

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征订简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响

储瑜^{1,2}, 何肖微^{1,2}, 曾巾², 赵大勇^{1*}, 孙强³, 曹萍³, 吴庆龙²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 江苏省太湖渔业管理委员会办公室, 苏州 215004)

摘要: 本研究旨在了解东太湖水产养殖区表层沉积物中氨氧化微生物的群落特征. 以编码氨单加氧酶的 α 亚基(*amoA*)基因为标记, 通过实时荧光定量 PCR 技术(real-time qPCR)分析环境中好氧氨氧化原核生物的丰度; 通过构建克隆文库、测序, 进而划分操作分类单元(OTUs)构建系统发育树, 分析氨氧化微生物的群落结构与多样性. 分析养殖区 and 对照区表层沉积物中氨氧化微生物群落结构和多样性发现, 养殖区中氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)的丰度更高而对照区中氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)的丰度更高; AOA 在养殖区多样性更高, AOB 在对照区多样性更高; AOA 在养殖区和对照区沉积物中的优势类群均为 *Nitrosopumilus*, AOB 在养殖区和对照区沉积物中的优势类群相同均为亚硝化螺旋菌属(*Nitrosospira*). 水产养殖主要通过影响沉积物中的氨氮含量来影响 AOA 和 AOB 的丰度, 养殖过程会影响 AOA 的群落结构而对 AOB 的群落结构则无明显影响.

关键词: 东太湖; 水产养殖; 沉积物; 氨氧化细菌; 氨氧化古菌

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4206-09 DOI: 10.13227/j.hjx.201711110

Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu

CHU Yu^{1,2}, HE Xiao-wei^{1,2}, ZENG Jin², ZHAO Da-yong^{1*}, SUN Qiang³, CAO Ping³, WU Qing-long²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Taihu Fishery Management Committee Office, Suzhou 215004, China)

Abstract: The abundance and diversity of ammonia-oxidizing microorganisms in sediments of an aquacultural area of Eastern Lake Taihu were investigated. Real-time quantitative PCR was used to analyze the abundance of archaeal and bacterial *amoA* genes. Cloned libraries were constructed to investigate the structure and diversity of the microbial community. By comparing community characteristics of ammonia-oxidizing archaea (AOA) and ammonia-oxidizing bacteria (AOB) in different zones, we found that: ① Copy numbers of the bacterial *amoA* gene outnumbered those of archaeal *amoA* genes in the aquacultural zone; ② Diversity of AOA and AOB was higher in the aquaculture zone and control zone, respectively; ③ The dominant cluster of AOA and AOB in both sediments of aquiculture zone and control zone was *Nitrosopumilus* and *Nitrosospira* respectively. It was therefore the community structure of AOA (rather than AOB) in lake sediments that was affected by aquacultural activity.

Key words: Eastern Lake Taihu; aquaculture; sediment; ammonia-oxidizing bacteria; ammonia-oxidizing archaea

氨氧化作用是在氨氧化微生物的催化下将 NH_3 转化为 NO_2^- 的生物过程, 是氮素循环中硝化作用的限速步骤^[1,2]. 目前发现的能够催化氨氧化作用的微生物主要是氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)和氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB). 大量的研究发现氨氧化微生物分布广泛^[3,4], 自然环境中的 pH^[5]、温度^[6]、盐碱度^[7]、氨氮浓度^[8]和植物根际^[9]等都会对氨氧化微生物的群落结构、多样性和丰度造成影响, 并且存在多种因素协同作用的现象^[10].

养殖活动会积累大量的氮、磷等营养盐^[11], 影响沉积物中的氨氮含量、温度等环境条件, 从而对氨氧化微生物造成影响. 海洋渔场的污染会干扰沉

积物中的氮循环^[12]; 循环养殖系统的生物过滤器^[13]中 AOA 和 AOB 序列分别归属于 *Nitrosopumilus* 和 *Nitrosospira*; 鲢鱼养殖塘表层沉积物中^[14] AOB 的多样性和丰度显著高于 AOA, AOB 的优势类群也是 *Nitrosospira*; 上海养殖塘表层沉积物中^[15], AOA 在数量上更占优势, AOA 和 AOB 的优势类群分别为 *Nitrososphaera* 和 *Nitrosomonas*; 湖北公安的淡水养殖塘沉积物^[16]中 AOA 是优势的氨

收稿日期: 2017-11-13; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD13B01, 2015BAD13B00)

作者简介: 储瑜(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊沉积物中氮循环功能微生物, E-mail: heavenbetycy@163.com

