA PowerSoil[®] Total RNA Isolation kit (MoBio, USA) 提取表层沉积物中微生物总 DNA 和总 RNA. 反转录按照 Transcriptor First Strand cDNA Synthesis kit (Roche, Germany) 操作说明进行. 利用引物 Arch-*amoA*F/Arch-*amoA*R 和 *amoA*-1F/*amoA*-2R 分别扩增 AOA 和 AOB *amoA* 基因 (表 2). PCR

产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳分离, 检测目的条带.

表 2 引物序列

Table 2 Primers used in this study

引物名称	引物序列 (5'-3')	长度 /bp	退火温度 /℃
Arch- <i>amoA</i> F	STAATGGTCTGGCTTAGACG	635	56
Arch- <i>amoA</i> R	GCGCCATCCATCTGTATGT		
<i>amoA</i> -1F	GGGTTTCTACTGGTGGT	491	58
<i>amoA</i> -2R	CCCCTCKGSAAGCCTTCTTC		

1.3 质粒标准品的制备

将目的条带切胶纯化,连接到 pMD18-T 载体(宝生物,大连)后转化到 *Escherichia coli* Trans 5 α 感受态细胞中,通过蓝白斑筛选含有目的基因的阳性克隆.快速质粒小提试剂盒(康为,北京)制备质粒,将得到的质粒 DNA 进行 PCR 扩增,经电泳确认后,送测序公司测序(华大基因,北京),测序结果提交至 GenBank,登录号为 KT122944 和 KT122945.

用 Picodrop 超微量紫外分光光度计(Picodrop, UK)测得重组质粒的浓度,计算 *amoA* 重组质粒的拷贝浓度.将得到的质粒 10 倍梯度稀释,保存于 -80°C 超低温冰箱中,用于建立定量 PCR 体系的质粒标准曲线.

1.4 标准曲线的建立与样品测定

以梯度稀释的质粒标准品为模板,利用 FastStart Universal SYBR Green Master(ROX)试剂盒(Roche, Germany)进行荧光定量 PCR 反应(Applied Biosystems, USA),并在反应体系中加入 $0.2 \mu\text{g}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ 牛血清蛋白(bovine serum albumin, BSA).定量古菌 *amoA* 基因拷贝数的反应程序为: 50°C UNG 酶激活 2 min, 95°C 热启动 10 min, 随后 40 个循环,包括 95°C 15 s, 56°C 45 s, 72°C 1 min; 定量细菌 *amoA* 基因拷贝数的反应程序为: 50°C UNG 酶激活 2 min, 95°C 热启动 10 min, 随后 40 个循环,包括 95°C 15 s, 58°C 2 min. 扩增完毕后进行溶解曲线分析,以确定每个样品都是特异性扩增.每个质粒浓度做 3 个平行样,实验体系中同时添加阴性对照.以质粒拷贝数对数值为横坐标, C_t 值为纵坐标,绘制标准曲线.

样品测定的定量 PCR 体系和条件与标准曲线相同,每个样品 3 个平行样,实验体系中同时包括阳性对照和阴性对照.通过标准曲线换算样品中 *amoA* 基因的拷贝数.

1.5 潜在硝化速率测定

按照 Bernhard 等^[20]的方法测定潜在硝化速率.将 1.0 g 沉积物加入 30 mL 人工配制的水样(海水经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,加入 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 使其终浓度分别为 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $60 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)中,黑暗条件下连续振荡培养,0、24、48 h 分别取样、离心、过滤, -20°C 保存.另一组实验中加入 $1.0 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨苄青霉素^[21],实验方法同上.测定硝酸盐和亚硝酸盐浓度,根据硝酸盐和亚硝酸盐浓度随时间的变化计算潜在硝化速率.所有样品设置 3 个平行样.

