

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响 陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)

北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)

上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)

杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征 谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)

保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)

春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究 周变红, 张承中, 王格慧 (448)

华东区域高山背景点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 背景值及污染特征 苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)

基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估 田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)

积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征 张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)

靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)

正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究 欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)

干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素 刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)

降尘收集方法对降尘效率的影响 张正德, 董治宝 (499)

海河流域水生生态功能一级二级分区 孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)

长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)

内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究 黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)

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 邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)

自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)

淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制 周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)

高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)

城市雨水径流水质演变过程监测与分析 董雯, 李怀恩, 李家科 (561)

复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果 任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔杰, 王为进 (570)

给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)

1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用 李三华, 张奇亚 (583)

水生植物热解生物油对中肋骨条藻抗氧化酶活性的影响 姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)

TiO₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学 张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)

皮革废水有机污染物生物降解特性研究 王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)

链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究 谢练武, 方继生, 郭亚平 (611)

一种负载型生物载体的制备及性能研究 杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)

基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 培养研究 嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)

温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)

天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH₄ 的影响 姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)

蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征 青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)

基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)

区域地下水污染风险评价方法研究 杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)

地下水有机污染源识别技术体系研究与示范 王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)

祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究 朱凌宇, 潘剑群, 张威 (668)

黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平平 (676)

根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)

长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究 罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)

外源 Cr(III) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究 郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)

某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征 潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)

大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)

天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征 姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)

沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定 吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)

动物饲料中砷、铜和锌调查及分析 姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)

氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究 王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)

2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性 倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)

嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究 厉闾, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)

固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响 唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)

16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性 刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗杰 (767)

氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响 刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)

筒青霉 (*Penicillium simplicissimum*) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征 沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)

石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究 杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)

土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响 王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)

生活垃圾填埋过程含水率变化研究 李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)

动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化 吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)

《环境科学》征订启事(447) 《环境科学》征稿简则(493) 信息(508,588,610,731) 专辑征稿通知(788)

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

邱昭政^{1,2}, 罗专溪¹, 赵艳玲², 颜昌宙^{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. 华侨大学生物工程与技术系, 厦门 361021)

摘要: 溶氧(dissolved oxygen, DO)是影响氨氧化过程的一个重要环境因素. 为探究 DO 对氨氧化过程的影响程度及其作用机制, 本研究对驯化培养河口湿地表层沉积物所得到的氨氧化菌富集培养物进行 DO 处理实验, 利用 PCR-DGGE 分子指纹图谱技术比较不同 DO 条件下氨氧化菌多样性, 确定 DO 对氨氧化速率、氨氧化菌多样性的影响规律. 结果表明, 在饱和及好氧条件下氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)群落多样性指数(Shannon index)达到 2.00 和 2.05, 氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA)为 2.49 和 2.03, 氨氧化速率分别达到 $14.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $13.36 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, NH_4^+ -N 转化率达到 93.8% 和 88.2%. 而在缺氧和厌氧条件下 AOB 群落多样性指数分别为 1.76 和 1.80, AOA 为 1.27 和 2.21, 氨氧化速率仅为 $7.82 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $5.66 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, NH_4^+ -N 转化率为 51.7% 和 37.4%. 相关性分析结果表明, DO 浓度与氨氧化速率呈极显著正相关, 与 AOB 多样性指数亦呈显著正相关; DO 和氨氧化速率与 AOA 群落各指数都无相关关系.

关键词: 溶氧; 氨氧化菌; 群落结构; 氨氧化; PCR-DGGE

中图分类号: X171; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0532-08

Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate

QIU Zhao-zheng^{1,2}, LUO Zhuan-xi¹, ZHAO Yan-ling², YAN Chang-zhou¹

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Department of Bioengineering and Biotechnology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Dissolved oxygen (DO) is one of the important environmental factors influencing the ammonia oxidation process. In order to examine the effects of DO on ammonia oxidation process and its potential mechanisms, surface sediments from Jiulong River Estuarine Wetland were collected and cultured to obtain enrichment cultures. Then the enrichment cultures were inoculated under different levels of DO, and the diversity of ammonia-oxidizing microorganisms was analyzed using PCR-DGGE technique to determine the effect of DO on the ammonia oxidation rate and the ammonia-oxidizing microorganism diversity. Results showed that the Shannon index was 2.00 and 2.05 for ammonia-oxidizing bacteria (AOB) under saturated and aerobic conditions, respectively, and the values were 2.49 (saturated) and 2.03 (aerobic) for ammonia-oxidizing archaea (AOA). However, this index was 1.76 and 1.80 for AOB under hypoxia and anaerobic condition, and 1.27 and 2.21 for AOA. Under saturated and aerobic conditions (higher DO level), the ammonia-oxidizing rates were $14.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ and $13.36 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ and the related conversation rates of NH_4^+ -N were 93.8% and 88.2%, respectively. In comparison, under hypoxia and anaerobic conditions (lower DO level), the ammonia-oxidizing rates were $7.82 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ and $5.66 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ and the related conversation rates of NH_4^+ -N were 51.7% and 37.4%, respectively. The correlation analysis showed that DO concentration was highly significantly positively correlated with the ammonia oxidation rate, and was significantly positively correlated with the AOB diversity index; DO and ammonia oxidation rate had no correlation with indices of AOA community.