* 通信作者, E-mail: dyzhao@hhu.edu.cn

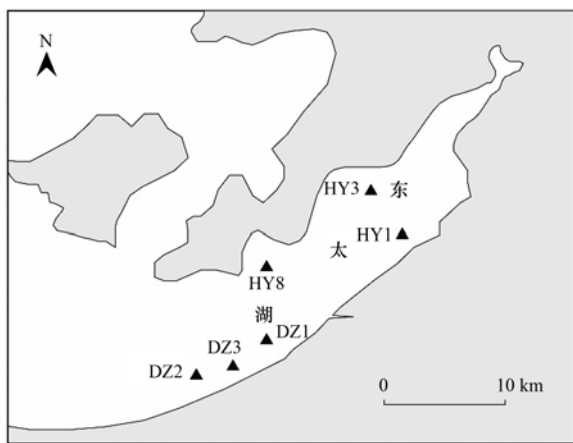
氧化微生物, 关键因素是溶解氧。

目前对淡水养殖塘中氨氧化微生物的研究仍然较少, 涉及的养殖塘面积较小且较为封闭, 不同的养殖塘中的氨氧化微生物的群落特征也不尽相同。氨氧化微生物因其特殊功能对养殖系统生态环境有着重要意义, 而位于太湖东南部面积较大的湖湾东太湖, 长期以来都是太湖的主水产养殖区^[17], 因此本研究通过实时荧光定量 PCR 和克隆文库技术, 以 *amoA* 基因为标记, 分析养殖区和对照区沉积物中氨氧化微生物群落特征差异, 结合沉积物的理化性质, 探究渔业养殖对湖泊沉积物中氨氧化微生物的影响, 以期阐明水产养殖对湖泊生态系统中氮素生物地球化学循环的影响提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域选择和样品采集

2016 年 8 月, 在东太湖进行采样。研究区域为东太湖实施了鱼虾蟹混养模式的混养区, 对照区设置在距离养殖区 3~5 km 的范围内, 是历史上从未进行过水产养殖的区域。养殖区和对照区各设置了 3 个采样点(图 1)。使用柱状采泥器(德国 HYDRO-BIOS)采集沉积物样品, 每个样点采集 3 个平行样品, 共计 18 个样品, 现场切取 0~1 cm 深度的沉积物装入无菌袋中置于冰上冷藏, 运回实验室后在 -20℃ 下冷冻保存。



养殖区样点: HY1、HY3、HY8; 对照区样点: DZ1、DZ2、DZ3

图 1 东太湖区域采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Eastern Lake Taihu

1.2 理化指标的测定

所有沉积物样品经冷冻干燥机(ALPHA1-2, 德国 CHRIST)干燥后研磨并保存在 -20℃ 中, pH 使用 pH 计(pHB-4, 上海雷磁)进行测定, 沉积物经 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提后, 利用连续流动分析仪

(San ++, SKALER, 荷兰)测定亚硝氮(NO₂⁻-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和氨氮(NH₄⁺-N)。总氮(TN)和总磷(TP)在沉积物样品经消解后再进行测定, 有机质(OM)含量应用标准方法进行测定。

1.3 DNA 提取

沉积物基因组 DNA 提取自 0.25 g 沉积物, 使用强力 DNA 提取试剂盒(MoBio Laboratory, Solana Beach, CA)进行提取, 具体操作依照试剂盒的操作说明书; 提取出的 DNA 利用 0.8% 琼脂糖凝胶进行检验后, 再利用生物分光光度计(Eppendorf, Hamburg, German)测定其浓度。

1.4 实时定量 PCR 扩增

实验所用的扩增仪器为 IQ5 Thermocycler (RG65HD, Corbett, Australia)。AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因 PCR 扩增的引物对分别是 Arch-*amoA*F/Arch-*amoA*R^[18] 和 *amoA*-1F/*amoA*-2R^[19], 标准曲线利用连续稀释 10 倍已知浓度的质粒来建立。AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因的 PCR 扩增体系均为 20 μL, 其中包括 10 μL SYBR Premix Ex TaqTM 缓冲液(Takara, Japan)、7.4 μL ddH₂O、上下游引物各 0.8 μL 和 1 μL DNA 模板。AOA 和 AOB 的扩增程序相同, 扩增程序为: 95℃ 预变性 3 min; 95℃ 30 s, 53℃ 1 min, 72℃ 20 s, 循环 40 次; 最后 72℃ 延伸 7 min。

1.5 克隆建库与系统发育分析

将 PCR 产物纯化后(Axygen PCR cleanup purification kit, Hangzhou, China), 连接 pGEM-T 载体(Promega, Madison, WI, USA)转移至大肠杆菌感受态细胞中(DH5, Takara, Japan)进行克隆。将宿主细胞转移至 100 μg·mL⁻¹ 氨苄西林、40 μg·mL⁻¹ X-Gal 和 24 μg·mL⁻¹ IPTG 的 LB 培养基上培养过夜, 筛选阳性克隆的转化株, 使用载体引物(T7 和 SP6)鉴定阳性克隆并寄送到上海美吉生物科技有限公司进行 DNA 测序, 总共构建了 12 个文库, AOA 的 6 个文库中得到阳性克隆子 180 个, 得到序列 180 条, AOB 的 6 个文库中得到阳性克隆子 300 个, 序列 299 条。

测序结果先用 DNASTar 软件包删除载体序列, 并用 ClustalX2^[20] 软件进行多重序列对比, 使用 DOTUR 软件包划分 OTU 并计算多样性指数(*S*_{Chao1} 和香农多样性指数 *H'*)和文库覆盖率, 用 BLAST 在 GenBank 中与已知序列进行比对, 使用 MEGA 7.0 软件包计算邻接法系统发育树^[21]。

