

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征

郑艳玲¹, 侯立军^{2*}, 陆敏¹, 谢冰¹, 刘敏¹, 李勇¹, 赵慧³

(1. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 3. 上海植物园科研中心, 上海 200231)

摘要: 为探索长江口崇明东滩表层沉积物中是否存在厌氧氨氧化菌以及厌氧氨氧化菌的群落结构与空间分布特征, 以崇明东滩高、中、低潮滩夏季表层沉积物中总 DNA 为模板, PCR 扩增沉积物样品中厌氧氨氧化菌特异性 16S rDNA 片段, 通过克隆、测序, 构建相应基因文库, 将文库中有效克隆序列分别提交到 GenBank 中进行相似序列搜索, 并利用 MEGA5 绘制系统发育树. 分析结果发现, 克隆序列 CM-L-7 和 CM-L-18 与已发现厌氧氨氧化菌 *Candidatus "Scalindua sp."* 同源性达 98%, CM-L-13 与 *Candidatus "Scalindua wagneri"* 同源性达 94%, CM-M-6 与 *Candidatus "Kuenenia sp."* 同源性达 94%, CM-M-22 与 Anaerobic ammonium-oxidizing planctomycete JMK-1 的同源性达 95%, CM-H-15 与 *Candidatus "Kuenenia stuttgartiensis"* 的同源性达 94%. 表明, 崇明东滩高、中、低潮滩表层沉积物中均存在厌氧氨氧化菌, 但所属菌属不同, 低潮滩以 *Candidatus "Scalindua"* 为主, 中、高潮滩以 *Candidatus "Kuenenia"* 为主. 相比之下, 中潮滩厌氧氨氧化菌群落结构较为复杂. 部分克隆序列与已发现厌氧氨氧化菌存在较大进化距离, 表明崇明东滩可能还存在其他具有潜在厌氧氨氧化功能的细菌.

关键词: 厌氧氨氧化; 崇明东滩; 16S rDNA; PCR; 克隆; 长江口

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0992-08

Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer

ZHENG Yan-ling¹, HOU Li-jun², LU Min¹, XIE Bing¹, LIU Min¹, LI Yong¹, ZHAO Hui³

(1. College of Resource and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 3. Research Center, Shanghai Botanical Garden, Shanghai 200231, China)

Abstract: The objectives of this study were to identify whether there were Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) bacteria in the surface sediments of Chongming eastern tidal flat in the Yangtze estuary and the feature of their community structure and spatial distribution. Based on the total DNA extracted from the surface sediments of Chongming eastern tidal flat, ANAMMOX-specific 16S rDNA fragments were amplified. PCR products were cloned and sequenced, and an ANAMMOX-specific 16S rDNA gene library was established. Phylogenetic tree was constructed using MEGA5 after the sequences were checked in the GenBank database. Phylogenetic analysis indicated that the clone sequences CM-L-7 and CM-L-18 had 98% identities with ANAMMOX bacteria *Candidatus "Scalindua sp."*. CM-L-13 had 94% identities with *Candidatus "Scalindua wagneri"*. CM-M-6 had 94% identities with *Candidatus "Kuenenia sp."*. CM-M-22 had 95% identities with Anaerobic ammonium-oxidizing planctomycete JMK-1. CM-H-15 had 94% identities with *Candidatus "Kuenenia stuttgartiensis"*. The results indicated that there were ANAMMOX bacteria in the surface sediments of Chongming eastern tidal flat, but the ANAMMOX species were diverse in different tidal flats; *Candidatus "Scalindua"* was the predominant group in the low tidal flat, while *Candidatus "Kuenenia"* was the major population in the high tidal flat and the middle tidal flat. In comparison with the high and low tidal flats, the community structure of ANAMMOX bacteria in the middle tidal flat was the most complicated. A portion of the sequences related to uncultivated bacteria outside the known ANAMMOX cluster, probably indicated that there were potential ANAMMOX bacteria in the sediments of Chongming eastern tidal flat.

Key words: Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX); Chongming Dongtan; 16S rDNA; PCR; clone; Yangtze Estuary

收稿日期: 2011-04-18; 修订日期: 2011-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41130525, 41071135, 40971268); 中央高校基本科研业务费专项基金项目; 海洋公益性行业科研专项经费项目(200905007); 河口海岸学国家重点实验室科研业务经费项目(2010RCDW07, 2010RCDW01); 博士点基金项目(20090076110020)

作者简介: 郑艳玲(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: yanling0325@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ljhou@sklec.ecnu.edu.cn