2 结果与分析

2.1 沉积物中 AOA 和 AOB 的定量

总 DNA 定量 PCR 结果表明,表层沉积物中氨氧化古菌 *amoA* 基因拷贝数为 $2.483 \times 10^5 \sim 6.432 \times 10^5 \text{ cells}\cdot\text{g}^{-1}$,氨氧化细菌 *amoA* 基因拷贝数为 $2.679 \times 10^7 \sim 4.801 \times 10^7 \text{ cells}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 2).总 RNA 定量 PCR 结果表明,每克沉积物中存活的氨氧化细菌 *amoA* 基因拷贝数为 $2.978 \times 10^3 \sim 4.382 \times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{g}^{-1}$,而在 3 个采样站位中均未检测到存活的氨氧化古菌.本研究中细菌 *amoA* 拷贝数均高于古菌 *amoA*,这与之前的部分研究结果相似^[21~24].研究区域中活性 AOB 占总 AOB 比值低于 1%,而活性 AOA 未检测到,推测这一结果可能是因为绝大多数氨氧化微生物处在非活性细胞状态,并没有执行氨氧化功能.

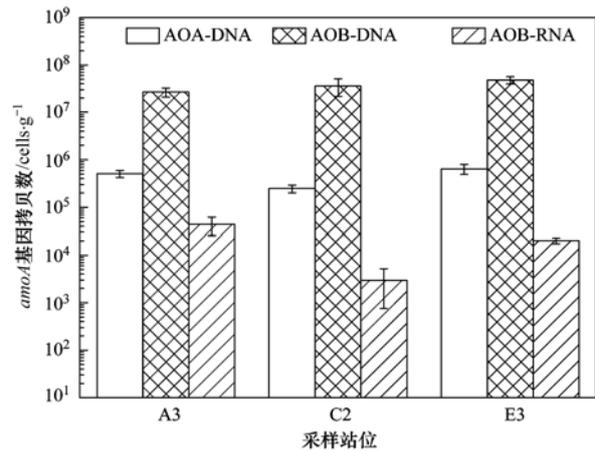


图 2 乳山湾邻近海域表层沉积物中 AOA 和 AOB 的丰度分布
Fig. 2 Abundance distribution of AOA and AOB in surface sediments in adjacent waters of Rushan Bay

2.2 潜在硝化速率分析

作为一种转肽酶的竞争性抑制剂,氨苄青霉素能够抑制革兰氏阴性菌、阳性菌生长过程中细胞壁的形成,从而使细菌细胞破裂死亡;但是氨苄青霉素不会抑制氨氧化古菌的活性.目前已有研究通过添加氨苄青霉素以讨论硝化过程中 AOA 和 AOB 的相对贡献^[21].乳山湾邻近海域采样站位表层沉积物潜在硝化速率的分布特征如图 3.未添加氨苄青霉素时其潜在硝化速率(以 N/沉积物计)为 $0.782 \sim 1.666 \mu\text{mol}\cdot(\text{d}\cdot\text{g})^{-1}$;添加氨苄青霉素后,潜在硝化速率下降了约 90%. *t* 检验结果表明,潜在硝化速率在添加氨苄青霉素前后变化显著($P < 0.05$).由此可知,本研究区域的氨氧化过程主要由 AOB 推动,这也与未检测到活性 AOA

的结果基本一致。

2.3 潜在硝化速率与 *amoA* 基因拷贝数相关性分析

分别对 PNR 和总 AOA *amoA* 基因拷贝数、PNR 和总 AOB *amoA* 基因拷贝数、PNR 和活性 AOB

amoA 基因拷贝数进行相关性分析, 结果表明, PNR 与总 AOB *amoA* 拷贝数呈显著负相关 ($P < 0.05$), 而与活性 AOB *amoA* 基因拷贝数之间没有显著相关性 ($P < 0.05$), 见表 3。

表 3 潜在硝化速率与 *amoA* 基因拷贝数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of potential nitrification rates and *amoA* gene copy numbers

项目	总 AOA <i>amoA</i> 基因拷贝数	总 AOB <i>amoA</i> 基因拷贝数	活性 AOB <i>amoA</i> 基因拷贝数
潜在硝化速率(未添加氨苄青霉素)	-0.431	-1.000 ¹⁾	0.491
潜在硝化速率(添加氨苄青霉素)	0.457	—	—