1.6 数据分析

不同区域沉积物的理化指标和氨氧化细菌与古

菌的 *amoA* 基因拷贝数使用 SPSS 22.0 进行 One-Way ANOVA 分析以检验显著性差异。

1.7 序列上传

本研究中所获得的所有 *amoA* 基因序列均已上传到 GenBank 基因库中, 获得的古菌 *amoA* 基因序列的登录号为 MF154410-MF154469 和 MG700694-MG700783; 获得的细菌 *amoA* 基因序列的登录号为 MF154470-MF154569 和 MG700784-MG701012。

表 1 不同区域的沉积物理化指标¹⁾

Table 1 Characteristics of sediments in different zones

位置	pH	NO ₂ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	OM /g·kg ⁻¹
养殖区	8.13 ± 0.05a	0.064 ± 0.008a	0.78 ± 0.29a	61.33 ± 14.84a	4.46 ± 0.55a	0.79 ± 0.20a	119.45 ± 13.50a
对照区	7.97 ± 0.06a	0.018 ± 0.007b	0.59 ± 0.16a	17.95 ± 1.91b	2.40 ± 0.66b	0.39 ± 0.05b	25.34 ± 3.40b

1) TN: 总氮, TP: 总磷, OM: 有机质; 同一个理化指标数据后的不同字母表示显著差异性 ($P < 0.05$, $n = 3$)

高, 水产养殖活动会增加沉积物中的营养负荷。

2.2 沉积物中氨氧化微生物的丰度

两个区域间氨氧化古菌和细菌的 *amoA* 基因拷贝数差异显著 ($P < 0.01$), 养殖区中 AOA 的丰度低于对照区而 AOB 的丰度高于对照区; 此外, 养殖区中 AOB 的丰度高于 AOA 而对照区中 AOB 的丰度低于 AOA (图 2)。

2.3 沉积物中氨氧化微生物的多样性

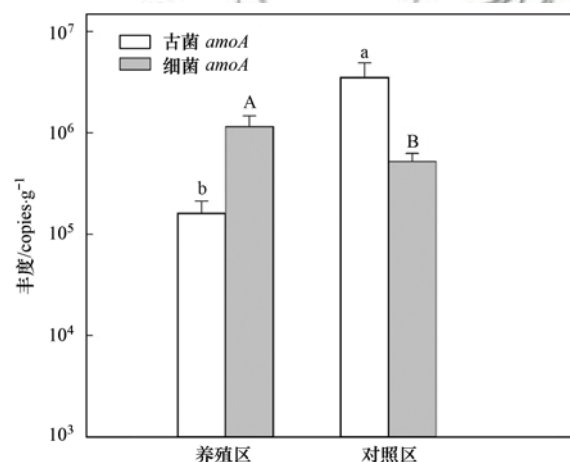
如表 2 所示, 所得到的 AOA 的序列共有 180 条, AOB 的序列共有 299 条, 每个文库中古菌 *amoA* 基因的序列有 30 条, 细菌 *amoA* 基因的序列为 50 条或 49 条。养殖区中 AOA 的 OTU 数在 5 ~ 13 之间, AOB 的 OTU 数也在 5 ~ 13 之间与 AOA 相近, 对照区中 AOA 的 OTU 数在 3 ~ 6, AOB 的 OTU 数为 9 ~ 15 之间远大于 AOA。联系其他多样性指数 (S_{Chao1} 和香农多样性指数 H') 和文库覆盖率的计算结果进行分析可以发现, 一方面, AOA 在养殖区的多样性更高而 AOB 在对照区的多样性更高; 另一

2 结果与分析

2.1 理化性质

根据表 1 可知, 养殖区和对照区的 pH 值相近呈弱碱性; 养殖区表层沉积物中 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、TN、TP 和有机质的含量均显著高于对照区, NO₃⁻-N 的含量在两个区域的沉积物中无显著性差异; 总体来说, 东太湖的沉积物中营养负荷均比较

方面, 养殖区中 AOA 和 AOB 的多样性相近, 而对照区中 AOA 多样性低于 AOB。



图中不同字母表示不同区域同一种氨氧化菌之间 *amoA* 基因丰度差异显著 ($P < 0.01$, $n = 3$)

图 2 不同区域沉积物中氨氧化古菌和氨氧化细菌 *amoA* 基因丰度

Fig. 2 Abundance of archaeal and bacteria *amoA* genes in sediments of different zones

表 2 不同区域沉积物中氨氧化古菌和氨氧化细菌的 *amoA* 基因多样性

Table 2 Diversity of archaeal and bacterial *amoA* sequences in different zones

项目	文库	序列数	OTU 数	文库覆盖率/%	S_{Chao1}	H'
AOA	HY1	30	5	90.00	6.5	0.673
	HY3	30	8	90.00	7.5	1.609
	HY8	30	13	80.00	28	2.407
	DZ1	30	3	100.00	3	0.730
	DZ2	30	5	93.33	5.5	1.122
	DZ3	30	6	96.67	6	1.428
AOB	HY1	49	9	93.88	12	1.766
	HY3	50	5	100.00	5	1.354
	HY8	50	13	90.00	18	2.228
	DZ1	50	15	86.00	25.5	2.245
	DZ2	50	11	90.00	21	1.794
	DZ3	50	9	96.00	9.5	1.897

