

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征

李虎^{1,2}, 黄福义¹, 苏建强^{1*}, 洪有为¹, 俞慎¹

(1. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)和氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)在生物地球化学氮循环过程中发挥着重要作用. 河流是关系人类生产和生活的重要生态系统, 蕴含大量氮循环功能微生物. 本研究采用变性梯度凝胶电泳(denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE)和荧光定量PCR(quantitative PCR, qPCR)技术对沉积物 AOA、AOB 群落进行结构和丰度分析, 在瓯江感潮河段尺度上探究 AOA、AOB 分布规律及影响 AOA、AOB 群落结构与丰度的因素. 结果表明, AOA 群落结构差异不显著, 影响其分布的主要因素为 NH_4^+ 和 TS; AOB 群落结构存在显著差异, 序列分析比对表明 AOB 分为 *Nitrosospira* 和 *Nitrosomonas*, 其中 90% 序列为 *Nitrosospira*, EC、pH、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、TC 和 TN 是影响 AOB 群落组成的重要环境因素; 总硫(TS)和电导率(EC)分别是影响 AOA 和 AOB 多样性的主要因素; AOA 丰度显著高于 AOB; EC、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 是影响 AOA 和 AOB 丰度的主要环境因素. 研究表明, 瓯江感潮河段沉积物中 AOA 和 AOB 群落结构和丰度均显著受环境因素影响, AOA 在表层沉积物氨氧化过程中可能占主导位置.

关键词: 氨氧化古菌; 氨氧化细菌; 感潮河段; 沉积物; 群落组成; 多样性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4659-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.12.043

Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River

LI Hu^{1,2}, HUANG Fu-yi¹, SU Jian-qiang^{1*}, HONG You-wei¹, YU Shen¹

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ammonia-oxidizing archaea (AOA) and ammonia-oxidizing bacteria (AOB) play important roles in the biogeochemical nitrogen cycle. Rivers are important ecosystems containing a large number of functional microbes in nitrogen cycle. In this study, denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) and real-time quantitative PCR (qPCR) technology were used to analyze the distribution and diversity of AOA and AOB in sediments from Oujiang. The results showed that the AOA community structure was similar among various sites, while the AOB community structure was significantly different, in which all detected AOB sequences were classified into *Nitrosospira* and *Nitrosomonas*, and 90% affiliated to *Nitrosospira*. The community composition of AOA was influenced by NH_4^+ and TS, in addition, the AOB composition was affected by NH_4^+ , EC, pH, NO_3^- , TC and TN. Total sulfur (TS) and electrical conductivity (EC) were the major factors influencing the diversity of AOA and AOB, respectively. AOA abundance was significantly higher than that of AOB. EC, NH_4^+ -N and NO_3^- -N were the main environmental factors affecting the abundance of AOA and AOB. This study indicated that the community composition and diversity of AOA and AOB were significantly influenced by environmental factors, and AOA might be dominant drivers in the ammonia oxidation process in Oujiang surface sediment.

Key words: ammonium-oxidizing archaea; ammonium-oxidizing bacteria; tidal river; sediment; community composition; diversity

河流是影响人类生活和社会经济发展的重要生态系统, 其中孕育着大量微生物资源, 对生物地球化学循环起着举足轻重的作用. 浙江省瓯江系浙江省第二大河流系统, 以其沉积物作为研究对象, 探究其中氮循环相关功能微生物群落结构及丰度, 能对阐述氮循环以及生态环境的改变等提供重要的理论依据.

目前对于河流沉积物的研究主要集中在某个点或区域的微生物群落^[1,2]或某种因素的改变对微生物的影响^[3,4], 然而对于河流大尺度的微生物群落结构及丰度研究报道较少, 特别是感潮河段. 由于不同区域人类生活生产活动不一、沿岸植物分布不

一和受潮汐影响不一等, 可能导致微生物的分布和功能不同, 所以, 对河流沉积物中功能微生物群落和丰度进行研究更加具有指导和现实意义.

氨氧化菌(ammonia-oxidizer)包括氨氧化古菌 AOA 和氨氧化细菌 AOB, 是氮循环过程中重要功能微生物, 其催化的氨氧化过程是硝化过程中的限速步骤^[5], 在整个生物地球化学氮循环过程中发挥着

收稿日期: 2015-04-27; 修订日期: 2015-07-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-JC402); 国家自然科学基金项目(31270153)

作者简介: 李虎(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: hli@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: jqsu@iue.ac.cn