Key words: dissolved oxygen; ammonia-oxidizing microorganism; community structure; ammonia oxidation; PCR-DGGE

氨氧化是氨氮(NH_4^+ -N)进入氮循环的起始步骤. 因催化这一反应进行的氨氧化菌生长缓慢, 使得氨氧化过程成为影响硝化速率的一个决定因素^[1], 因此研究氨氧化过程对整个氮循环的影响具有重要意义. 溶氧(dissolved oxygen, DO)是影响氨氧化过程的一个重要环境因素. Yuan 等^[2]研究发现, 当污泥反应器中 DO 浓度从 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 硝化速率(以 NH_4^+ -N/MLSS 计, 下同)从 0.0595

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 降到 $0.0251 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$. Ruan 等^[3]考察, 发现 DO 浓度与玄武湖沉积物硝化细菌数呈极显著正相关性. Nerenberg 等^[4]研究发现, DO 不

收稿日期: 2012-04-08; 修订日期: 2012-06-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q02-04); 国家自然科学基金项目(41001327)

作者简介: 邱昭政(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物分子生态学, E-mail: zqiu@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: czyan@iue.ac.cn

仅影响生物膜的硝化活性而且影响亚硝化氧化菌的群落结构. Park 等^[5]也发现, 恒化器活性污泥中的 AOB 群落结构在不同 DO 浓度下有很大差异, 这些经过驯化的 AOB 对不同 DO 浓度的响应也有差异. 迄今为止, DO 对氨氧化过程及氨氧化菌影响的研究大多集中在废水处理装置等生物反应器上, 较少涉及河口湿地等自然环境.

与生物反应器不同的是, 河口湿地受潮水影响, 呈现周期性淹没和暴露, 使其成为一个典型的沉积物-水-气周期性交互作用的界面, 导致沉积物中的物理、化学和生物性质发生一系列变化^[6,7]. 其中, 上覆水 DO 的变化尤为显著, 一般要经历饱和、好氧、缺氧和厌氧 4 种 DO 状态. 因而 DO 的变化对河口湿地氨氮的转化乃至氮循环具有重要影响. 已有研究表明, 氨氧化菌群在富集培养条件下与自然环境中具有较高的相似性^[8]. 因此, 本研究先采用富集培养的方式, 分析 DO 对氨氧化菌群落及氨氧化速率的影响, 以期明晰 DO 对氨氧化作用的影响机制, 为认识氮素的生物地球化学循环奠定基础.

表 1 氨氧化微生物富集培养基

项目	(NH ₄) ₂ SO ₄	CaCO ₃	K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	NaCl	MgSO ₄ ·7H ₂ O	FeSO ₄ ·7H ₂ O	体积
含量/g	1.000	5.000	0.750	0.300	0.030	0.030	1 000 mL

养物以 1:9 的比例接入新鲜的氨氧化菌富集培养基, 经两次扩大培养得到氨氧化菌富集培养的种子培养物.

1.3 不同溶氧条件下氨氧化菌的培养

在无菌条件下, 将 50 mL 灭菌的氨氧化菌富集培养基分装到 150 mL 三角瓶中, 加入 5 mL 上述种子培养物. 通入经过滤的空气或纯度为 99.99% 的氮气, 调节通气量并利用溶解氧仪校正培养基内 DO 浓度, 使得整个试验系统形成 4 个 DO 浓度: 饱和 (DO > 8.2 mg·L⁻¹, B); 好氧 (5 mg·L⁻¹ < DO < 7 mg·L⁻¹, H); 缺氧 (2 mg·L⁻¹ < DO < 4 mg·L⁻¹, Q); 厌氧 (DO < 1 mg·L⁻¹, Y), 每个 DO 浓度下有 6 个处理条件完全相同的实验组, 每组为 2 个平行. 整个培养试验分 6 次取样 (取样时间为 8 h、2 d、3 d、4 d、7 d、14 d). 经 0.22 μm 膜过滤收集培养基中固形物和滤液并迅速于 -20℃ 下保存, 待试验.

1.4 培养基中 3 种无机氮的测定

采用连续流动注射分析仪 (LACHAT QC8500) 测定培养基中 3 种无机态氮 (NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N) 的浓度. 由于上覆水中 NO₂⁻-N 的含量很少

1 材料与方法

1.1 沉积物采集

表层沉积物样品 (0~1 cm, 约 100 g) 于 2011 年 3 月 9 日自九龙江口红树林 [主要为秋茄林 (*Kandelia candel*)] 湿地保护区 (N24°26'43.5", E117°54'28.4") 采集. 该处沉积物被海水一天两潮汐周期性淹没. 样品取 3 个平行, 分别装于聚乙烯自封袋中, 在冰盒中保存并快速转移到实验室 -20℃ 保存待培养.

1.2 氨氧化菌的富集培养

按照表 1 配制氨氧化菌富集培养基^[9]. 无菌条件下, 将灭菌培养基分装于灭菌的 250 mL 三角瓶中, 每瓶 100 mL. 分别称取 0.1 g 解冻的沉积物转移至三角瓶中, 摇匀使得沉积物分散并悬浮于培养基中. 将三角瓶置于恒温培养箱 26℃ 避光培养, 富集培养期间每隔 2 d 将三角瓶手动摇晃 1 min 左右, 使得下部沉淀重新悬浮于培养基中. 经过 6 次转接约 140 d 培养, 最终得到氨氧化菌富集培养物, 将此培

且易被氧化成 NO₃⁻-N, 因此氨氧化转化的氮以 NO_x 计, 即: NO_x-N = NO₃⁻-N + NO₂⁻-N^[10,11].