2.4 沉积物中氨氧化微生物的群落结构

本研究中所获得的 AOA 与 AOB 的 *amoA* 基因序列所构建系统发育树如图 3 和图 4 所示. 沉积物中古菌的 *amoA* 序列划分出较多的类群, 即 *Nitrososphaera* 的一些子集群和 *Nitrosopumilus* 类群 [图 5(a)], 养殖区和对照区中的优势类群均为 *Nitrosopumilus*, 所占比例分别为 64.4% 和 94.4%, 养殖区中 *Nitrososphaera* 类群相对丰度更高且分支更具多样性.

沉积物中细菌的 *amoA* 序列划分出 3 个类群即 *Nitrospira*、*N. communis* 和 *N. oligotropha* [图 5(b)], 文中所涉及的 AOB 类群均属于 β 亚纲(β -Proteobacteria), 均是常见的陆地生态系统中的 AOB 类群. 养殖区和对照区中优势类群均为 *Nitrospira*, 其在养殖区和对照区所占比例分别为 57.06% 和 58%, 3 个类群在两个区域中均有发现且相对关系均为 *N. oligotropha* < *N. communis* < *Nitrospira* [图 5(b)]. 因此, AOB 在养殖区和对照区中有相似的群落组成, 水产养殖对 AOB 的群落结构没有明显的影响.

3 讨论

3.1 氨氧化微生物的丰度

氨氮是氨氧化反应的底物, 一定范围内氨氮含量的增加会促进氨氧化反应和氨氧化微生物的生长, 已有充足的证据表明, 氨氮的含量是划分 AOA 与 AOB 生态位的重要因素. 有研究表明 AOA 适合在氨氮含量较低时生长, 高氨氮环境中生长会受到抑制, 而 AOB 会占优势地位^[22~24], 同时, Wu 等^[25]也证明了太湖沉积物中氨氧化古菌 *amoA* 的拷贝数与氨氮含量有着显著性的负相关关系. 养殖区的沉积物中丰富的有机质在被异养微生物分解时会消耗大量氧气, 而 AOA 耐低氧环境, 海洋沉积物 AOA 的富集培养物对氧气的半饱和常数为 $2.01 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[26, 27]; 对 AOB 淡水沉积物富集培养发现, 当氧气浓度为 $0.2 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, AOB 的培养物随着 DO 浓度降低生长速率下降^[8], 在瑞士的寡营养湖泊中, AOA 和 AOB 数量的比值随着深度的增加而增加^[28], 因此溶解氧的可利用性也是划分 AOA 和 AOB 生态位的重要因素. 然而东太湖的平均水深不到 1.2 m ^[17], 沉积物与水的交界面受风浪影响物质交换频繁, 因此, 东太湖沉积物并不是典型的低氧环境, 溶解氧不会对氨氧化微生物的生态位造成决定性的影响. 此外, 鲢鱼养殖塘沉积物