重要作用. 大量研究表明, 氨氧化细菌和氨氧化古菌存在于很多生态系统中, 如水稻土^[6]、酸性茶园土^[7]、深海沉积物^[8]、河流沉积物^[9]和活性污泥^[10]等. 研究表明^[11~13], 在酸性土壤中, AOA 是好氧氨氧化的主要贡献者. Nicol 等^[14]研究表明, AOA 数量随着 pH 值增加而减少. 在含盐量较高, 如入海口及红树林沉积物中 AOA 同样占主导位置^[15, 16]. 氨单加氧酶(ammonia monooxygenase, AMO)是催化氨氧化过程中关键的酶, 由 *amo* 基因编码, 广泛分布在氨氧化菌基因组中, 是检测氨氧化古菌和氨氧化细菌的重要功能靶基因. *Amo* 基因簇包含有 *amoA*、*amoB* 和 *amoC* 亚单元^[17], 目前大部分研究选定 *amoA* 作为检测氨氧化菌的目标功能基因^[18~20], 可以很好地反映不同生态系统中 AOA 和 AOB 的群落结构以及丰度. 目前对河流感潮不同区域氨氧化作用的研究还比较少见, 本研究以功能基因 *amoA* 为靶基因, 分析浙江省瓯江感潮河段不同区域表层沉积物中 AOA 和 AOB 群落结构及丰度, 结合沉积物理化性质, 阐述影响瓯江 AOA 和 AOB 群落结构及丰度的主要环境因素, 以期完善河流氮循环及河流的治理提供科学的理论依据.

1 材料与方法

1.1 沉积物样品采集

浙江省瓯江感潮河段(图1)表层沉积物(20个样品, 0~20 cm)采集于2010年5月, 用自封袋密封置于-20℃车载冰箱, 运回实验室, 取出一部分贮存于-80℃用于DNA提取, 其余用于沉积物理化性质等测定.

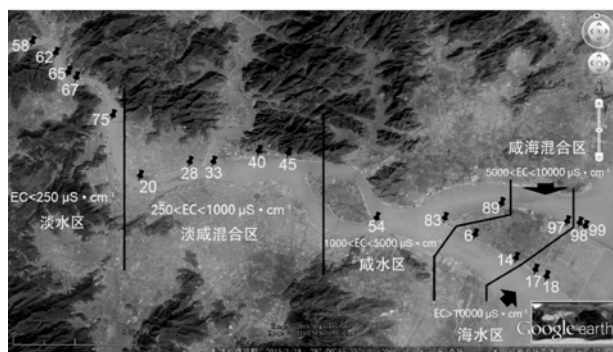


图1 瓯江流域水土界面沉积物样品采样站点及分区示意

Fig. 1 Surface-sediment sampling sites and regions along Oujiang River

1.2 沉积物理化性质测定

水:土=2.5:1, 220 r·min⁻¹振荡1 h, 测定沉积物 pH 和电导率 EC (XL60, Fisher, 美国); 将沉积物

冷冻干燥过100目筛子, 进行总碳(TC)、总氮(TN)和总硫(TS)测定 (Elementar VarioMax Analyzer, 美国); 2 mol·L⁻¹ KCl (水:土=6:1) 浸提沉积物, 并用0.45 μm 滤膜进行过滤, 测定铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N) (流动注射分析仪, LACHAT QC8500, 美国). 根据电导率将瓯江感潮段分为淡水区、淡咸混合区、咸水区、咸海混合区及海水区(图1).

1.3 DNA提取及*amoA*基因定量

取大约0.5 g 冷冻干燥沉积物, 按照 FastDNA® Spin Kit for Soil 试剂盒说明书提取沉积物微生物DNA, 用1.0% 琼脂糖凝胶电泳进行验证, 并用 Quant-iT™ PicoGreen dsDNA Assay Kit (Invitrogen, 美国)测定DNA浓度. DNA储存在-20℃直到后续实验使用.

采用 DGGE 技术分析 AOA 和 AOB 群落结构, PCR 扩增体系及条件如下: AOA *amoA* 基因扩增体系 (50 μL): 25.0 μL DreamTaq Green PCR Master Mix (Thermo Scientific, 德国)、引物 (10 μmol·L⁻¹)^[13] 各 1.0 μL、牛血清蛋白 (BSA, 20 mg·mL⁻¹) 0.5 μL 和 2.0 μL (100~200 ng) DNA 作为扩增模板, 剩余体积用灭菌超纯水补足; 反应条件: AOA *amoA* 基因: 95℃ 5 min, 94℃ 45 s、53.5℃ 1 min、72℃ 1 min 循环 35 次, 终延伸 72℃ 15 min; AOB *amoA* 基因采用 Touch down PCR, 具体如下: 94℃ 4 min, 94℃ 1 min、61.5℃ 1 min、72℃ 1 min 20 循环, 每个循环退火温度降低 0.5℃, 94℃ 1 min、51.5℃ 1 min、72℃ 1 min 循环 20 次, 终延伸 72℃ 8 min. 对 *amoA* 基因进行定量分析, 10 倍梯度稀释的已知拷贝数含有功能基因的质粒做标准曲线, 扩增效率 90%~110%, $R^2 > 0.99$ 才使用, 以保证定量数据的准确性. 实时荧光定量 PCR 扩增体系 (20 μL) 包括: 10.0 μL FastStart Universal SYBR Green Master (ROX), 引物 (10 μmol·L⁻¹) 各 0.5 μL, 2.0 μL (10~20 ng) DNA、BSA (20 mg·mL⁻¹, AOA *amoA* 1.0 μL, AOB *amoA* 0.2 μL), 扩增具体条件参见文献^[13], 使用 ABI 7500 实时荧光定量系统 (美国).