1.5 基因组 DNA 的提取

原位采集的沉积物及第 6 次取样所得到的截留在滤膜上富集培养得到的微生物基因组 DNA 利用 Omega 土壤提取试剂盒 (D5625-1) 进行提取, 根据试剂盒所附说明书提取样品总的基因组 DNA, 并利用 Hi Bind DNA 结合柱对所提 DNA 进行纯化并溶于 60 μL Elution buffer, 保存于 -20℃.

1.6 amoA 基因片段的 PCR 扩增

将提取得到的基因组 DNA 作为聚合酶链式反应的模板, 使用德国 eppendorf 公司的基因扩增仪, 利用氨氧化菌特异性基因引物对目的基因扩增. 选择的氨氧化细菌 (AOB) 特异基因 *amoA* 引物对为: amoA1F-GC^[12] (5'-CGCCGCGCGGCGGGCGGGCGG GGGCGGGTTTCTACTGGTGGT-3')/amoA2R-TC^[13] (5'-CCCCTCTGCAAAGCCTTCTTC-3'); 氨氧化古菌 (AOA) 特异基因 *amoA* 的引物对为: arch-amoAF-GC^[14] (5'-CGCCGCGCGGCGGGCGGGCGGGCGGCS TAATGGTCTGGCTTAGACG-3')/arch-amoAR (GCC

GCCATCCATCTGTATGT).

25 μL 反应体系组成如下:20 ~ 50 ng 模板,10 pmol 正反向引物,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ dNTP(终浓度),2.5 μL 10 \times buffer(内含 Mg^{2+} ,终浓度为 1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$),2U *rTaq* 聚合酶(TAKARA)无菌双蒸水补足 25 μL .

其反应条件按照参考文献[15]进行,其中 AOB *amoA* 扩增采用降落 PCR:94 $^{\circ}\text{C}$ 4 min,94 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,61 $^{\circ}\text{C}$ 1 min(每个循环降 0.5 $^{\circ}\text{C}$),72 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,20 个循环,94 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,52 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,72 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,14 个循环,72 $^{\circ}\text{C}$ 10 min,4 $^{\circ}\text{C}$ 保存;AOA *amoA* 扩增条件为:95 $^{\circ}\text{C}$ 5 min,94 $^{\circ}\text{C}$ 45 s,53 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,72 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,35 个循环,72 $^{\circ}\text{C}$ 15 min,4 $^{\circ}\text{C}$ 保存.PCR 产物用 1.2% 琼脂糖凝胶电泳检测.

1.7 DGGE 分析

PCR 产物用通用突变检测仪(Dcode,美国 BIO-RAD)分析,聚丙烯酰胺凝胶电泳(polyacrylamide gel electrophoresis, PAGE)胶浓度为 6%,AOB 变性梯度为 30% ~ 60%,AOA 变性梯度为 20% ~ 50%,DGGE 程序按文献[15]进行.电泳完毕后,将胶浸于含有稀释 10 000 倍的 SYBR Green I 中染色 20 min,将染色后的凝胶用荧光扫描成像系统(DIGE Imager System,美国 GE Healthcare 公司)分析,观察每个样品的电泳条带并拍照.

1.8 DGGE 条带的序列测定及系统发育树的构建

DGGE 凝胶在可见光凝胶透射仪上进行 DNA 条带的切割,切下的 DNA 条带分别放入 50 μL TE 缓冲液中,捣碎并过夜保存,上清液作为 PCR 模板进行扩增.用胶纯化试剂盒纯化 PCR 产物,将此产物与 pGEM[®]-T Easy 载体连接,并转化于大肠杆菌 DH5 α 感受态细胞,菌落 PCR 除去假阳性,每个条带构建的克隆文库中挑取 3 个阳性克隆子送上海英骏生物技术有限公司进行测序.

所测得序列用 DNAssist 2.2 去除载体序列和 GC 夹子后,将有效序列在 National Center for Biotechnology (NCBI)上进行比对,以其中同源性最高的序列确定为参照菌株,相似性 >97% 的序列视为同一序列型(Sequence type),并用 MEGA5 软件采用邻接法(Neighbor-joining method)构建系统发育树.

1.9 数据的统计学分析

利用多样性指数(Shannon-Wiener 指数)又称香农指数(H)、丰富度指数(D)和均匀度(E)等指标被用来比较各个样品的细菌多样性,计算公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$E = \frac{H}{\ln S}$$

式中, P_i 是某个样品中单一条带的强度在该样品的所有条带总强度所占的比例, S 是某个样品中所有条带总数目.

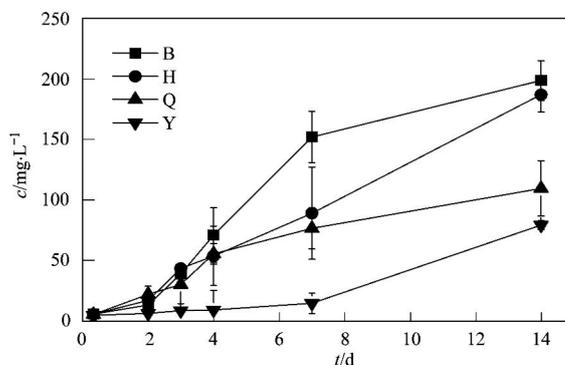
试验结果用算术平均数和标准偏差表示测定结果的精密性($x \pm s$).