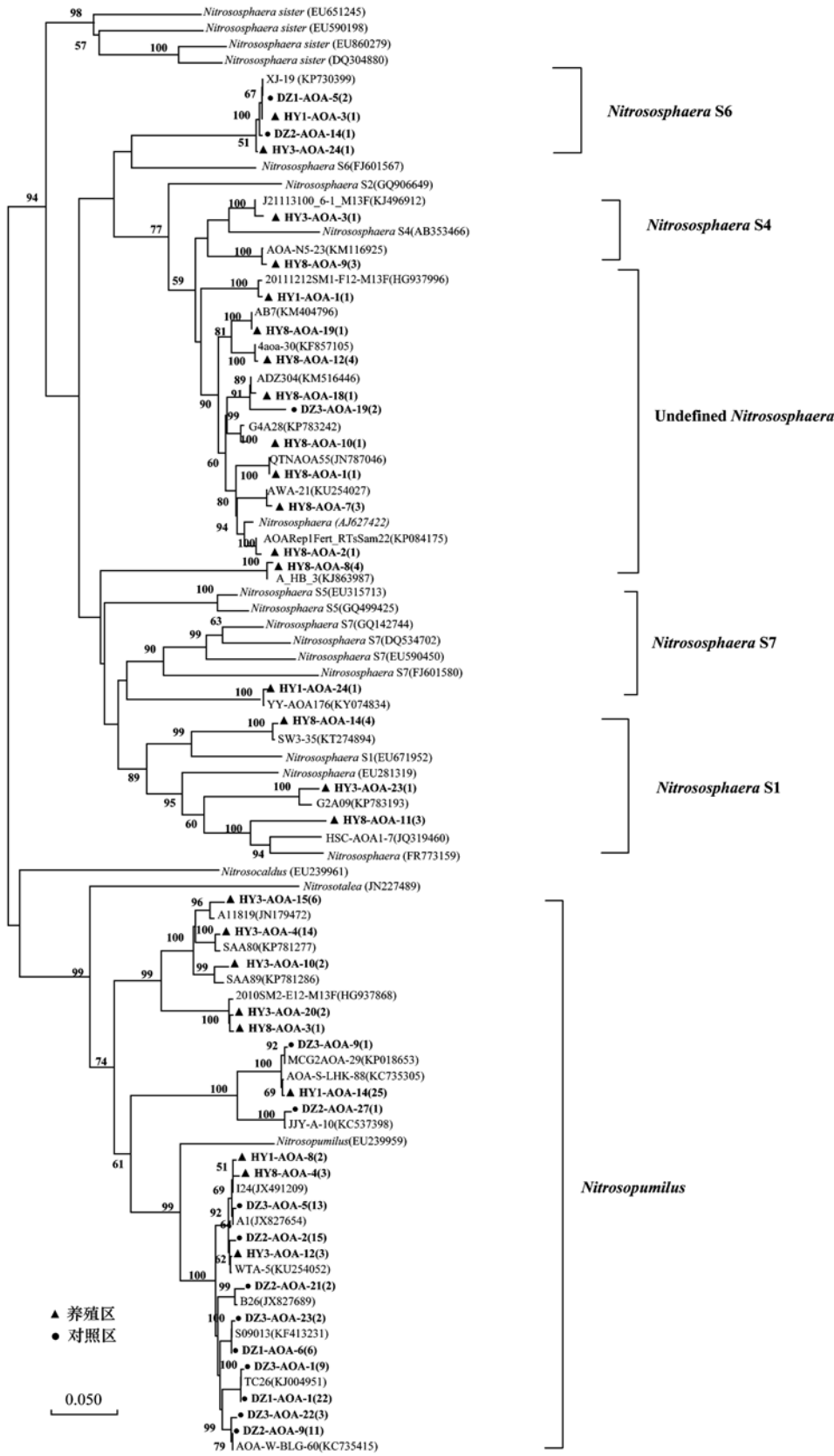
中 AOA 的丰度与多样性、间隙水中的氨氮浓度有显著的负相关关系^[14], 因此, 东太湖沉积物中氨氧化微生物的丰度在不同区域的差异主要是由氨氮含量的差异造成的.

3.2 氨氧化微生物的多样性

一方面不同区域中关于同种氨氧化微生物的比较表明, 养殖区中 AOA 的多样性更高, 而对照区中 AOB 的多样性更高. 类似的情况在不同营养状态的苏必利尔湖和伊利湖之间也有发现^[29], 富营养化的伊利湖沉积物中 AOA 的多样性要高于寡营养的苏必利尔湖, 并且 AOA 的多样性和丰度之间有负相关关系. 因此, 养殖区的 AOA 的多样性更高可能是由于渔业养殖活动导致的湖泊营养程度增加. 此外, AOB 在两个区域之间的多样性差异则与 AOA 完全相反, 这可能由于不同的氨氧化微生物对不同环境的适应性差异. 另一方面, 通过对比同一区域中不同氨氧化微生物发现, 养殖区中 AOA 与 AOB 的多样性相近, 而对照区中 AOA 多样性低于 AOB. 在北运河沉积物中^[30]和太湖梅梁湾和胥口湾的沉积物中^[31]也发现 AOA 的群落多样性低于 AOB, 这与本文对照区中所得到的结果相似; 而在鲢鱼养殖塘沉积物^[14]的研究发现, AOB 的多样性明显高于 AOA, 这样的结果与本研究养殖区的结果并不相同, 不同的养殖水体环境的沉积物中的氨氧化微生物多样性相对关系可能都有差异, 因此, 关于养殖区沉积物中 AOA 和 AOB 多样性仍需更多的后续研究.

3.3 氨氧化微生物的群落结构

研究区域沉积物中所获得的 AOA 序列均属于 *Nitrososphaera* 和 *Nitrosopumilus* 两个主要类群, *Nitrososphaera* 类群也即是比较熟知的 group1.1b 分支, 是陆地生态系统中最为常见的类群, *Nitrosopumilus* 是比较熟知的 group1.1a 类群, 在海洋生态系统中更为常见^[32], 而在太湖的竺山湾表层沉积物中^[33]和太湖底泥中^[25]所获得的序列也均属于 *Nitrososphaera* 和 *Nitrosopumilus* 两个主要类群. 此外, 对照区和养殖区中优势类群均为 *Nitrosopumilus*, Sun 等^[34]对江苏省 8 个湖泊沉积物中氨氧化微生物的空间分布进行调查时发现, 所调查的沉积物中的优势类群均为 *Nitrosopumilus* 类群, 这一点与本研究所得结果是相同的, 此外他们只在富营养化湖泊中分离出了归类于 *Nitrososphaera* 类群的 *amoA* 基因序列, 并且发现间隙水 TOC 与 AOA 的群落结构有相关性. 因此可能是由于水产养



本研究中所获得的序列加粗显示，序列名括号中的数字为属同一 OTU 的序列数，下同

图 3 不同区域沉积物中氨氧化古菌 *amoA* 基因系统发育树

Fig. 3 Phylogenetic analysis of archaeal *amoA* gene sequences in sediments of different zones