1.4 AOA 和 AOB 群落结构分析

采用 DGGE 技术分析瓯江感潮河段表层沉积物 AOA 和 AOB 群落结构组成. 采用带 GC 夹的引物^[21]分别对 AOA 和 AOB *amoA* 基因进行特异性扩增. 分别制备 6% 聚丙烯酰胺变性梯度为 20%~50% (AOA *amoA* 基因) 和 6% 聚丙烯酰胺变性梯度

为 20% ~55% (AOB *amoA* 基因) 的 DGGE 凝胶^[13], 60 V 电泳 1 h 后, 立即 100 V 电泳 16 h, 切胶回收进行测序. DGGE 指纹图谱用 Quantity one 分析, 回收条带进行测序后, 在 NCBI GenBank 中进行比对, 用 MEGA 6.0 进行序列处理及系统发育树构建.

2 结果与分析

2.1 沉积物理化性质

表层沉积物均为碱性 (pH 7.25 ~ 8.32), 淡水区域 pH 显著低于其他区域; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (0.88 ~ 52.10

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 分布存在较大差异, 且淡水区域显著高于其他区域含量, 与周磊榴等^[22] 研究比较, 威海混合区属于低氨氮区域, 而其他区域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高, 属于高氨氮区域; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与 EC 呈显著负相关 ($R^2 = 0.54, P < 0.05$); 威海混合区沉积物 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高, 显著高于其他区域含量, 且 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 EC 显著正相关 ($R^2 = 0.53, P < 0.05$). 瓯江感潮河段沉积物中 TC (5.02 ~ 13.21 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), TN (0.33 ~ 1.13 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 TS (0.86 ~ 4.92 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 在各个区域间没有显著性差异 (表 1).

表 1 瓯江流域水土界面沉积物理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of surface sediments along Oujiang River									
站位 ¹⁾	经度 /(°)	纬度 /(°)	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	pH	TC / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TN / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TS / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
58	120.536 6	28.139 19	101.9	7.27	9.68	0.93	1.28	12.00	4.14
62	120.554 2	28.129 08	115.2	7.25	11.65	1.02	2.01	46.00	5.90
65(OJ1) *	120.562 1	28.114 39	120.7	7.39	8.19	0.64	2.66	29.30	6.10
67	120.567 8	28.109 83	155.7	7.76	7.67	0.70	1.09	31.80	4.77
75	120.592 6	28.079 5	188.6	7.39	13.21	1.04	2.11	52.10	5.92
20	120.607 6	28.034 17	343.7	7.86	6.56	0.66	1.19	25.40	3.58
28	120.648 6	28.038 97	396.2	7.86	10.59	1.02	1.19	21.80	6.24
33	120.667 4	28.036 72	428.5	7.93	8.33	0.96	1.06	9.24	4.74
40(OJ2) *	120.704 7	28.039 78	458.6	7.63	8.83	0.89	1.34	17.50	9.73
45	120.728 3	28.035 47	569.0	8.32	9.40	1.03	0.86	9.81	13.10
54	120.791 1	27.981 44	2 626.0	8.09	7.76	0.73	0.93	13.90	6.84
83	120.845 3	27.974 5	2 799.0	7.95	10.33	0.76	1.16	14.10	6.06
89(OJ3) *	120.892 1	27.979 19	2 410.0	7.77	5.02	0.33	1.67	5.15	4.62
97(OJ4) *	120.942 3	27.959 81	6 450.0	7.71	8.71	0.68	4.92	NA	NA
6	120.867 6	27.959 92	6 483.0	7.83	9.32	0.79	1.03	0.88	13.90
14	120.897 4	27.939 17	9 584.0	7.69	10.70	1.04	1.21	1.43	26.10
98	120.952 1	27.957 56	13 730.0	7.73	10.05	0.85	4.51	9.45	9.15
99(OJ5) *	120.956 3	27.954 69	14 070.0	7.85	10.10	0.86	1.19	9.50	8.45
17	120.911 5	27.928 92	17 690.0	7.64	11.27	1.13	1.47	2.06	15.20
18(OJ6) *	120.919 5	27.923 14	16 980.0	7.63	11.20	1.04	1.39	8.64	14.60

1) 被 * 标记的样品用于后续氨氧化古菌和氨氧化细菌群落结构分析

2.2 氨氧化古菌 (AOA) 和氨氧化细菌 (AOB) 群落结构分析

通过 DGGE 分子生物学技术手段对沉积物 AOA 群落结构进行分析 [图 2(a)], 结果表明: 瓯江感潮河段各区域间 AOA 群落结构相似性均在 56% 以上, 其中相似性最高达到 95.9%; 聚类分析 [图 2(b)] 表明, OJ2、OJ3 和 OJ6 的 AOA 群落结构相似性最高, 而 OJ4 的 AOA 群落结构与其他区域存在较大差异. AOA 群落组成 α 多样性 (表 2) 显示, Shannon 指数为 2.64 ~ 2.89, OJ4 多样性最高.