1) 表示二者显著相关 ($P < 0.05$)

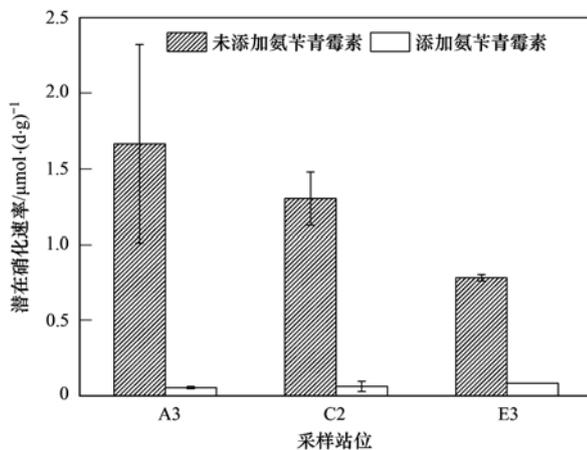


图 3 乳山湾邻近海域表层沉积物中的潜在硝化速率
Fig. 3 Potential nitrification rates in surface sediments in adjacent waters of Rushan Bay

3 讨论

3.1 *amoA* 基因拷贝数与环境因子的关系

好氧氨氧化过程与氮循环中其他过程相耦合, 对维持氮平衡等具有重要意义. AOB 和 AOA 作为该过程的主要驱动者, 对好氧氨氧化过程的相对贡献一直是人们研究的焦点. 盐度^[13,22]、pH^[25,26]、铵盐浓度^[27]和亚硝酸盐浓度^[28]等均是影响 AOA 和 AOB 种群丰度的重要环境因子, 其中铵盐浓度和盐度是两个较为重要的参数. AOA 较 AOB 对铵盐有更高的亲和力, 如 *Candidatus Nitrosopumilus maritimus* SCM1 对氨 ($\sum \text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) 的半饱和常数为 $133 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 AOB 对氨 ($\sum \text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) 的半饱和常数则为 $46 \sim 1780 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此铵盐浓度可以作为影响 AOA 和 AOB 种群结构的一个重要因素^[29]. 盐度能够影响 NH_4^+ 的吸附^[30], 因此也是影响氨氧化过程的一个重要参数. 对活性 AOB 占 AOB 的比例与环境因子的关系进行分析发现, 活性 AOB 占 AOB 的比例随着铵盐浓度的增加而增

大, 这可能与 AOB 适合在铵盐浓度较高的环境中存活有关 (图 4), 这也与之前的其他研究结果相符^[31].

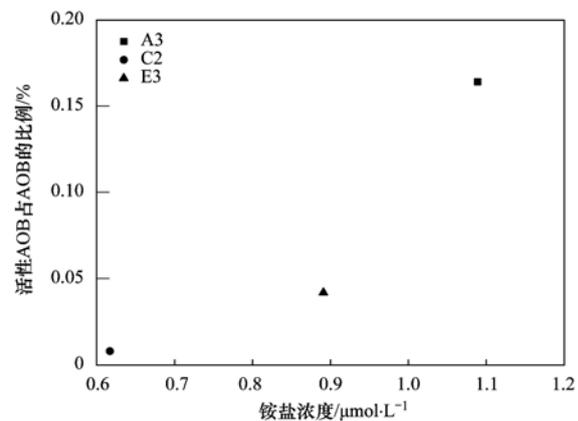


图 4 乳山湾邻近海域不同站位表层沉积物中活性 AOB 占 AOB 的比例和铵盐浓度的关系

Fig. 4 Relationship between ratio of active AOB to AOB and ammonium concentrations in surface sediments in adjacent waters of Rushan Bay