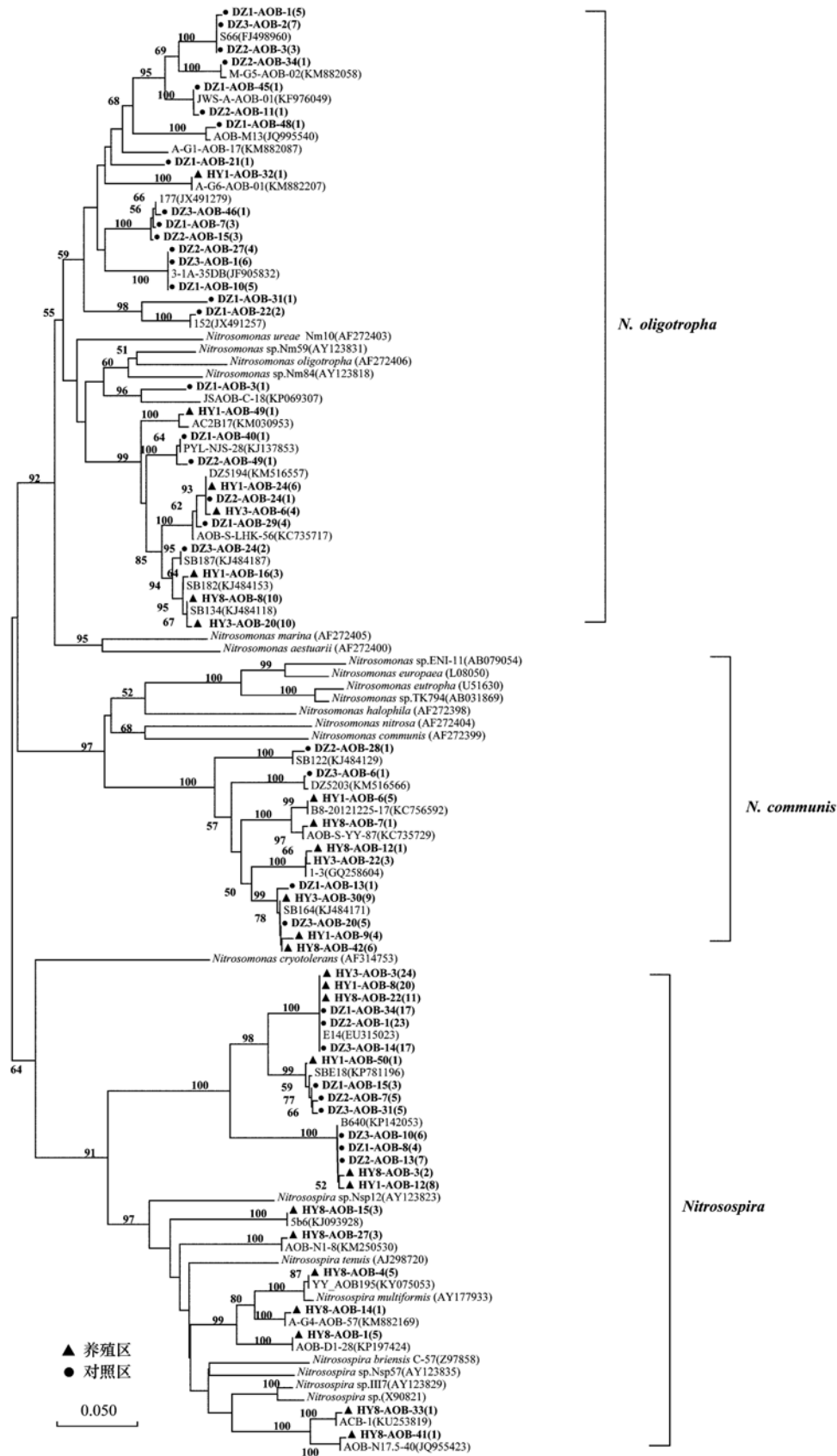


图 4 不同区域沉积物中氨氧化细菌 *amoA* 基因系统发育树

Fig. 4 Phylogenetic analysis of bacterial *amoA* gene sequences in sediments of different zones