从 DGGE 胶上回收得到 9 条 AOA 条带, 进行测序、NCBI 基因库比对、构建系统发育树 (图 3) 分析表明: 所有的条带均被归为 Sediment 簇^[23]. 冗余分

表 2 瓯江感潮河段表层沉积物 AOA 和 AOB 群落组成多样性

Table 2 Diversity of AOA and AOB community composition in surface sediments from estuary of Oujiang River			
多样性指数 (AOA/AOB) ¹⁾	Species	Shannon	Simpson
OJ1	14/35	2.64/3.56	0.93/0.97
OJ2	14/27	2.64/3.30	0.93/0.96
OJ3	14/29	2.64/3.37	0.93/0.97
OJ4	18/21	2.89/3.05	0.94/0.95
OJ5	15/17	2.71/2.83	0.93/0.94
OJ6	14/21	2.64/3.05	0.93/0.95

1) AOA/AOB 表示“/”前面数值为 AOA 群落结构多样性指数, “/”后面数值为 AOB 群落结构多样性指数

析 (redundancy analysis, RDA) 表明, TS 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响 AOA 群落结构的主要因素, 第一轴解释量为

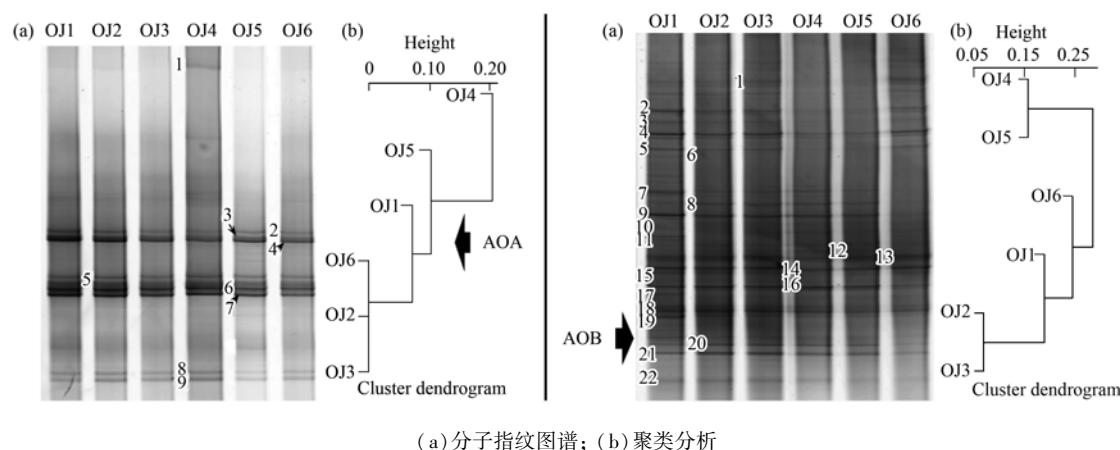
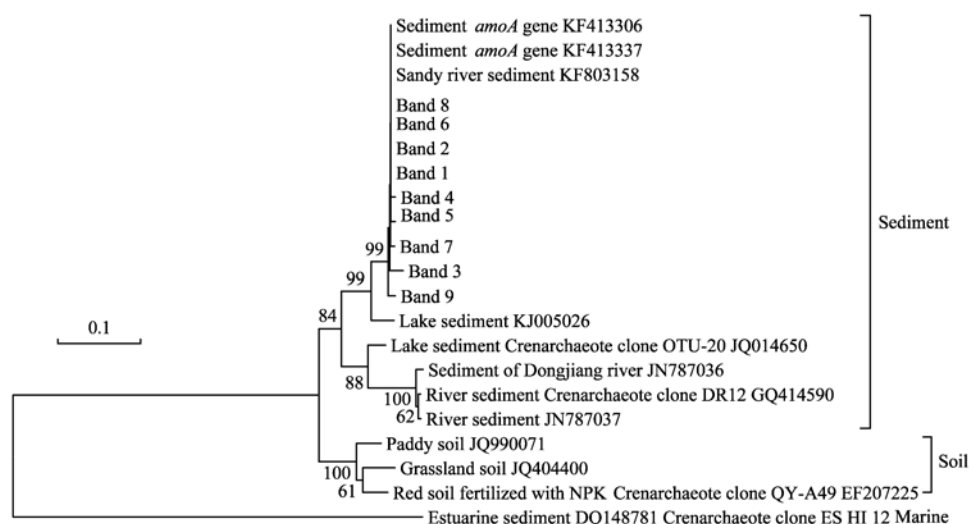


图 2 AOA 与 AOB DGGE 分子指纹图谱及聚类分析
Fig. 2 AOA and AOB DGGE profile and Cluster analysis



系统发育树采用 Neighbor-joining 方法构建,bootstrap 为 1 000,节点数值小于 50% 的数值未显示

图 3 基于 AOA *amoA* 基因的系统发育树
Fig. 3 Phylogenetic tree of AOA based on *amoA* gene

55.02%,第二轴解释量为 13.04% (图 4);相关性分析表明,TS 与 AOA 多样性显著相关($R^2 > 0.85, P < 0.05$).