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 是指在厌氧条件下, 以 NO_2^- 作为电子受体, 将 NH_4^+ 氧化成 N_2 的过程^[1~3]. 20 世纪 90 年代, 荷兰 Delft 技术大学的 Mulder 等^[4] 在处理工业废水时发现并首次命名了厌氧氨氧化. 此后, 厌氧氨氧化研究在国内外相继展开, 厌氧氨氧化活动在湖泊、河口、近海沉积物以及红树林沉积物、深海热液区、极地地区沉积物等都已检测到^[5~16]. 因此, 厌氧氨氧化在氮素生物地球化学循环中起着举足轻重的作用^[1]. 作为厌氧氨氧化的推动者——厌氧氨氧化菌属于微生物分类中的浮霉状菌 (*Planctomycetes*)^[17], 目前已发现的厌氧氨氧化菌有 5 个属, 包括 *Candidatus "Brocadia"*, *Candidatus "Kuenenia"*, *Candidatus "Scalindua"*, *Candidatus "Anammoxoglobus"* 以及 *Candidatus "Jettenia"*^[18]. 相比较而言, 国内厌氧氨氧化的研究主要集中在通过对污泥中厌氧氨氧化菌的实验室富集培养, 探寻其反应机制, 并试图开发新型生物脱氮工艺, 但较少将分子生物学技术应用于 ANAMMOX 菌的研究, 特别是自然环境中 ANAMMOX 菌的群落状况. 崇明东滩作为长江口规模最大、发育最完善的河口型潮汐滩涂湿地, 不断接受长江径流携带的泥沙、营养盐以及各种污染物, 并被海水周期性浸没, 沉积环境极为

复杂, 探寻其沉积物中是否存在厌氧氨氧化菌对于深入了解崇明东滩氮循环过程具有重要的借鉴意义. 本研究采用多聚酶链式反应 (PCR)、DNA 克隆及 DNA 测序等分子生物学技术对崇明东滩夏季沉积物中厌氧氨氧化菌进行了检测, 证明崇明东滩沉积物中存在厌氧氨氧化菌, 并对其群落结构和空间分布进行了初步分析.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究中分析所用的沉积物样品是于 2010 年 8 月分别在长江口崇明东滩高潮滩 ($121^\circ56'37''\text{E}$, $31^\circ28'3''\text{N}$)、中潮滩 ($121^\circ57'1''\text{E}$, $31^\circ28'15''\text{N}$) 和低潮滩 ($121^\circ57'28''\text{E}$, $31^\circ28'29''\text{N}$) 采集 (图 1), 所采样品为沉积物表层 0~5 cm, 各潮滩位置分别进行 3 个重复采样即每个样点距离 2 m 左右随机取点, 样品混匀后装入灭菌的样品管中, -20°C 保存, 直到用于实验室分析. 高、中、低潮滩样品分别标记为 CM-H、CM-M、CM-L. 高潮滩沉积物以细粉砂质和黏土为主, 中潮滩以中粉砂为主, 低潮滩沉积物相对较粗, 多为粗粉砂, 局部为细砂. 沉积物平均盐度为 0.1%~0.3%, pH 值 7.8~8.0^[19], 有机质含量从低潮滩到高潮滩有逐渐增加的趋势^[20].

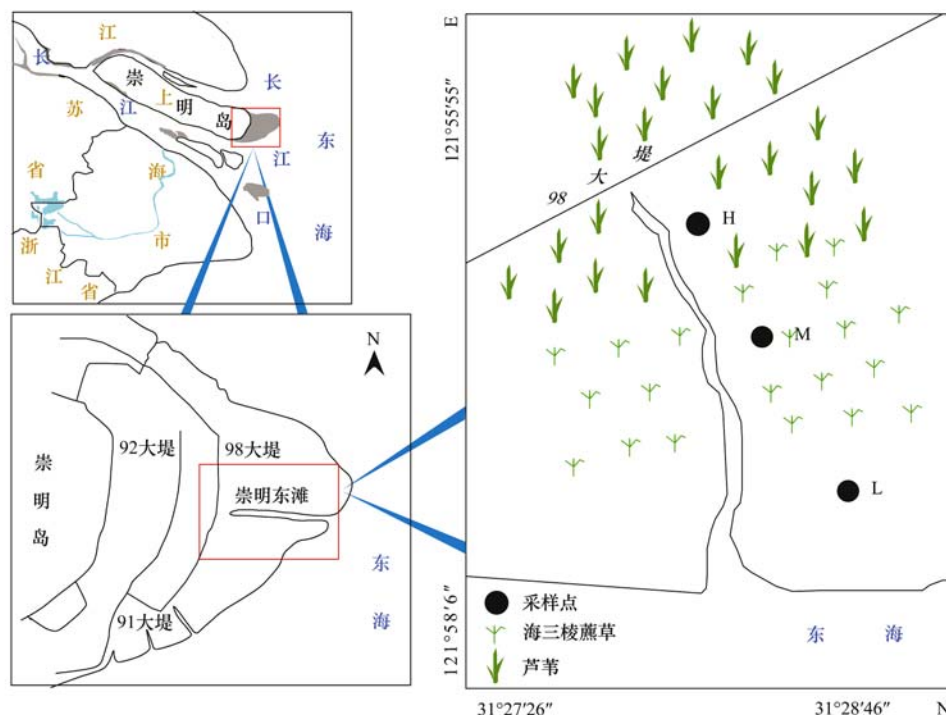


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of sampling sites

1.2 沉积物总 DNA 提取

DNA 提取实验前,先将样品置于 4℃ 下过夜解冻.采用 MOBIO 公司生产的 Ultraclean soil DNA Isolation Kits 提取沉积物样品总 DNA,具体步骤参照产品说明书.本实验称取 1 g 沉积物样品(含水分)进行总 DNA 的提取,提取的总 DNA 通过 0.7% 的琼脂糖凝胶电泳进行检测.为减小误差,实验中每个样点做 3 个平行,分别提取总 DNA,经检测提取成功后将之混匀.样品总 DNA 于 -20℃ 冰箱保存.