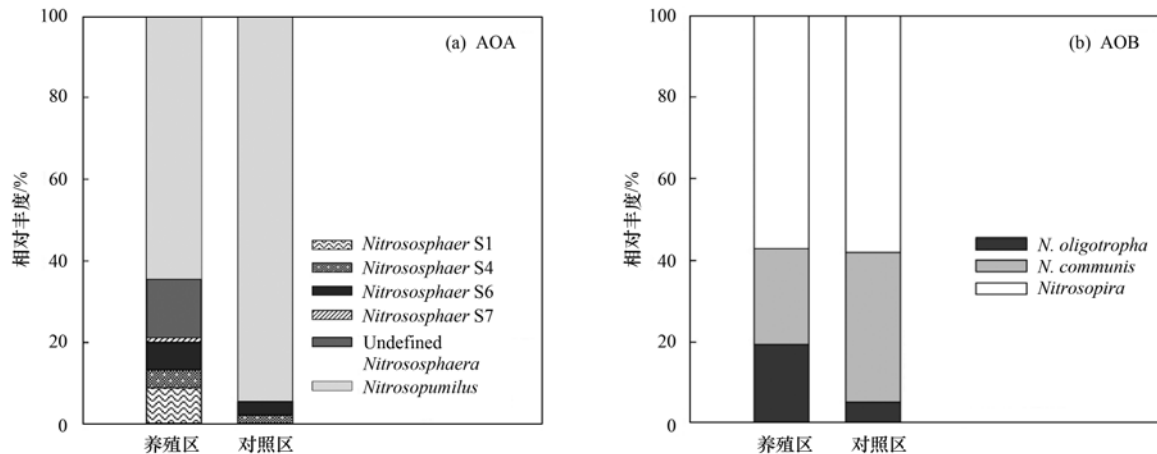


图5 不同区域沉积物中氨氧化微生物类群的相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of different archaeal and bacterial *amoA* clusters in sediments of different zones

殖导致了养殖区 TOC 浓度的增加, 从而造成养殖区中 *Nitrososphaera* 类群相对比例的增加。

两个区域沉积物中 AOB 的群落组成很相似, 所有的序列均归类于 *Nitrospira*、*N. communis* 和 *N. oligotropha* 这 3 个类群, 优势种群均为 *Nitrospira*, 这与一些养殖塘沉积物^[15, 16]中 *Nitrosomonas* 类群占优势的情况并不相同, 而 *Nitrospira* 更多是在农田土壤中 AOB 群落中占优势, 在不同类型、不同利用方式和不同季风带的土壤环境中均有过验证^[35], 在淡水湖泊环境中, *Nitrospira* 占主导的 AOB 群落结构较为少见, 但在布吉河的水样^[36]、浙江省瓯江沉积物^[37]和武汉鲢鱼养殖塘沉积物^[14]中, 所得到 AOB 序列大部分或者全部归属于 *Nitrospira* 类群; 主要是环境中物理、化学因素的改变影响了 AOB 的群落结构分布。

4 结论

(1) 渔业养殖区与对照区的沉积物中 pH 相近呈弱碱性, 渔业养殖区中各组分氮均高于对照区, 养殖区中沉积物营养盐更丰富。

(2) 养殖区中 AOB 的丰度更高, 对照区中 AOA 丰度更高, 主要是由于养殖区和对照区的氨氮含量差异, AOA 适合在氨氮含量较低时生长, 而在氨氮含量过高的环境中生长会受到抑制, 高氨氮环境中 AOB 会占优势地位。

(3) AOA 在养殖区中的多样性高于对照区, AOB 在养殖区中的多样性低于对照区; 养殖区 AOA 的多样性高于 AOB, 对照区中 AOA 的多样性则低于 AOB。

(4) 渔业养殖区和对照区沉积物中 AOA 的优

势类群均为 *Nitrosopumilus*, 养殖区中 *Nitrososphaera* 的相对比例大大增加; AOB 在两个区域沉积物中群落组成很相似, 优势种群均为 *Nitrospira*。水产养殖会影响 AOA 的群落结构, 但对 AOB 的群落结构则没有明显影响。

参考文献:

- [1] Beman J M, Francis C A. Diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in the sediments of a hypernitrified subtropical estuary: Bahía del Tóbari, Mexico [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(12): 7767-7777.
- [2] Hermansson A, Lindgren P E. Quantification of ammonia-oxidizing bacteria in arable soil by real-time PCR [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **67**(2): 972-976.
- [3] Erguder T H, Boon N, Wittebolle L, et al. Environmental factors shaping the ecological niches of ammonia-oxidizing archaea [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2009, **33**(5): 855-869.
- [4] Wang X Y, Cui W, 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.
- [5] 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.
- [6] Zeng J, Zhao D Y, Yu Z B, et al. Temperature responses of ammonia-oxidizing prokaryotes in freshwater sediment microcosms [J]. PLoS One, 2014, **9**(6): e100653.
- [7] 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.
- [8] French E, Kozłowski J A, Mukherjee M, et al. Ecophysiological characterization of ammonia-oxidizing archaea and bacteria from freshwater [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78**(16): 5773-5780.
- [9] Huang R, Zhao D Y, Zeng J, et al. Abundance and community composition of ammonia oxidizers in rhizosphere sediment of two