瓯江表层沉积物 AOB 微生物群落结构分析[图 2(a)]表明:不同区域沉积物中氨氧化细菌群落结构相似性为 49.4% ~ 73.7%;聚类分析[图 2(b)]显示,OJ4 和 OJ5 单独聚在一支,说明其氨氧化细菌群落结构相似,并与其他采样点存在差异,OJ2 和 OJ3 群落结构相似.

AOB DGGE 切胶所得 22 条带,经过测序、NCBI 基因库比对和系统发育树(图 5)分析表明:AOB 隶属于 *Nitrosospira* 和 *Nitrosomonas*,其中 90.48% 属于 *Nitrosospira*. 其中 *Nitrosospira* 被分为 cluster I-1 和 cluster I-2 两个亚分支. RDA 分析结果表明,瓯江感潮河段沉积物 AOB 群落结构主要受 EC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、pH、TC 和 TN 影响,其中第一轴解释量达到 44.57%,第二轴解释量为 22.27% (图 4). 多样性指数(表 2)显示,瓯江 AOB Shannon 指数为 2.83 ~ 3.56,且 EC 与 AOB 多样性呈显著负相关($R^2 > 0.81, P < 0.05$).

2.3 功能基因 *amoA* 丰度

瓯江感潮区表层沉积物中 AOA 拷贝数为 $(1.67 \pm 0.10) \times 10^6 \sim (5.94 \pm 0.29) \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,各区域间没有明显的数量变化(图 6);AOB 拷贝数为 $(2.29 \pm 0.61) \times 10^4 \sim (2.19 \pm 0.07) \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,咸海混合区和海水区丰度显著高于其他 3 个区域(图 6);AOA 丰度显著高于 AOB ($P < 0.01$).

EC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是显著影响 AOA *amoA*、

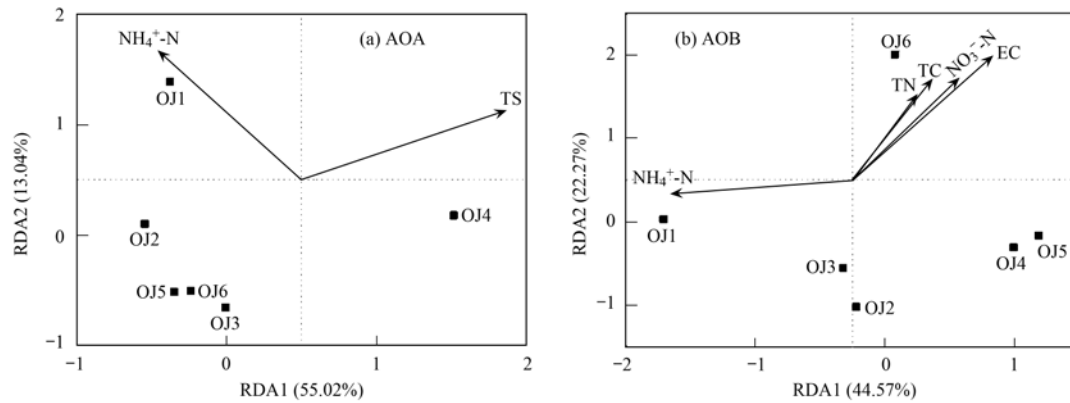
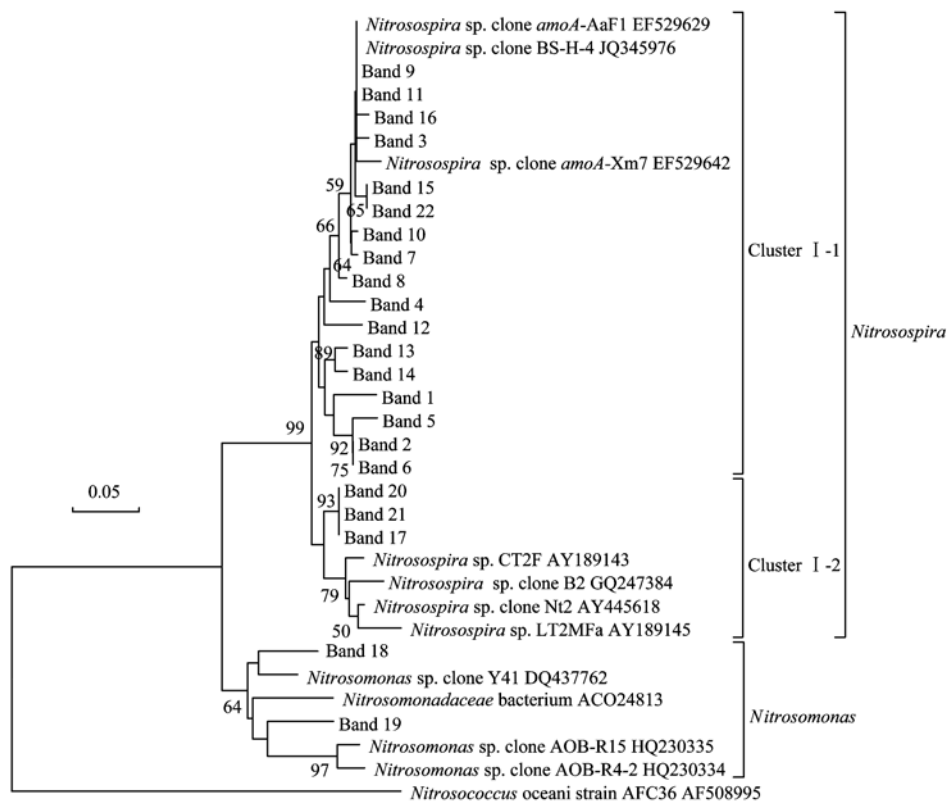