2 结果与分析

2.1 不同溶氧条件下氨氮的转化

实验过程中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度随时间的变化如图 1 所示.在前 7 d,饱和(B)、好氧(H)及缺氧(Q)条件下 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度都有明显增加,饱和条件下 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度增长最快($\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度也由 13.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升为 152.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);好氧和缺氧条件 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度变化趋势较为一致,第 7 d 时分别为 89.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 76.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;厌氧条件下 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度变化不明显,第 7 d 时仅为 14.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.第 7 ~ 14 d,饱和条件下 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度增长减缓,第 14 d 时增长为 198.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;好氧条件下 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度仍保持快速增长,第 14 d 时达到 187.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,接近饱和条件下的水平;缺氧条件下 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度增长亦变缓,第 14 d 时达到 109.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;值得关注是,在厌氧条件下,从第 7 d 开始 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度呈较快增长, $\text{NO}_x\text{-N}$ 终浓度达到 79.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

整个培养过程中,饱和条件(B)下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 几乎可被完全转化为 $\text{NO}_x\text{-N}$,有 93.8% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为



B. 饱和; H. 好氧; Q. 缺氧; Y. 厌氧

图 1 不同 DO 条件下培养基中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度的变化

Fig. 1 Changes of $\text{NO}_x\text{-N}$ concentration in medium under different DO conditions

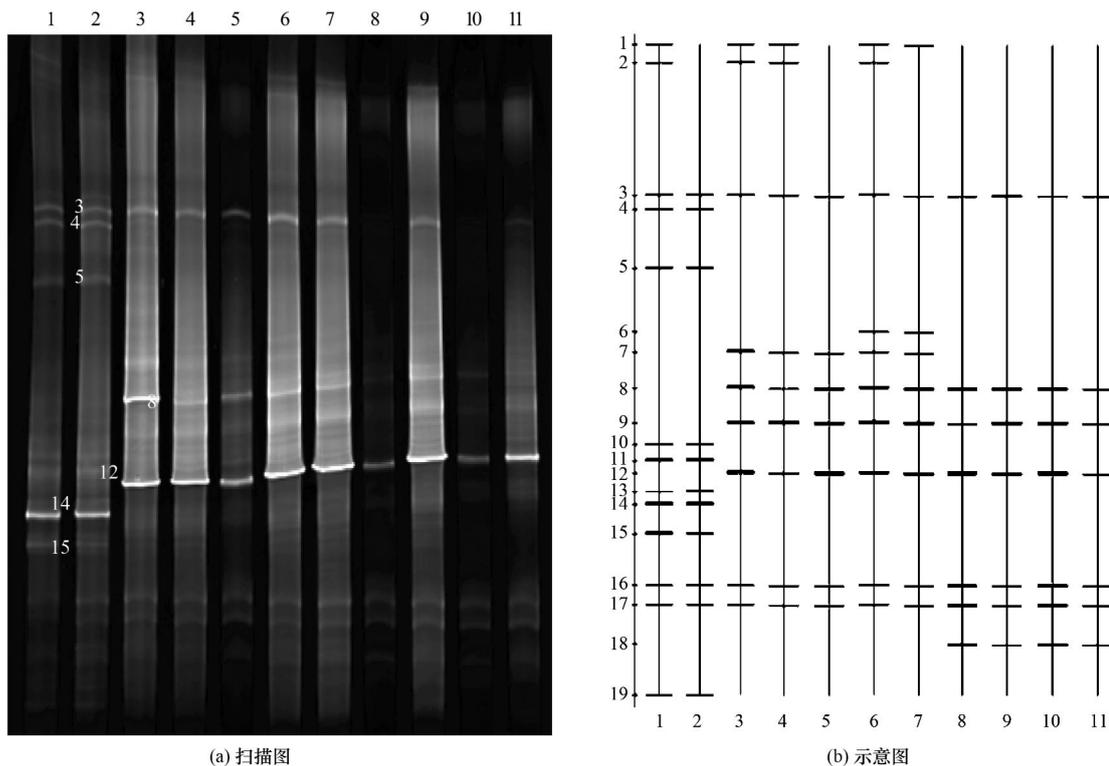
$\text{NO}_x\text{-N}$, 平均氨氧化速率为 $14.2 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$; 好养条件(H)下, 有 88.2% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_x\text{-N}$, 平均氨氧化速率为 $13.4 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$; 而缺氧条件(Q)和厌氧条件(Y)下, 只有 51.7% 和 37.4% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_x\text{-N}$, 而氨氧化速率分别为 $7.8 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $5.7 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$.

2.2 不同溶氧条件下氨氧化菌的群落结构特征

2.2.1 DGGE 分离 *amoA* 基因片段 PCR 产物

电泳观察所提取各样品的总 DNA, 均有不同程

度的拖带, 但从电泳图谱来看, 各站点样品总 DNA 大小约为 23 kb, 并且形成较亮的主带. 所提 DNA 浓度在 $10.5 \sim 45.1 \text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ 之间. 各样品均能扩增出 *amoA* 基因, 大小分别为 491 bp (AOB) 或 635 bp (AOA). 应用 DGGE 技术分离 *amoA* 基因片段 PCR 产物, 可以看到每个样品的 PCR 产物被分离为若干条带, 但不同样品的 *amoA* 片段 PCR 产物出现的带型有一定差别(图 2、图 3). 不同条带代表该样品中存在不同氨氧化菌, 共分离出 19 个 AOB 条带和 21



数字所标条带为挖取回收条带: 1. 原位沉积物-1; 2. 原位沉积物-2; 3. 富集培养物-1; 4. 饱和处理-1; 5. 饱和处理-2; 6. 好氧处理-1; 7. 好氧处理-2; 8. 缺氧处理-1; 9. 缺氧处理-2; 10. 厌氧处理-1; 11. 厌氧处理-2

图 2 原位沉积物、富集培养物及溶氧处理后氨氧化细菌 *amoA* 基因变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 分离图谱

Fig. 2 DGGE profile of AOB *amoA* gene of samples from *in situ* sediment, enrichment cultures and DO treatments

个 AOA 条带.