1.3 PCR 扩增 16S rDNA

本研究采用厌氧氨氧化特异性引物 PLA46rc (5'-GGATTAGGCATGCAAGTC-3')/Amx820R (5'-AAAACCCCTCTACTTAGTGCCC-3')^[2,21] 对沉积物样品进行 PCR 扩增,PCR 反应在美国 Bio-Rad 生产的 MJ Mini 扩增仪上进行,PCR 反应体系为 50 μL,PCR 原液组成为:dNTP (10 mmol·L⁻¹) 1 μL, 10 × PCR buffer 5 μL (不含 MgCl₂), MgCl₂ (25 mmol·L⁻¹) 3 μL,上游引物 PLA46rc (10 μmol·L⁻¹) 2 μL,下游引物 Amx820R (10 μmol·L⁻¹) 2 μL,模板 DNA 2 μL, *Taq* DNA Polymerase (5 U·μL⁻¹) 1 μL,用双蒸水补至 50 μL.反应程序:95℃ 预变性 4 min, 94℃ 变性 30 s, 56℃ 退火 45 s, 72℃ 延伸 1 min, 25 个循环, 72℃ 下延伸 5 min^[22]. PCR 扩增结果通过 1% 的琼脂糖凝胶电泳进行检测.

1.4 基因文库的构建与序列分析

PCR 扩增产物经制胶纯化后,构建 16S rDNA 克隆文库,从 3 个文库中分别随机挑取 25 个白斑克隆进行测序(克隆和测序工作由上海生工生物工程有限公司完成).所得序列首先用 DNASTAR 软件包中 EditSeq 功能模块编辑处理,并去除两端载体序列,然后进行嵌合体的检测与去除 (<http://www.bioinformatics-toolkit.org/Help/Topics/chimera.html>).剩余有效序列分别提交到 GenBank 中利用 Blast (www.ncbi.nlm.nih.gov/BLAST/) 进行相似序列搜索,将所得序列和原序列用 ClustalX^[23] 进行序列比对分析,然后用 MEGA 软件(版本 5.03)构建系统发育树.采用的方法为 Neighbor-Joining,进化距离为 Kimura2 距离,Bootstrap 值设定为 1 000.采用 DOTUR 软件包将相似性 > 97% 的序列归为同一个操作分类单元(operational taxonomy unit, OTU)^[24],计算文库的覆盖率(*C*)^[25],覆盖率公式为:

$$C = [1 - n/N] \times 100\%$$

式中,*C* 为覆盖率,*N* 为该文库中的有效克隆总数,*n* 为 OTU 数.

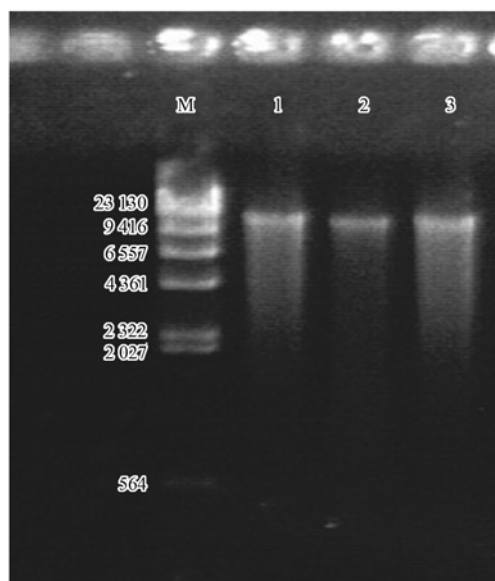
1.5 数据库登录号

通过 BankIt (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/WebSub/?tool=genbank>) 将本研究中获得有效克隆序列提交到 GenBank 数据库中.克隆序列 CM-L-1 (CM-L-25)、CM-L-2、CM-L-3、CM-L-4、CM-L-6、CM-L-7 (CM-L-18)、CM-L-8 (CM-H-4、CM-H-13)、CM-L-10、CM-L-11 (CM-L-21)、CM-L-12、CM-L-13、CM-L-14、CM-L-15、CM-L-16、CM-L-19、CM-L-20、CM-L-22、CM-L-23、CM-L-26、CM-M-1、CM-M-2、CM-M-3、CM-M-4、CM-M-5 (CM-M-16、CM-M-17、CM-M-18)、CM-M-6 (CM-H-15)、CM-M-7、CM-M-8 (CM-M-10)、CM-M-9、CM-M-11、CM-M-12、CM-M-13、CM-M-14、CM-M-15、CM-M-19 (CM-M-20)、CM-M-21、CM-M-22、CM-H-1 (CM-H-9、CM-H-11)、CM-H-2、CM-H-3、CM-H-5、CM-H-6、CM-H-7、CM-H-8 (CM-H-12)、CM-H-10、CM-H-14 的登录号依次为 JN010121 ~ JN010165.括号中为与前面序列相同的序列.