采用 Canoco for Windows 4.5 软件对氨氧化微生物种群丰度和环境数据进行分析 (图 5). 种群丰度与环境因子前两个排序轴的相关系数分别为 0.764 和 0.236, 且第一排序轴与第二排序轴近似垂直, 相关系数为 0.000, 说明排序轴与环境因子间的线性结合程度较好地反映了物种与环境的关系, 排序结果可靠. 表 4 反映了种群丰度排序轴与环境因子的相关性. 第一排序轴与温度呈正相关, 与溶解氧浓度、铵盐浓度呈负相关; 第二排序轴与盐度呈正相关. 因此, 溶解氧浓度、温度及铵盐浓度在好氧氨氧化微生物种群丰度分布上影响最为重要. 其中, 溶解氧浓度和铵盐浓度对 AOA 种群丰度影响较大, 温度对 AOB 种群丰度分布影响较大.

3.2 潜在硝化速率 PNR 与 *amoA* 基因拷贝数的关系

潜在硝化速率 (PNR) 常作为指示氨氧化微生物

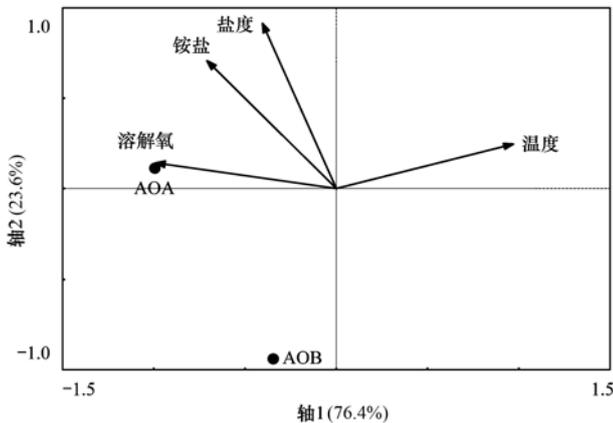


图5 环境因子与 AOA、AOB 种群丰度的 RDA 二维排序

Fig. 5 RDA ordination of the relationships of environmental parameters and abundance of AOA and AOB

表4 环境因子与前两个排序轴间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of environmental parameters with the first two axes of RDA

排序轴	温度	盐度	溶解氧浓度	铵盐浓度
1	0.967	-0.405	-0.989	-0.708
2	0.256	0.914	0.142	0.707

物硝化作用的重要生理指标. 本研究中 PNR 与古菌 *amoA* 基因丰度、细菌 *amoA* 基因丰度均呈负相关关系,这与 Caffrey 等^[13]对 6 个不同河口的研究及 Wang 等^[26]对中国 4 个高氮湿地沉积物的研究结果不同. 他们的研究结果显示,PNR 与古菌 *amoA* 基因丰度、细菌 *amoA* 基因丰度均呈正相关关系. 而本研究的分析结果却表明,随着 *amoA* 基因拷贝数增加,潜在硝化能力降低,这与实际环境中的生物过程并不相符. 由于基于 DNA 水平的检测表明的是环境中存活和死亡微生物的总丰度,因此并不能真实反映环境中微生物的催化活性,而以微生物 mRNA 为基础研究 PNR 与 *amoA* 基因拷贝数的关系及 AOA、AOB 对硝化过程的相对贡献就显得尤为必要. 本研究的相关分析结果表明,PNR 与活性 AOB *amoA* 拷贝数之间存在正相关关系,但相关性较低 ($P > 0.05$). 推测可能是由于样本数量过少,或者是由于 PNR 培养时氧气和酶作用底物浓度不受限制^[32],与氨氧化微生物实际存活的环境条件有差异所致. 这些问题,还需要更进一步地深入研究,才能更好地揭示 AOA 和 AOB 在氨氧化过程中的贡献.