图 4 环境因子对 AOA 和 AOB 群落结构影响冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of the effect of environmental factors on AOA and AOB community composition



系统发育树采用 Neighbor-joining 方法构建,bootstrap 为1 000,节点数值小于 50% 的数值未显示

图 5 基于 AOB *amoA* 基因的系统发育树

Fig. 5 Phylogenetic tree of AOB based on *amoA* gene

AOB *amoA* 基因丰度的重要因素,其中 EC、 NO_3^- -N 分别与 AOA 和 AOB 呈正相关; NH_4^+ -N 与 AOA 和 AOB 呈显著负相关;AOA *amoA* 丰度与 AOB 存在极显著正相关(表 3),表明 AOA 与 AOB 不存在竞争关系,而是协同作用。

3 讨论

氨氧化进程是表层沉积物氮循环的重要组成部分,本研究采用 DGGE 及 qPCR 技术分别分析了瓯

江感潮区氨氧化菌(AOA 和 AOB)群落结构及丰度。各区域间 AOA 组成相似性为 56.3%~95.9%,均归为 sediment 簇,AOA 适应范围较广,在铵盐低,酸性土及氧含量低等环境中均能生存^[5, 24~26],瓯江各区域表层沉积物中养分及条件足以供 AOA 生存繁殖,其结构不存在显著性差异;AOB 群落组成在各区域间存在显著性差异,相似性仅为 49.4%~73.7%,AOB 需要在铵盐高等营养较丰富的环境中生存,容易受环境因素的影响^[27],在瓯江各区域,由

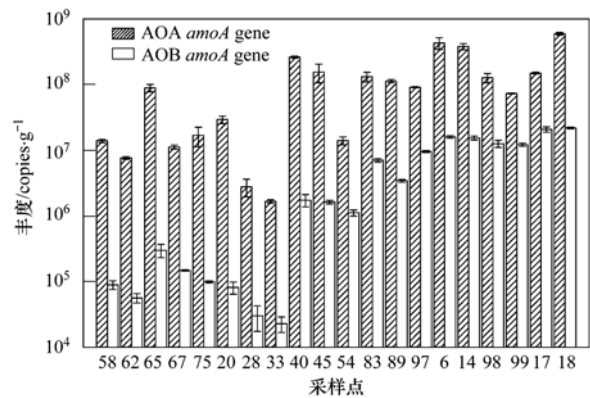


图 6 瓯江感潮河段表层沉积物 AOA 和 AOB 丰度

Fig. 6 Abundance of AOA and AOB in surface sediments from estuary of Oujiang River

表 3 瓯江感潮河段表层沉积物理化性质与微生物功能基因 Pearson 相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients between physico-chemical properties and microbial functional gene abundance in surface sediments from estuary of Oujiang River

环境因素	AOA	AOB
EC	0. 56 *	0. 94 **
pH	0. 04	0. 03
TN	0. 19	0. 35
TC	0. 19	0. 3
TS	-0. 09	0. 09
NH ₄ ⁺ -N	-0. 50 *	-0. 61 **
NO ₃ ⁻ -N	0. 74 **	0. 73 **
AOA	1	0. 76 **
AOB	0. 76 **	1

1) * 表示 $P < 0.05$ (双侧检验), ** 表示 $P < 0.01$ (双侧检验)

于表层沉积物理化性质存在差异,所以 AOB 的群落组成受到显著影响. 系统发育树表明,瓯江感潮表层沉积物中 AOB 分为 *Nitrosospira* 和 *Nitrosomonas*, 其中 *Nitrosospira* 占主要部分,研究表明,土壤中的 AOB 主要是 *Nitrosospira*^[11, 28], 而沉积物中 *Nitrosomonas* 占主要部分^[29]. 但 Wang 等^[30] 指出,在密云水库表层沉积物中提取得到的 AOB 均为 *Nitrosospira*, 与本研究所得结果一致. 研究表明^[7, 31~33], NH_4^+ 和 pH 是影响 AOA 和 AOB 群落结构的主要因素. 本研究中,TS 和 NH_4^+ -N 是影响 AOA 群落结构的主要环境因素,且 TS 与 AOA Shannon 指数显著相关. 研究表明^[34], 泉古菌 pJP41 代表类群为依赖硫元素进行无机化能型营养,说明硫元素对 AOA 的生长是一个重要元素,影响 AOA 的分布. NH_4^+ -N 作为氨氧化底物,为 AOA 的生长繁殖提供能量,影响 AOA 群落结构. 有研究表明 TN 对 AOB 群