2 结果与分析

2.1 总 DNA 提取及 PCR 扩增

由于沉积物样品中化学成分复杂,能否成功提取目标 DNA 片段以及提取效率的高低直接影响后续 PCR 及克隆分析.从 3 个沉积物样品中提取的总 DNA 通过 0.7% 的琼脂糖凝胶电泳检验,均得到明亮的条带,片段长度约 21 kb 左右,表明已获得较长片段的微生物总 DNA 基因组,另外,从图 2 中也能

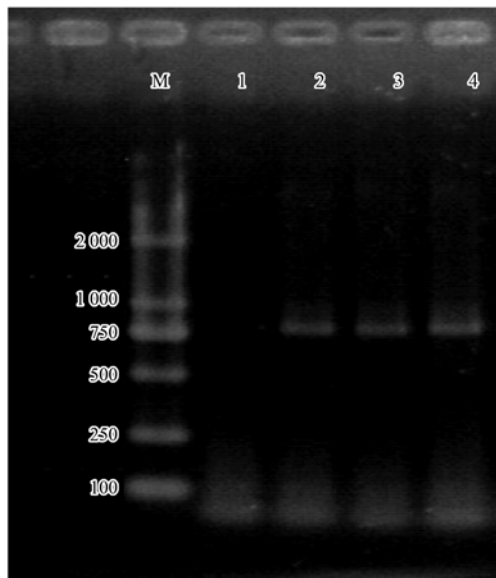


M: λ -Hind III digest DNA marker; 1: CM-H; 2: CM-M; 3: CM-L; 总 DNA 长度约为 21 kb

图 2 总 DNA 的琼脂糖凝胶电泳图谱

Fig. 2 Total DNA extracted from sediment samples

看出目标条带的拖带和弥散现象并不明显,对后面的 PCR 扩增影响不大. 分别取 2 μ L 提取的崇明东滩 CM-H、CM-M、CM-L 表层沉积物总 DNA 作为模板,进行 PCR 扩增,均得到约 800 bp 的单一目的片段(图 3),扩增效果较好.



M: Marker DL 2000; 1:空白对照; 2: CM-H; 3: CM-M; 4: CM-L; 目标片段长度约为 800 bp

图 3 PCR 扩增厌氧氨氧化菌的 16S rDNA 琼脂糖凝胶电泳图谱

Fig. 3 PCR amplification of ANAMMOX bacteria 16S rDNA

2.2 克隆文库及系统发育分析

高、中、低潮滩沉积物样品分别得到 15、22、22 个有效克隆序列. 克隆序列长度从 778 ~ 836 bp 不等,与相同引物下 *Candidatus "Anammoxoglobus"*、*Candidatus "Brocadia anammoxidans"*、*Candidatus "Kuenenia stuttgartiensis"* 等厌氧氨氧化菌的 829、834、827 bp 差异不大.

将 CM-H、CM-M、CM-L 样点克隆得到的有效序列依次进行 Blast 检索,得到多个同源性较高的细菌 16S rDNA 片段,将所得序列和原序列用 ClustalX 进行序列比对,然后用 MEGA 软件构建系统发育树,所有序列在系统发育树中形成明显的 2 个大分支,其中一支为已发现厌氧氨氧化菌及前人研究所得潜在厌氧氨氧化菌(图 4),另外一支与已发现厌氧氨氧化菌进化距离较远,属于浮霉状菌(图 5).

分析结果(表 1)表明,CM-H 样点 15 个有效克隆序列分为 10 个 OTU,覆盖率为 33.3%,克隆序列 CM-H-2、CM-H-15 与已知 ANAMMOX 菌在进化树上聚为一群(Cluster A),占该文库有效克隆总数的 13.3%,其中 CM-H-15 与已知 ANAMMOX 菌