2.2.2 氨氧化菌群落的相似性

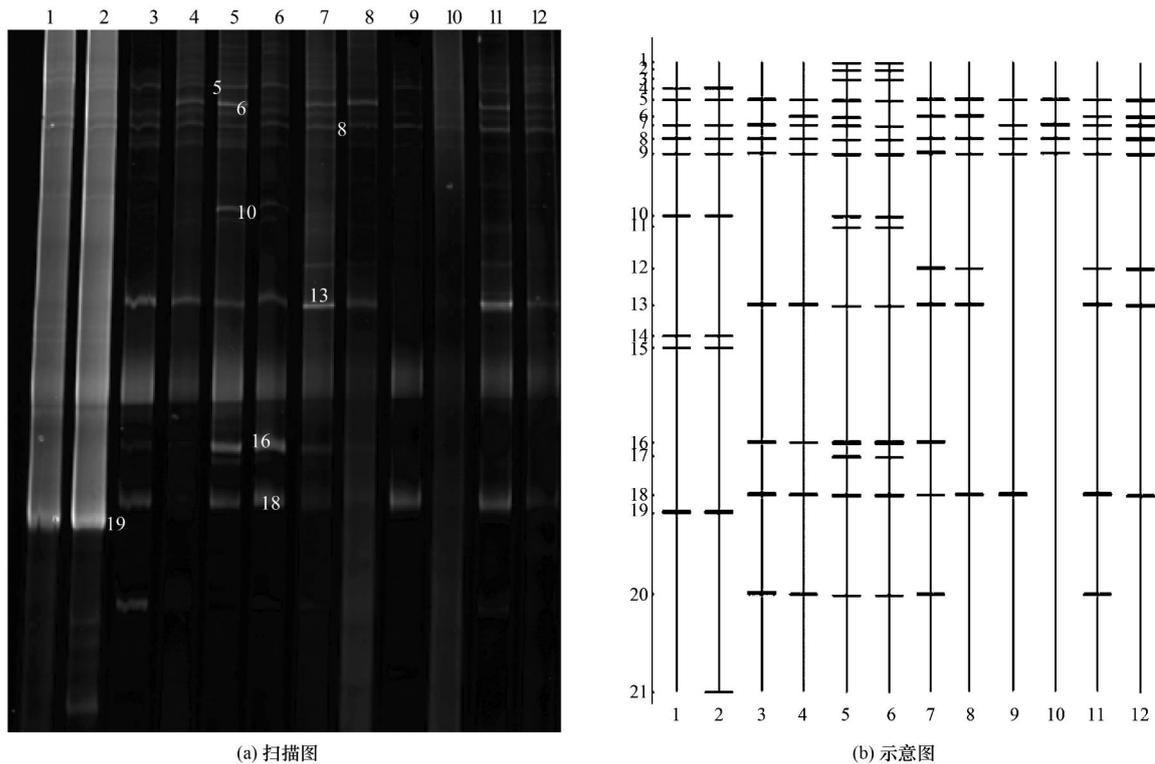
在 DGGE 指纹图谱中, 不同样品中条带的位置和条带数, 可以反映样品之间氨氧化菌群落相似性, 对样品间 DGGE 图谱进行聚类分析, 结果如图 4、图 5 所示. 图 4 为各样品 AOB 聚类分析结果, 缺氧和厌氧处理样品聚为一类, 而饱和及好氧处理样品大致聚为一类. 图 5 为 AOA 各样品聚类分析结果, 饱和处理的样品与其他 DO 处理样品相似性较低聚类位置较远, 其余样品相似性较高而聚为一类.

2.2.3 氨氧化菌多样性

采用凝胶图像分析系统(quantity one)对 DGGE

凝胶电泳图(图 2 和图 3)进行分析. 结果表明, 各样品间 DGGE 图谱的条带位置和数目均有一定差异, 本研究根据电泳图谱中条带的数目和亮度信息, 对各样品中的氨氧化菌的多样性指数(H)、丰富度指数(D)和均匀度(E)等指标进行了综合分析, 结果如表 2 所示.

各个样品氨氧化菌多样性指数(H)、丰富度指数(D)和均匀度(E)均有差异. AOB 多样性指数(Shannon index)和丰富度指数(Simpson index)最高的都是原位沉积物, 分别为 2.418 ± 0.012 和 0.902 ± 0.003 , 多样性指数和丰富度指数最低的是缺氧处理, 分别为 1.756 ± 0.01 和 0.801 ± 0.003 ; 而各个



数字所标条带为挖取回收条带;1. 原位沉积物-1; 2. 原位沉积物-2; 3. 富集培养物-1; 4. 富集培养物-2; 5. 饱和处理-1; 6. 饱和处理-2; 7. 好氧处理-1; 8. 好氧处理-2; 9. 缺氧处理-1; 10. 缺氧处理-2; 11. 厌氧处理-1; 12. 厌氧处理-2

图3 原位沉积物、富集培养物及溶氧处理后氨氧化古菌 *amoA* 基因变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 分离图谱¹⁾

Fig. 3 DGGE profile of AOA *amoA* gene of samples from *in situ* sediment, enrichment cultures and DO treatments

表2 原位沉积物、富集培养物及 DO 处理后 DGGE 条带多样性指数 (*H*)、Simpson (*D*) 指数及均匀度 (*E*)¹⁾

Table 2 Shannon-wiener Index (*H*), Richness (*D*) and evenness (*E*) of each sample estimated from *in situ* sediments, enrichment cultures and DO treatments by DGGE bands patterns