4 结论

本文通过荧光定量 PCR 技术和潜在硝化速率

分析的方法,对乳山湾邻近海域表层沉积物中好氧氨氧化微生物种群分布特征进行了研究. 结果表明,研究海域中总氨氧化细菌(AOB)丰度均高于总氨氧化古菌(AOA)丰度. 活性 AOB 与总 AOB 比值低于 1%,活性 AOA 在 3 个采样站点中均未检测,表明绝大多数氨氧化微生物可能处在非活性细胞状态. 潜在硝化速率在添加氨苄青霉素后显著降低 ($P < 0.05$),可见 AOB 在研究海域沉积物氨氧化过程中发挥了重要作用. 溶解氧浓度、温度及铵盐浓度对研究海域沉积物中好氧氨氧化微生物的种群丰度起着重要的调控作用. 本研究在潜在硝化速率与发挥直接作用的好氧氨氧化微生物关键功能基因 mRNA 表达量之间建立了联系,有助于明确 AOA 和 AOB 对硝化作用的相对贡献.

致谢:感谢国家海洋局第一海洋研究所海洋生态研究中心冉祥滨副研究员及刘军同学在野外采样及环境因子分析中给予的帮助.

参考文献:

- [1] Venter J C, Remington K, Heidelberg J F, *et al.* Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea [J]. *Science*, 2004, **304**(5667): 66-74.
- [2] Könneke M, Bernhard A E, de la Torre J R, *et al.* Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon [J]. *Nature*, 2005, **437**(7058): 543-546.
- [3] Francis C A, Roberts K J, Beman J M, *et al.* Ubiquity and diversity of ammonia-oxidizing archaea in water columns and sediments of the ocean [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(41): 14683-14688.
- [4] Han M Q, Li Z Y, Zhang F L. The ammonia oxidizing and denitrifying prokaryotes associated with sponges from different sea areas [J]. *Microbial Ecology*, 2013, **66**(2): 427-436.
- [5] Wang X Y, Wang C, Bao L L, *et al.* Abundance and community structure of ammonia-oxidizing microorganisms in reservoir sediment and adjacent soils [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**(4): 1883-1892.
- [6] Shen J P, Zhang L M, Zhu Y G, *et al.* Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(6): 1601-1611.
- [7] Jin T, Zhang T, Ye L, *et al.* Diversity and quantity of ammonia-oxidizing Archaea and Bacteria in sediment of the Pearl River estuary, China [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(3): 1137-1145.
- [8] Hou J, Cao X Y, Song C L, *et al.* Predominance of ammonia-oxidizing archaea and *nirK*-gene-bearing denitrifiers among ammonia-oxidizing and denitrifying populations in sediments of a large urban eutrophic lake (Lake Donghu) [J]. *Canadian*