落组成存在显著影响^[30], 本文影响 AOB 群落组成的主要因素为 EC、pH、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、TC 和 TN. AOA Shannon 指数为 2.64 ~ 2.89, 显著低于 AOB (2.83 ~ 3.56). AOA 多样性在感潮河段呈现先增加后减少的趋势, OJ4 多样性最高, 表明 OJ4 所在区域的环境最适合多种 AOA 的生长与繁殖; AOB 随着盐分的增加, 多样性下降, 表明 AOB 对渗透压敏感, 比较适合生存在渗透压低的生境中. TS 和 EC 分别是影响 AOA 和 AOB 群落多样性的环境因素. EC 与 AOB 多样性成显著负相关, 推测渗透压越大, 导致对渗透压敏感的 AOB 脱水抑制甚至死亡, 造成 AOB 多样性减少. 高盐分环境中, 由于沉积物中的渗透压增高, 微生物的酶活性及其生命活动受到抑制^[35], 钟丽华等^[36] 研究表明, 低盐分能够促进氨氧化菌的增长, 而高盐分则抑制其生长.

本研究通过 qPCR 技术分析了瓯江感潮区 AOA 和 AOB 丰度, 结果显示 AOA 丰度显著高于 AOB, 表明瓯江表层沉积物氨氧化过程中 AOA 发挥着主要作用. 研究表明在珠江入海口^[15], 水库沉积物^[30] 碱性条件下, AOA 占据主要位置, 与本研究结果一致. 瓯江表层沉积物 AOA 与 AOB 丰度在不同区域存在显著差异, 其中 EC、 NH_4^+ -N 及 NO_3^- -N 是影响 AOA 及 AOB 的主要环境因子. 高盐环境下, 受渗透压的影响, 微生物丰度降低^[35], 但在本研究中发现, AOA 和 AOB 丰度均随着 EC 增加而增加, 推测瓯江感潮区 EC 处于较低水平. NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 分别与 AOA、AOB 丰度呈显著负相关和正相关. 高浓度铵盐降低了 AOB 丰度, 可能是由于瓯江淡水区、淡咸混合区和咸水区铵盐浓度太高, 已经对 AOB 产生了抑制作用. Wang 等^[37] 研究表明, 高氨氮的湿地沉积物中铵盐与 AOB 正相关, 这与本文结果存在一定差异; 在高氨氮区, 硝酸盐与 AOA 和 AOB 存在正相关. 同时, Cao 等^[15] 研究也表明, 在珠江口岸, 硝酸盐与 AOA 和 AOB 丰度同样呈正相关.

4 结论

瓯江感潮段表层沉积物中 AOA 来源一致, AOB 在各区域间的组成显著不同. 感潮段 AOA 主要为 sediment 簇, 影响 AOA 群落结构的主要因素为 NH_4^+ 和 TS; AOB 分为 *Nitrosospira* 和 *Nitrosomonas* 簇, 其中 *Nitrosospira* 占主要部分, NH_4^+ 、pH、EC、 NO_3^- 、TC 和 TN 是影响 AOB 群落结构的主要因素. AOA 与 AOB 的多样性分别受 TS 和 EC 显著影响, AOA 多样性显著低于 AOB 多样性. 感潮段各区域 AOA