处理	AOB			AOA		
	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>in situ</i>	2.418 ± 0.012a	0.902 ± 0.003a	0.958 ± 0.017a	2.043 ± 0.041bc	0.834 ± 0.023a	0.909 ± 0.048a
Enrichment	2.002	0.846	0.911	1.979 ± 0.015c	0.840 ± 0.016a	0.926 ± 0.043a
Saturated	2.000 ± 0.042b	0.849 ± 0.003b	0.935 ± 0.017a	2.489 ± 0.089a	0.901 ± 0.014a	0.931 ± 0.016a
Aerobic	2.046 ± 0.050b	0.850 ± 0.004b	0.909 ± 0.008a	2.033 ± 0.070bc	0.856 ± 0.008a	0.951 ± 0.004a
Hypoxia	1.756 ± 0.018c	0.801 ± 0.003c	0.902 ± 0.009a	1.273 ± 0.112d	0.658 ± 0.104b	0.858 ± 0.165a
Anaerobic	1.799 ± 0.083c	0.818 ± 0.024c	0.924 ± 0.043a	2.213 ± 0.090b	0.874 ± 0.029a	0.942 ± 0.065a

1) $n=2$, 同列数据中相同字母表示在 0.05 水平下不具有显著差异性

样品之间的均匀度 (evenness) 没有显著性差异 ($P > 0.05$).

AOA 多样性指数和丰富度最高的是饱和氧处理, 分别为 2.489 ± 0.089 和 0.901 ± 0.014 , 多样性指数和丰富度指数最低的亦是缺氧处理, 分别为 1.273 ± 0.112 和 0.658 ± 0.104 ; 而各个样品之间的均匀度亦无显著性差异 ($P > 0.05$).

2.2.4 优势条带序列的系统发育分析

根据各样品的 PCR-DGGE 指纹图谱, 对优势条带进行切胶回收, 共得到 7 个 AOB 条带, 如图 6 所示, 对这 7 条带进行序列测定, 同源性最高的序列为

亚硝化螺菌属 (*Nitrosospira*) 及亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*). 并且在现有的数据库中都能找到与其具有较高相似性的序列, 这些序列大都分布于自然条件下的沉积物和人工生物反应器中. 共得到 8 个 AOA 条带 (图 7), 均属于不可培养的泉古菌, 其中 Band16 和 Band18 与数据库中的现有序列相似性较低, 可能是九龙江口沉积物中的特有菌种.

2.3 溶氧与氨氧化速率及微生物群落结构的相关性

表 3 为 DO 浓度与氨氧化速率、氨氧化菌群落结构的相关关系. 可见, DO 与氨氧化速率呈极显著正相关, 与 AOB 多样性指数 (Shannon index) 亦呈显

表 3 DO 与氨氧化速率、氨氧化菌群落结构的相关关系¹⁾

Table 3 Correlation of DO to ammonia-oxidizing rate and ammonia-oxidizing microorganism community structure

项目	氨氧化速率	AOB			AOA		
		H	D	E	H	D	E
DO	0.928 **	0.730 *	0.679	0.275	0.448	0.341	0.090
氨氧化速率	—	0.865 **	0.787 *	0.194	0.427	0.411	0.238

1) Pearson 相关分析采用双尾检验; * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关

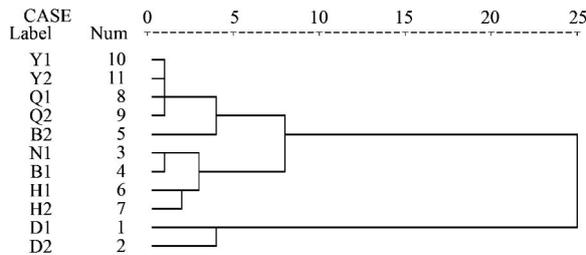


图 4 原位沉积物、富集培养物及溶氧处理后氨氧化细菌 (AOB) 群落结构相似性聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of AOB community structure similarity in different samples from *in situ* sediment, enrichment cultures and DO treatments

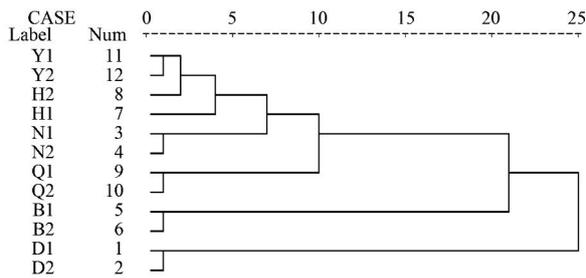


图 5 原位沉积物、富集培养物及溶氧处理后氨氧化古菌 (AOA) 群落相似性聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of AOA community structure similarity in different samples from *in situ* sediment, enrichment cultures and DO treatments

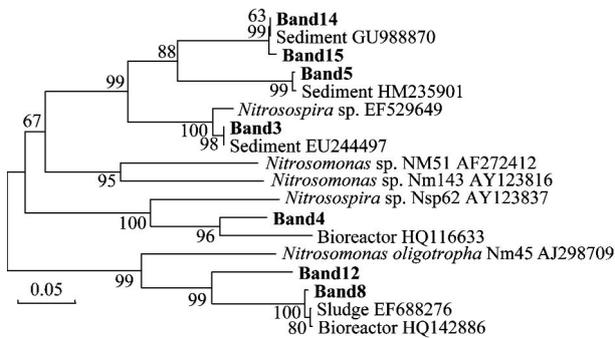


图 6 氨氧化细菌系统发育树

Fig. 6 Phylogenetic tree of sequences from AOB DGGE bands

著正相关, 而与 AOA 群落各指数没有明显相关关系. 氨氧化速率与 AOB 多样性指数呈极显著正相关, 与 AOB 丰富度指数 (Simpson index) 呈显著正相