- submerged macrophytes [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2016, **31**(3): 407-419.
- [10] Gubry-Rangin C, Novotnik B, Mandić-Mulec I, *et al.* Temperature responses of soil ammonia-oxidising archaea depend on pH[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **106**: 61-68.
- [11] 何肖微, 储瑜, 曾巾, 等. 东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4562-4569.
He X W, Chu Y, Zeng J, *et al.* Effects of optimized fish farming on the sediment nutrients of Eastern Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4562-4569.
- [12] McCaig A E, Phillips C J, Stephen J R, *et al.* Nitrogen cycling and community structure of proteobacterial β -subgroup ammonia-oxidizing bacteria within polluted marine fish farm sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(1): 213-220.
- [13] Sakami T, Andoh T, Morita T, *et al.* Phylogenetic diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in biofilters of recirculating aquaculture systems[J]. *Marine Genomics*, 2012, **7**: 27-31.
- [14] Zhou Z J, Li H, Song C L, *et al.* Prevalence of ammonia-oxidizing bacteria over ammonia-oxidizing archaea in sediments as related to nutrient loading in Chinese aquaculture ponds [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(7): 1928-1938.
- [15] Lu S M, Liu X G, Ma Z J, *et al.* Vertical segregation and phylogenetic characterization of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in the sediment of a freshwater aquaculture pond [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **6**: 1539.
- [16] Lu S M, Liao M J, Xie C X, *et al.* Seasonal dynamics of ammonia-oxidizing microorganisms in freshwater aquaculture ponds[J]. *Annals of Microbiology*, 2015, **65**(2): 651-657.
- [17] 谷孝鸿, 王晓蓉, 胡维平. 东太湖渔业发展对水环境的影响及其生态对策[J]. *上海环境科学*, 2003, **22**(10): 702-704, 711.
Gu X H, Wang X R, Hu W P. Effect of fishery development on water environment and its eco-countermeasure in East lake Taihu [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, **22**(10): 702-704.
- [18] 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.
- [19] Rothauwe 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.
- [20] Thompson J D, Gibson T J, Plewniak F, *et al.* The Clustal_X windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools [J]. *Nucleic Acids Research*, 1997, **25**(24): 4876-4882.
- [21] Altschul S F, Madden T L, Schäffer A A, *et al.* Gapped blast and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs[J]. *Nucleic Acids Research*, 1997, **25**(17): 3389-3402.
- [22] Hatzenpichler R, Lebedeva E V, Spieck E, *et al.* A moderately thermophilic ammonia-oxidizing crenarchaeote from a hot spring [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(6): 2134-2139.
- [23] Di H J, Cameron K C, Sherlock R R, *et al.* Nitrous oxide emissions from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia-oxidizing bacteria and archaea [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(5): 943-954.
- [24] 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.
- [25] Wu Y C, Xiang Y, Wang J J, *et al.* Heterogeneity of archaeal and bacterial ammonia-oxidizing communities in Lake Taihu, China[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2010, **2**(4): 569-576.
- [26] Park B J, Park S J, Yoon D N, *et al.* Cultivation of autotrophic ammonia-oxidizing archaea from marine sediments in coculture with sulfur-oxidizing bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(22): 7575-7587.
- [27] Lam P, Lavik G, Jensen M M, *et al.* Revising the nitrogen cycle in the Peruvian oxygen minimum zone [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(12): 4752-4757.
- [28] Vissers E W, Anselmetti F S, Bodelier P L E, *et al.* Temporal and spatial coexistence of archaeal and bacterial *amoA* genes and gene transcripts in Lake Lucerne [J]. *Archaea*, 2013, **2013**: 289478.
- [29] Bollmann A, Bullerjahn G S, McKay R M. Abundance and diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in sediments of trophic end members of the Laurentian Great Lakes, Erie and Superior [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(5): e97068.
- [30] 鲍林林, 陈永娟, 王晓燕. 北运河沉积物中氨氧化微生物的群落特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 179-189.
Bao L L, Chen Y J, Wang X Y. Diversity and abundance of ammonia-oxidizing prokaryotes in surface sediments in Beiyun River [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 179-189.
- [31] Zhao D Y, Zeng J, Wan W H, *et al.* Vertical distribution of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in sediments of a eutrophic lake [J]. *Current Microbiology*, 2013, **67**(3): 327-332.
- [32] 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.
- [33] 向燕, 吴宇澄, 刘国锋, 等. 太湖竺山湾沉积物中氨氧化原核生物的垂直分布与多样性[J]. *生态学报*, 2010, **30**(6): 1423-1430.
Xiang Y, Wu Y C, Liu G F, *et al.* Vertical distribution and diversity of ammonia-oxidizing prokaryotes in a sediment core from Zhushan Bay, Lake Taihu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(6): 1423-1430.
- [34] Sun X, Wang A L, Yang L Y, *et al.* Spatial distribution of ammonia-oxidizing archaea and bacteria across eight freshwater lakes in sediments from Jiangsu of China [J]. *Journal of Limnology*, 2014, **73**(2): 312-324.
- [35] 汪峰, 曲浩丽, 丁玉芳, 等. 三种农田土壤中氨氧化细菌

- amoA* 基因多样性比较分析[J]. 土壤学报, 2012, **49**(2): 347-353.
- Wang F, Qu H L, Ding Y F, *et al.* Comparative analysis of ammonia monooxygenase (*amoA*) gene diversity in three cultivated soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(2): 347-353.
- [36] 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 等. 布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2691-2700.
- Sun H M, Bai J J, Sun W L, *et al.* Quantitative and qualitative analysis of total bacteria and ammonia-oxidizing bacteria in Buji River in Wet Season[J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2691-2700.
- [37] 李虎, 黄福义, 苏建强, 等. 浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4659-4666.
- Li H, Huang F Y, Su J Q, *et al.* Distribution and diversity of ammonium-oxidizing archaea and ammonium-oxidizing bacteria in surface sediments of Oujiang River[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4659-4666.

环境科学

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)