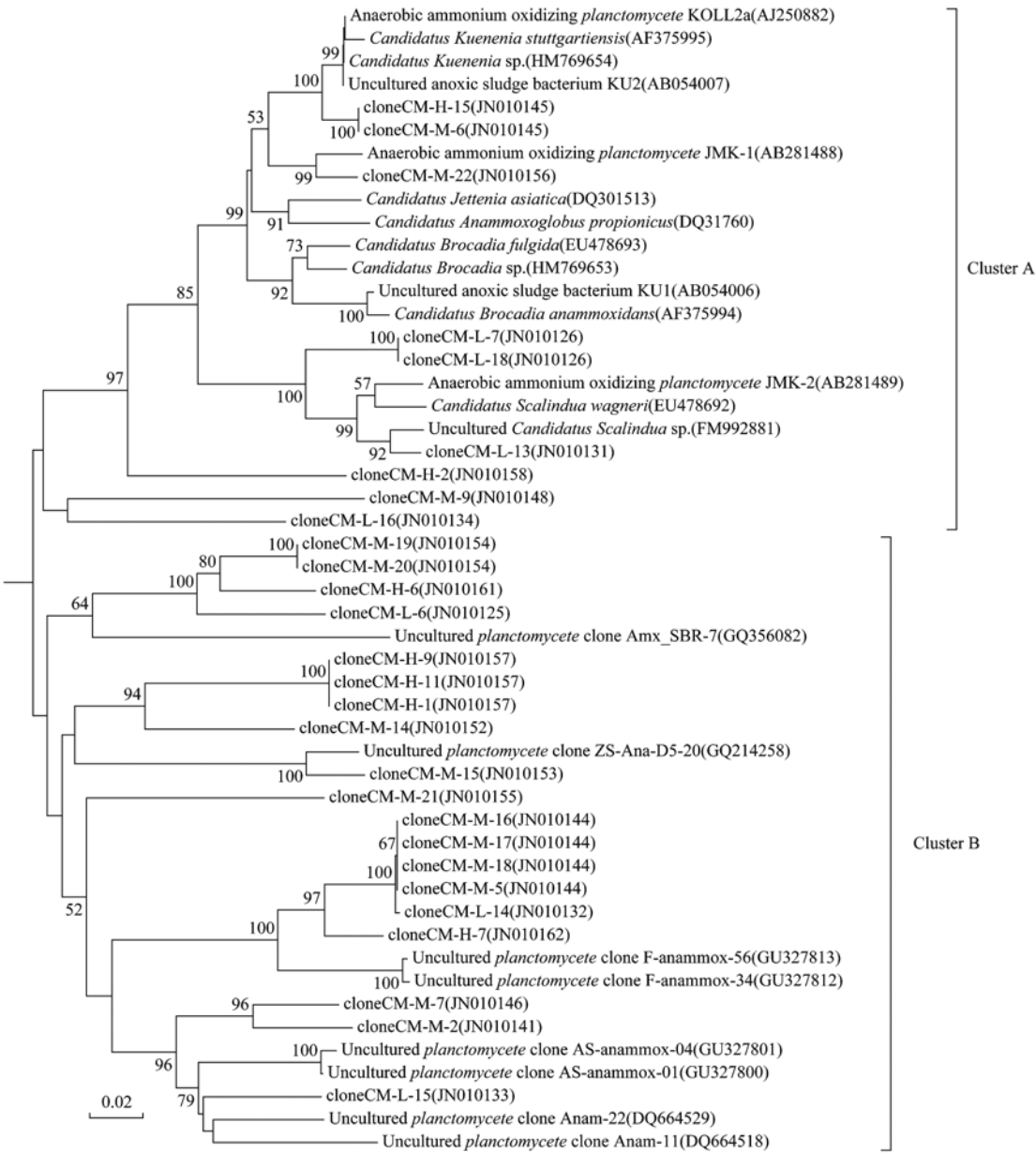
Candidatus "Kuenenia stuttgartiensis" 的同源性达 94%,Bootstrap 检测置信度达 100%. 另有 5 个克隆序列在进化树上归入与已知 ANAMMOX 菌距离最近的潜在 ANAMMOX 菌群(Cluster B),占克隆总数的 33.3%,其余 8 个克隆序列与已知 ANAMMOX 菌距离较远,在系统发育树中归入浮霉状菌分支.

CM-M 样点 22 个克隆序列分为 15 个 OTU,覆盖率为 31.8%,克隆序列 CM-M-6、CM-M-9、CM-M-22 与已知的 ANAMMOX 菌在进化树上聚为一群(Cluster A),占到该文库有效克隆总数的 13.6%. 其中 clone CM-M-6 与 *Candidatus "Kuenenia sp."* 同源性达 94%,Bootstrap 检测置信度达 100%,clone CM-M-22 与 Anaerobic ammonium-oxidizing *Planctomycete* JMK-1 (AB281488) 的同源性达 95%,置信度为 99%. 11 个克隆序列在进化树上与距离已知 ANAMMOX 菌最近的潜在 ANAMMOX 菌聚为一群(Cluster B),占到克隆总数的 50.0%. 其余 8 个序列与已发现的 ANAMMOX 菌进化距离较远,在系统发育树中归入浮霉状菌分支.

CM-L 样点 22 个克隆序列分为 16 个 OTU,覆盖率为 27.3%,克隆序列 CM-L-7、CM-L-13、CM-L-16、CM-L-18 与已知 ANAMMOX 菌在进化树上聚为一群(Cluster A),占该文库有效克隆总数的 18.2%. 其中 CM-L-7 以及 CM-L-18 与 *Candidatus "Scalindua sp."* 同源性达 98%,CM-L-13 与 *Candidatus "Scalindua wagneri"* 同源性达 94%. 由 Bootstrap 对构建的进化树进行分析,可见以上分支的置信度 > 92%. CM-L-6、CM-L-14、CM-L-15 在进化树上归入与已知 ANAMMOX 菌距离最近的潜在 ANAMMOX 菌群(Cluster B),与前人厌氧氨氧化研究中得到的 Uncultured *planctomycete* clone Anam-22 (DQ664529) 等同源性较高. 其余 15 个克隆序列与已知 ANAMMOX 菌距离较远,在系统发育树中与浮霉状菌聚为一群.

3 讨论

本研究所采用的 Pla46rc 是浮霉类细菌的特异引物,Amx820 是厌氧氨氧化菌的特异引物^[26],国内外研究采用这一引物对作为厌氧氨氧化菌的特异引物,多扩增出 800 bp 左右的条带,并据此证明是厌氧氨氧化菌^[22,27~29]. 从 PCR 扩增结果来看,CM-H、CM-M、CM-L 表层沉积物均得到约 800 bp 的单一目的片段,这初步证明本研究中崇明东滩表层沉积物中存在厌氧氨氧化菌.