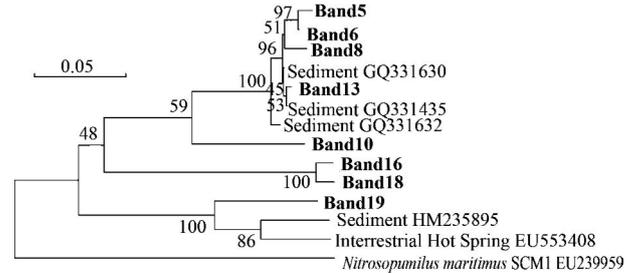


图 7 氨氧化古菌系统发育树

Fig. 7 Phylogenetic tree of sequences from AOA DGGE bands

关, 而与 AOA 群落各指数没有明显相关关系.

3 讨论

溶氧对河口湿地沉积物的氨氧化至关重要. 本研究表明 DO 显著影响 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的氧化. 高 DO 条件 (B、H) 下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可被快速氧化且最终转化率较高 (>88.2%); 低 DO 条件 (Q、Y) $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化速率明显减慢, 且最终转化率较低 (<51.7%), 这与 Yuan 等^[2] 的研究了结论较为类似. 他们发现当 DO 从 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 硝化速率下降 58%, 而硝化所用时间增加了近一倍. 而在厌氧处理下, 前 7 d $\text{NO}_x - \text{N}$ 浓度变化不大, 直到第 7 d 其 $\text{NO}_x - \text{N}$ 浓度仅为 $14.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从第 7 d 开始氨氧化作用增强, 体系中 $\text{NO}_x - \text{N}$ 浓度显著增加, 可能是其中的氨氧化菌群慢慢适应了这种低 DO 环境, 其氨氧化活性开始复苏从而使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 大量转化为 $\text{NO}_x - \text{N}$ ^[16].

从 DGGE 指纹图谱可以看出, 对于 AOB, 每个样品可分离到 7~13 个不等的条带, 低 DO 条件 (Q、Y) 下条带数目较少, 而高 DO 条件下条带较多; 对于 AOA, 每个样品可分离到 4~15 个不等的条带, 条带数目最少的出现在缺氧条件 (Q), 条带数目最多的出现在饱和条件 (B), 表明高 DO 更利于 AOB 群落多样性. Bellucci 等^[17] 研究不同供氧量的硝化反应器的运行规律时, 发现高 DO 时 AOB 条带明显多于低 DO 时的条带. 不同的条带代表不同氨氧化菌种的基因片段, 表明每个样品都存在着丰富的微生物种类. 电泳条带的多少, 可以直观地反映样品中氨氧化菌群落的多样性, 而多样性指数是研究群落

物种数及其个体数的分布均匀度的综合指标^[18]. 本研究根据 DGGE 电泳图谱中每条带的信息, 对不同 DO 处理样品中的氨氧化菌多样性指数(H)、丰富度指数(D)和均匀度(E)等指标进行了综合分析. 高 DO 条件(B、H)下 AOB 群落 H 和 D 值都明显高于低 DO 条件(Q、Y); 而对于 AOA, H 和 D 值最高的出现在饱和条件(B), 最低的出现在缺氧条件(Q). 总体上, 在高 DO 条件下氨氧化菌群落多样性较高, 而在低 DO 条件下群落多样性较低, 究其原因是在高的 DO 浓度为氨氧化菌提供了更多的电子受体(O_2), 有利于其生长和繁殖从而提高群落多样性^[19].

低 DO(Q、Y)处理的 AOB 群落结构相似性较高, 聚类位置较近, 其物种多样性指数及丰富度指数也较为接近; 其与高 DO 处理(B、H)的群落结构相似性较低, 聚类位置较远, 而物种多样性也是前者显著低于后者. 而对于 AOA, DO 处理同样影响其群落结构, 饱和(B)处理与其他 3 个 DO 处理的聚类位置较远且其多样性指数和丰富度指数最高. 究其原因是, 不同的氨氧化菌对特定浓度的 DO 存在偏好型而迅速生长, 而在其它 DO 浓度下生长受到抑制^[4].

通过对各样品 DGGE 的优势条带进行测序, 其中所测得的 AOB *amoA* 基因片段的序列所对应的同源性最高的微生物分别属于 β -Proteobacteria 中的 *Nitrospira* 和 *Nitrosomonas*, 它们均来自于河口海岸沉积物或生物反应器. 这些氨氧化细菌大部分为未培养微生物; 而与 AOA *amoA* 基因片段同源性最高的微生物均是未培养微生物, 其在原位生态环境中生态功能还尚不清楚.