- Journal of Microbiology, 2013, **59**(7): 456-464.
- [9] Hooper A B, Vannelli T, Bergmann D J, *et al.* Enzymology of the oxidation of ammonia to nitrite by bacteria[J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1997, **71**(1-2): 59-67.
- [10] Rotthauwe J H, Witzel K P, Liesack W. The ammonia monooxygenase structural gene *amoA* as a functional marker; molecular fine-scale analysis of natural ammonia-oxidizing populations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(12): 4704-4712.
- [11] 郝永俊, 吴松维, 吴伟祥, 等. 好氧氨氧化菌的种群生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2007, **27**(4): 1573-1582.
- [12] 李佳霖. 典型河口区沉积物的硝化和反硝化过程[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. 49.
- [13] Caffrey J M, Bano N, Kalanetra K, *et al.* Ammonia oxidation and ammonia-oxidizing bacteria and archaea from estuaries with differing histories of hypoxia[J]. *The ISME Journal*, 2007, **1**(7): 660-662.
- [14] Zheng Y L, Hou L J, Liu M, *et al.* Diversity, abundance, and activity of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in Chongming eastern intertidal sediments [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(18): 8351-8363.
- [15] 崔毅, 马绍赛, 陈碧鹃, 等. 乳山湾生物理化环境现状研究[J]. *中国水产科学*, 1999, **6**(4): 76-80.
- [16] 冉祥滨, 臧家业, 韦钦胜, 等. 乳山湾口及其邻近海域溶解氧分布特征及影响因素研究[J]. *海洋学报*, 2011, **33**(4): 173-180.
- [17] 刘军, 臧家业, 冉祥滨, 等. 乳山湾外低氧海域沉积物中有有机碳、氮、磷及其形态特征分析[J]. *海洋科学*, 2012, **36**(7): 70-78.
- [18] Santoro A E, Francis C A, de Sieyes N R, *et al.* Shifts in the relative abundance of ammonia-oxidizing bacteria and archaea across physicochemical gradients in a subterranean estuary[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(4): 1068-1079.
- [19] 邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 等. 溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 532-539.
- [20] Bernhard A E, Tucker J, Giblin A E, *et al.* Functionally distinct communities of ammonia-oxidizing bacteria along an estuarine salinity gradient[J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(6): 1439-1447.
- [21] Zheng Y L, Hou L J, Newell S, *et al.* Community dynamics and activity of ammonia-oxidizing prokaryotes in intertidal sediments of the Yangtze Estuary [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, **80**(1): 408-419.
- [22] Mosier A C, Francis C A. Relative abundance and diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in the San Francisco Bay estuary[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 3002-3016.
- [23] Jiang H C, Dong H L, Yu B S, *et al.* Diversity and abundance of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in Qinghai Lake, Northwestern China [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2009, **26**(3): 199-211.
- [24] Li J L, Nedwell D B, Beddow J, *et al.* *amoA* gene abundances and nitrification potential rates suggest that benthic ammonia-oxidizing bacteria and not archaea dominate N cycling in the Colne Estuary, United Kingdom[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, **81**(1): 159-165.
- [25] Liu Z H, Huang S B, Sun G P, *et al.* Diversity and abundance of ammonia-oxidizing archaea in the Dongjiang River, China[J]. *Microbiological Research*, 2011, **166**(5): 337-345.
- [26] Wang S Y, Wang Y, Feng X J, *et al.* Quantitative analyses of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in the sediments of four nitrogen-rich wetlands in China[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(2): 779-787.
- [27] Bouskill N J, Eveillard D, Chien D, *et al.* Environmental factors determining ammonia-oxidizing organism distribution and diversity in marine environments[J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(3): 714-729.
- [28] Hou J, Song C L, Cao X Y, *et al.* Shifts between ammonia-oxidizing bacteria and archaea in relation to nitrification potential across trophic gradients in two large Chinese lakes (Lake Taihu and Lake Chaohu)[J]. *Water Research*, 2013, **47**(7): 2285-2296.
- [29] Niu J, Kasuga I, Kurisu F, *et al.* Evaluation of autotrophic growth of ammonia-oxidizers associated with granular activated carbon used for drinking water purification by DNA-stable isotope probing[J]. *Water Research*, 2013, **47**(19): 7053-7065.
- [30] Boatman C D, Murray J W. Modeling exchangeable NH_4^+ adsorption in marine sediments: process and controls of adsorption[J]. *Limnology and Oceanography*, 1982, **27**(1): 99-110.
- [31] Di H J, Cameron K C, Shen J P, *et al.* Nitrification driven by bacteria and not archaea in nitrogen-rich grassland soils [J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 621-624.
- [32] Sun W, Xia C Y, Xu M Y, *et al.* Distribution and abundance of archaeal and bacterial ammonia oxidizers in the sediments of the Dongjiang River, a drinking water supply for Hong Kong [J]. *Microbes and Environments*, 2013, **28**(4): 457-465.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i>	(3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i>	(3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i>	(3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i>	(3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)		
.....	ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i>	(3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia	(3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song	(3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i>	(4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i>	(4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area		
.....	ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i>	(4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China		
.....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i>	(4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i>	(4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County		
.....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i>	(4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Si-hui, <i>et al.</i>	(4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i>	(4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i>	(4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen	(4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i>	(4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing		
.....	REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i>	(4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i>	(4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i>	(4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i>	(4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin	(4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i>	(4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i>	(4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i>	(4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i>	(4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i>	(4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i>	(4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i>	(4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i>	(4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i>	(4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju	(4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming		
.....	LAN Mu-ling, GAO Ming	(4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i>	(4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i>	(4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i>	(4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i>	(4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i>	(4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin	(4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen	(4319)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人