Cluster A 为已发现 ANAMMOX 菌序列; Cluster B 为距离已发现 ANAMMOX 菌最近的潜在 ANAMMOX 菌序列;括号中为相应序列在 GenBank 中的登录号,下同

图 4 16S rDNA 基因序列构建的系统发育树 ANAMMOX 菌分支

Fig. 4 Branch of ANAMMOX bacteria of phylogenetic tree according to 16S rDNA gene sequences

表 1 沉积物样品中 ANAMMOX 菌 16S rDNA 序列分析结果

Table 1 Analysis result of ANAMMOX bacteria 16S rDNA sequences

样点	有效克隆数	OTU 数	覆盖率 /%	Cluster A 克隆数	Cluster A 所占比例/%	优势 ANAMMOX 属	Cluster B 克隆数	Cluster B 所占比例/%
CM-H	15	10	33.3	2	13.3	<i>Candidatus "Kuenenia"</i>	5	33.3
CM-M	22	15	31.8	3	13.6	<i>Candidatus "Kuenenia"</i>	11	50.0
CM-L	22	16	27.3	4	18.2	<i>Candidatus "Scalindua"</i>	3	13.6

系统发育分析发现,崇明东滩高、中、低潮滩表层沉积物中均存在厌氧氨氧化菌.低潮滩检测到的

已知厌氧氨氧化菌数量最多,而高潮滩最少,且低潮滩克隆文库的覆盖率最低,为 27.3%,高潮滩克隆

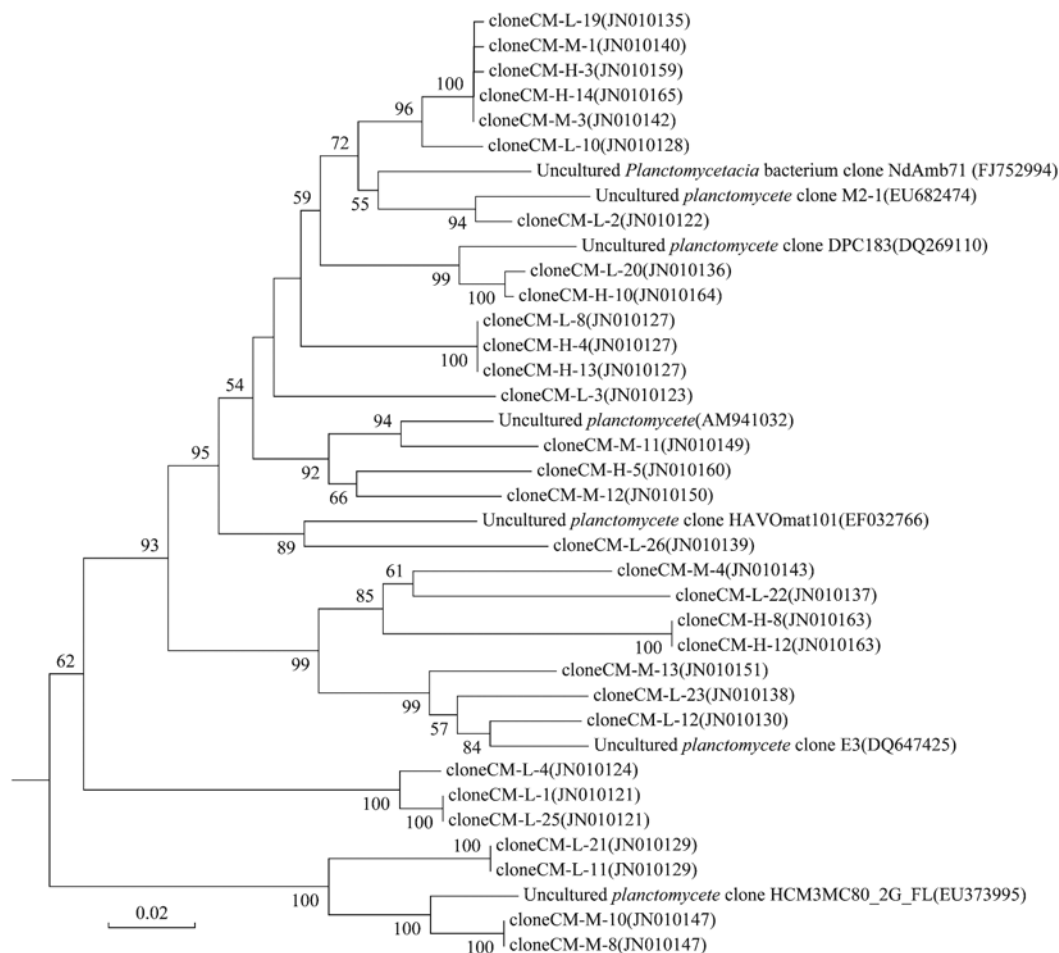


图5 16S rDNA 基因序列构建的系统发育树 *Planctomycetes* 分支

Fig. 5 The *Planctomycetes* branch of phylogenetic tree according to 16S rDNA gene sequences