本研究中 DO 与氨氧化速率呈极显著正相关, 表明 DO 是影响氨氧化微生物活性的重要因素, 这与前人的研究结论相一致^[2,3]. 溶氧浓度与 AOB 多样性(Shannon index)呈显著正相关而与 AOA 群落结构各指数都没有相关性, 说明 AOB 对 DO 浓度变化的响应较为敏感^[20,21]. Yao 等^[22]研究发现酸性土壤硝化潜势同其 AOA 的群落丰富度存在显著相关, 由此他们认为这些土壤中的硝化反应主要由 AOA 驱动进行. Bernhard 等^[23]在研究河口沉积物盐度梯度中 AOA、AOB 与潜在硝化速率的相关关系时, 却发现潜在硝化速率与 AOB 存在显著相关, 而与 AOA 无显著相关, 由此他们认为 AOB 是氨氧化的主要推动者. 本研究发现氨氧化速率与 AOB 多样性指数及丰富度指数呈显著性正相关, 而与 AOA 群落

结构各指数无显著相关关系, 由此类似推测氨氧化过程主要作用菌群可能是 AOB 而非 AOA^[24]. 但由于所调查的土壤和试验方法具有差异性, 目前关于这两种氨氧化菌群对氨氧化作用的相对贡献尚无定论^[25], 仍需深入研究和探索.

4 结论

(1) 氨氧化速率与 DO 浓度呈极显著正相关, 其中饱和条件下最高, 厌氧条件下最低. 溶氧显著影响富集培养体系中 NH_4^+ 的转化, 高 DO 条件更有利于氨氮转化为 NO_x-N .

(2) 溶氧浓度与 AOB 多样性(Shannon index)呈显著正相关而与 AOA 群落结构各指数均无显著相关性, 表明 AOB 对 DO 浓度变化的响应更为敏感.

(3) 氨氧化速率与 AOB 多样性指数呈极显著正相关, 与 AOB 丰富度指数(Simpson index)呈显著正相关, 而与 AOA 群落各指数均无明显相关关系.

参考文献:

- [1] Horz H P, Barbrook A, Field C B, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria respond to multifactorial global change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, **101**(42): 15136-15141.
- [2] Yuan X J, Gao D W. Effect of dissolved oxygen on nitrogen removal and process control in aerobic granular sludge reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **178**(1-3): 1041-1045.
- [3] Ruan A D, He R, Xu S Y, *et al.* Effect of dissolved oxygen on nitrogen purification of microbial ecosystem in sediments [J]. Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2009, **44**(4): 397-405.
- [4] Nerenberg R, Downing L S. Effect of oxygen gradients on the activity and microbial community structure of a nitrifying, membrane-aerated biofilm [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, **101**(6): 1193-1204.
- [5] Park H D, Noguera D R. Evaluating the effect of dissolved oxygen on ammonia-oxidizing bacterial communities in activated sludge[J]. Water Research, 2004, **38**(14-15): 3275-3286.
- [6] Balls P W, Brockie N, Dobson J, *et al.* Dissolved oxygen and nitrification in the upper Forth estuary during summer (1982-92): Patterns and trends [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1996, **42**(1): 117-134.
- [7] Conley D J, Stockenberg A, Carman R, *et al.* Sediment-water nutrient fluxes in the Gulf of Finland, Baltic Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, **45**(5): 591-598.
- [8] 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.
- [9] Bollmann A, French E, Laanbroek H J. Isolation, cultivation, and characterization of ammonia-oxidizing bacteria and archaea adapted to low ammonium concentrations [J]. *Methods in Enzymology*, 2011, **486**: 55-88.
- [10] 徐继荣, 王友绍, 殷建平, 等. 珠江口入海河段 DIN 形态转化与硝化和反硝化作用[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(5): 686-692.
- [11] Pauer J J, Auer M T. Nitrification in the water column and sediment of a hypereutrophic lake and adjoining river system[J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1247-1254.
- [12] Rotthauwe J H, Witzel K P, Liesack W. The ammonia monoxygenase 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.
- [13] Nicolaisen M H, Ramsing N B. Denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) approaches to study the diversity of ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2002, **50**(2): 189-203.
- [14] 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.
- [15] Zhang Q F, Peng J J, Chen Q, *et al.* Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on abundance and composition of ammonia oxidizers in estuarine sediment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(6): 1020-1031.
- [16] Geets J, Boon N, Verstraete W. Strategies of aerobic ammonia-oxidizing bacteria for coping with nutrient and oxygen fluctuations [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, **58**(1): 1-13.
- [17] Bellucci M, Ofiteru I D, Graham D W, *et al.* Low-dissolved-oxygen nitrifying systems exploit ammonia-oxidizing bacteria with unusually high yields [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(21): 7787-7796.
- [18] Gafan G P, Lucas V S, Roberts G J, *et al.* Statistical analyses of complex denaturing gradient gel electrophoresis profiles [J]. *Journal of Clinical Microbiology*, 2005, **43**(8): 3971-3978.
- [19] Molina V, Belmar L, Ulloa O. High diversity of ammonia-oxidizing archaea in permanent and seasonal oxygen-deficient waters of the eastern South Pacific [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(9): 2450-2465.
- [20] Shen J P, Zhang L M, Zhu Y Q, *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.
- [21] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria: a model for molecular microbial ecology [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2001, **55**(1): 485-529.
- [22] Yao H, Gao Y, 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.
- [23] Bernhard A E, Landry Z C, Blevins A, *et al.* Abundance of ammonia-oxidizing *Archaea* and *Bacteria* along an estuarine salinity gradient in relation to potential nitrification rates [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(4): 1285-1289.
- [24] Herrmann M, Scheibe A, Avrahami S, *et al.* Ammonium availability affects the ratio of ammonia-oxidizing bacteria to ammonia-oxidizing archaea in simulated creek ecosystems [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(5): 1896-1899.
- [25] Nicol G W, Schleper C. Ammonia-oxidising crenarchaeota: important players in the nitrogen cycle? [J]. *Trends in Microbiology*, 2006, **14**(5): 207-212.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-chen, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yue-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, <i>et al.</i>	(810)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