是表层沉积物中氨氧化过程中发挥主要功能的微生物,氨氧化微生物的丰度受 EC 、 NH_4^+ 及 NO_3^- 的显著影响。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Xie X, Jiao N, *et al.* Diversity and distribution of *amoA* - type nitrifying and *nirS* - type denitrifying microbial communities in the Yangtze River estuary [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2014, **11**(8): 2131-2145.
- [2] Chen Y Y, Zhen Y, He H, *et al.* Diversity, abundance, and spatial distribution of ammonia-oxidizing β -proteobacteria in sediments from Changjiang estuary and its adjacent area in East China Sea [J]. *Microbial Ecology*, 2014, **67**(4): 788-803.
- [3] 贺梦醒, 高毅, 孙庆业. 尾矿废水对河流沉积物和稻田土壤细菌多样性的影响 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1778-1785.
- [4] Wu Y C, Ke X B, Hernández M, *et al.* Autotrophic growth of bacterial and archaeal ammonia oxidizers in freshwater sediment microcosms incubated at different temperatures [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(9): 3076-3084.
- [5] Ke X B, Angel R, Lu Y H, *et al.* Niche differentiation of ammonia oxidizers and nitrite oxidizers in rice paddy soil [J]. *Environmental Microbiology*, 2013, **15**(8): 2275-2292.
- [6] Han P, Li M, Gu J D. Biases in community structures of ammonia/ammonium-oxidizing microorganisms caused by insufficient DNA extractions from Baijiang soil revealed by comparative analysis of coastal wetland sediment and rice paddy soil [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(19): 8741-8756.
- [7] Yao H Y, Gao Y M, Nicol G W, *et al.* Links between ammonia oxidizer community structure, abundance, and nitrification potential in acidic soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(13): 4618-4625.
- [8] Park S J, Ghai R, Martín-Cuadrado A B, *et al.* Genomes of two new ammonia-oxidizing archaea enriched from deep marine sediments [J]. *PloS One*, 2014, **9**(5): e96449.
- [9] 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.
- [10] 王晓慧, 文湘华, Craig C, 等. 城市污水处理厂活性污泥中氨氧化菌群落结构研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 3002-3006.
- [11] Chen X, Zhang L M, Shen J P, *et al.* Abundance and community structure of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in an acid paddy soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(3): 323-331.
- [12] He J Z, Shen J P, Zhang L M, *et al.* Quantitative analyses of the abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea of a Chinese upland red soil under long-term fertilization practices [J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(9): 2364-2374.
- [13] Zhang L M, Hu H W, Shen J P, *et al.* Ammonia-oxidizing archaea have more important role than ammonia-oxidizing bacteria in ammonia oxidation of strongly acidic soils [J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(5): 1032-1045.
- [14] Nicol G W, Leininger S, Schleper C, *et al.* The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 2966-2978.
- [15] Cao H L, Hong Y G, Li M, *et al.* Diversity and abundance of ammonia-oxidizing prokaryotes in sediments from the coastal Pearl River estuary to the South China Sea [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2011, **100**(4): 545-556.
- [16] Cao H L, Li M, Hong Y G, *et al.* Diversity and abundance of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in polluted mangrove sediment [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2011, **34**(7): 513-523.
- [17] 贺纪正, 张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(1): 406-415.
- [18] 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 等. 多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1331-1338.
- [19] Pester M, Rattei T, Flechl S, *et al.* *amoA*-based consensus phylogeny of ammonia-oxidizing archaea and deep sequencing of *amoA* genes from soils of four different geographic regions [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(2): 525-539.
- [20] Gao J F, Luo X, Wu G X, *et al.* Abundance and diversity based on *amoA* genes of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in ten wastewater treatment systems [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**(7): 3339-3354.
- [21] Chen X P, Zhu Y G, Xia Y, *et al.* Ammonia-oxidizing archaea: important players in paddy rhizosphere soil? [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(8): 1978-1987.
- [22] 周磊榴, 祝贵兵, 王衫允, 等. 洞庭湖岸边带沉积物氨氧化古菌的丰度、多样性及对氨氧化的贡献 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(6): 1741-1747.
- [23] Boyle-Yarwood S A, Bottomley P J, Myrold, D D. Community composition of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in soils under stands of red alder and Douglas fir in Oregon [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 2956-2965.
- [24] Gubry-Rangin C, Nicol G W, Prosser J I. Archaea rather than bacteria control nitrification in two agricultural acidic soils [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, **74**(3): 566-574.
- [25] Lehtovirta-Morley L E, Stoecker K, Vilcinskas A, *et al.* Cultivation of an obligate acidophilic ammonia oxidizer from a nitrifying acid soil [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(38): 15892-15897.
- [26] Pratscher J, Dumont M G, Conrad R. Ammonia oxidation coupled to CO_2 fixation by archaea and bacteria in an agricultural soil [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(10): 4170-4175.
- [27] Verhamme D T, Prosser J I, Nicol G W. Ammonia concentration determines differential growth of ammonia-oxidising archaea and

- bacteria in soil microcosms [J]. The ISME Journal, 2011, **5** (6): 1067-1071.
- [28] Li X R, Xiao Y P, Ren W W, *et al.* Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in different types of soil in the Yangtze River estuary [J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2012, **13**(10): 769-782.
- [29] Beman J M, Francis C A. Diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in the sediments of a hypernutrified subtropical estuary: Bahía del Tóbari, Mexico [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(12): 7767-7777.
- [30] 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.
- [31] Hu B L, Li S, Shen L D, *et al.* Effect of different ammonia concentrations on community succession of ammonia-oxidizing microorganisms in a simulated paddy soil column [J]. PLoS One, 2012, **7**(8): e44122.
- [32] Hu B L, Li S, Wang W, *et al.* pH-dominated niche segregation of ammonia-oxidising microorganisms in Chinese agricultural soils [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2014, **90**(1): 290-299.
- [33] Herrmann M, Saunders A M, Schramm A. Effect of lake trophic status and rooted macrophytes on community composition and abundance of ammonia-oxidizing prokaryotes in freshwater sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75**(10): 3127-3136.
- [34] Perevalova A A, Kolganova T V, Birkeland N K, *et al.* Distribution of *Crenarchaeota* representatives in terrestrial hot springs of Russia and Iceland [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(24): 7620-7628.
- [35] Juretschko S, Timmermann G, Schmid M, *et al.* Combined molecular and conventional analyses of nitrifying bacterium diversity in activated sludge: *Nitrosococcus mobilis* and *Nitrospira*-like bacteria as dominant populations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(8): 3042-3051.
- [36] 钟丽华, 董晓, 白洁, 等. 辽河口芦苇湿地氨氧化菌群落结构与土壤盐分的关系 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, **43**(4): 94-99.
- [37] 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.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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. 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 行