文库的覆盖率最高,为 33.3%,这表明从低潮滩到高潮滩厌氧氨氧化菌数量有逐渐降低的趋势.这一方面可能与厌氧氨氧化菌对氧气敏感有关,只能在氧分压低于 5% 氧饱和(以空气中的氧浓度为 100%)的条件下生存^[30].一般而言,低潮滩受海水淹没频率高、时间长,有较好的厌氧环境,高潮滩被海水淹没时间短,沉积物暴露时间较长,氧浓度相对比较高.此外,植物根系对沉积物中氧含量也有一定影响,低潮滩为光滩,基本上没有植被发育,中潮滩发育着海三棱藨草等,高潮滩芦苇茂密,从低潮滩到高潮滩植被根系活动逐渐增强,泌氧量也增加,这在一定程度上也抑制了厌氧氨氧化菌的群落发育.另一方面,厌氧氨氧化菌为化能自养型菌,以二氧化碳为唯一碳源^[31,32],有机质会对厌氧氨氧化菌活动产生抑制^[33],另有研究发现崇明东滩从低潮滩到高潮滩表层沉积物中有机质含量逐渐增加,这也可能是导致厌氧氨氧化菌数量从低潮滩到高潮滩逐渐减少的原因之一^[20].

崇明东滩高、中、低潮滩厌氧氨氧化菌所属菌属不同,中、高潮滩以 *Candidatus* “*Kuenenia*”为主,低潮滩以 *Candidatus* “*Scalindua*”为主.中潮滩沉积物中检测到的厌氧氨氧化菌数量虽低于低潮滩,但种类稍占优势,存在与 *Candidatus* “*Kuenenia* sp.”、Anaerobic ammonium-oxidizing *planctomycete* JMK-1 及 Uncultured anoxic sludge bacterium KU2 (AB054007) 进化距离较近的克隆序列,且在进化树中与距离已知 ANAMMOX 菌最近的潜在 ANAMMOX 菌聚为一群的克隆数占到该样点克隆总数的一半,远高于低潮滩的 13.6% 和高潮滩的 33.3%,表明中潮滩存在大量的潜在厌氧氨氧化菌,群落结构较为复杂.这可能与中潮滩比较适中的沉积物粒径适宜厌氧氨氧化菌寄居有关.此外,厌氧氨氧化菌消耗 NO_2^- -N 与 NH_4^+ -N 之比约为 1.3^[34],而根据向圣兰等^[19]研究,崇明东滩沉积物中 NH_4^+ -N 含量要远高于 NO_2^- -N 的含量,因此 NO_2^- -N 含量是厌氧氨

氧化反应的限制因子, NO_2^- -N 含量的多少对厌氧氨氧化菌有更大的影响, 研究还发现^[19], 中潮滩 NO_2^- -N 平均含量高于低潮滩, 高潮滩含量最低, 这也是导致中潮滩厌氧氨氧化菌群落结构相对复杂, 中、低潮滩厌氧氨氧化菌比高潮滩丰富的一个可能原因. 高潮滩表层沉积物中 Hg 等重金属的含量要明显高于中潮滩、低潮滩, 存在重金属污染^[35,36], 也是导致高潮滩厌氧氨氧化菌数量少, 群落结构简单不可忽视的原因.

4 结论

(1) 分子生物学鉴定结果表明, 崇明东滩表层沉积物中存在厌氧氨氧化菌, 部分序列, 如 CM-L-7 和 CM-L-18, 与已发现厌氧氨氧化菌属 *Candidatus "Scalindua"* 的同源性可达 98%. 但多数克隆序列与已知 ANAMMOX 菌存在较大的进化距离, 说明 Pla46rc/Amx820 引物对的 ANAMMOX 特异性有待进一步考究, 同时也表明自然环境中还存在以前未被发现的可进行厌氧氨氧化的细菌的可能性.

(2) 崇明东滩高、中、低潮滩厌氧氨氧化菌所属菌属不同, 中、高潮滩以 *Candidatus "Kuenenia"* 为主, 低潮滩以 *Candidatus "Scalindua"* 为主.

(3) 相比之下, 崇明中潮滩厌氧氨氧化菌群落结构较为复杂, 有 50.0% 的克隆序列在进化树上归入与已知 ANAMMOX 菌距离最近的潜在 ANAMMOX 菌分支, 明显高于低潮滩的 13.6% 和高潮滩的 33.3%.

参考文献:

- [1] 郑平, 张蕾. 厌氧氨氧化菌的特性与分类[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, **35**(5): 473-481.
- [2] 杨洋, 左剑恶, 全哲学, 等. UASB 反应器中厌氧氨氧化污泥的种群分析[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(1): 52-56.
- [3] 宋亚娜, 林智敏, 陈在杰, 等. 荧光定量 PCR 技术检测红壤稻田土壤厌氧氨氧化细菌[J]. 福建农业学报, 2010, **25**(1): 82-85.
- [4] Mulder A, Van de Graaf A A, Robertson L A, et al. Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1995, **16**(3): 177-183.
- [5] Tal Y, Watts J E, Schreier H J. Anaerobic ammonia-oxidizing bacteria and related activity in Baltimore inner harbor sediment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(4): 1816-1821.
- [6] Kuypers M M M, Slikers A O, Lavik G, et al. Anaerobic ammonium oxidation by anammox bacteria in the Black Sea[J]. Nature, 2003, **422**(6932): 608-611.
- [7] Thamdrup B, Dalsgaard T. Production of N_2 through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(3): 1312-1318.
- [8] Trimmer M, Nicholls J C, Deflandre B. Anaerobic ammonium oxidation measured in sediments along the Thames estuary, United Kingdom[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(11): 6447-6454.
- [9] Trimmer M, Nicholls J C, Morley N, et al. Biphasic behavior of anammox regulated by nitrite and nitrate in an estuarine sediment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(4): 1923-1930.
- [10] Risgaard-Petersen N, Meyer R L, Schmid M, et al. Anaerobic ammonia oxidation in an estuarine sediment[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2004, **36**(3): 293-304.
- [11] Engström P, Dalsgaard T, Hulth S, et al. Anaerobic ammonium oxidation by nitrite (anammox): implications for N_2 production in coastal marine sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, **69**(8): 2057-2065.
- [12] Meyer R L, Risgaard-Petersen N, Aller D E. Correlation between anammox activity and microscale distribution of nitrite in a subtropical mangrove sediment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(10): 6142-6149.
- [13] Schubert C J, Durisch-Kaiser E, Wehrli B, et al. Anaerobic ammonium oxidation in a tropical freshwater system (Lake Tanganyika)[J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(10): 1857-1863.
- [14] Rysgaard S, Glud R N, Risgaard-Petersen N, et al. Denitrification and anammox activity in arctic marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 2004, **49**(5): 1493-1502.
- [15] Byrne N, Strous M, Crépeau V, et al. Presence and activity of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria at deep-sea hydrothermal vents[J]. The ISME Journal, 2009, **3**(1): 117-123.
- [16] Schmid M C, Risgaard-petersen N, Van de Vossenberg J, et al. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in marine environments: widespread occurrence but low diversity[J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(6): 1476-1484.
- [17] Schmid M C, Maas B, Dapena A, et al. Biomarkers for in situ detection of anaerobic ammonium oxidizing (anammox) bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(4): 1677-1684.
- [18] Kartal B, Van Niftrik L, Rattray J, et al. *Candidatus "Brocadia fulgida"*: an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium[J]. FEMS Microbiological Ecology, 2008, **63**(1): 46-55.
- [19] 向圣兰. 崇明东滩湿地不同植被类型下 N_2O 排放通量研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [20] 袁琦, 崔玉雪, 陈庆强, 等. 崇明东滩潮间带硫酸盐还原菌及有机质含量的初步研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2155-2159.
- [21] Jetten M S, Schmid M, Van de Pas-Schoonen K T, et al. Anammox organisms: enrichment, cultivation, and environmental analysis[J]. Environmental Microbiology, 2005, **397**(1): 34-

- 57.
- [22] 雒怀庆, 胡勇有. 厌氧氨氧化污泥中效应菌的分子生物学研究[J]. 微生物学报, 2005, **43**(3): 335-338.
- [23] Thompson J D, Higgins D G, Gibson T J. CLUSTAL W: Improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice[J]. Nucleic Acids Research, 1994, **22**(22): 4673-4680.
- [24] 张健, 赵阳国, 李海艳, 等. 黄海西北近岸沉积物中细菌群落空间分布特征[J]. 海洋学报, 2010, **32**(2): 118-127.
- [25] 白洁, 李海艳, 张健, 等. 黄海西北部沉积物中细菌群落 16S rDNA 多样性解析[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(12): 1277-1284.
- [26] Gong Z, Liu S T, Yang F L, *et al.* Characterization of functional microbial community in a membrane-aerated biofilm reactor operated for completely autotrophic nitrogen removal [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(8): 2749-2756.
- [27] 黄俊丽, 邹寒艳, 王贵学, 等. 单级自养脱氮系统中厌氧氨氧化菌的分子生物学鉴定[J]. 中国生物工程杂志, 2010, **30**(6): 60-64.
- [28] Egli K, Fanger U, Alvarez P J J, *et al.* Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate [J]. Archives of Microbiology, 2001, **175**(3): 198-207.
- [29] Schmid M, Walsh K, Webb R, *et al.* *Candidatus "Scalindua brodae"* sp. nov., *Candidatus "Scalindua wagneri"* sp. nov., two new species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2003, **26**(4): 529-538.
- [30] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [31] Van de Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. Microbiology, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [32] Schouten S, Strous M, Kuypers M M M, *et al.* Stable carbon isotopic fractionations associated with inorganic carbon fixation by anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70**(6): 3785-3788.
- [33] 付丽霞, 吴立波, 张怡然, 等. 低含量氨氮污水厌氧氨氧化影响因素研究[J]. 水处理技术, 2010, **36**(4): 51-55.
- [34] 祖波, 张代钧, 阎青. 一种新厌氧氨氧化菌的 16S rRNA 基因序列测试[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 469-473.
- [35] 宋连环, 郑祥民, 周立旻, 等. 崇明东滩湿地沉积物中汞累积特征及其影响因素研究[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(12): 1426-1432.
- [36] 康勤书, 吴莹, 张经, 等. 崇明东滩湿地重金属分布特征及其污染状况[J]. 海洋学报, 2003, **25**(2): 1-6.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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)

2012年3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人