

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)	

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较

赵志瑞^{1,2}, 马斌³, 张树军³, 李滨⁴, 白志辉^{1*}, 王晓辉⁴, 庄国强¹, 张洪勋^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100022; 4. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018)

摘要: 短程硝化是污水脱氮工艺中的重要环节, 系统中的菌群结构决定了其处理效果。为探讨短程硝化系统中的微生物对不同污水的适应性, 利用细菌 16S rDNA 克隆文库、磷脂脂肪酸 (PLFA) 和定量 PCR 分析方法对高氨氮废水和城市生活污水短程硝化系统中活性污泥的细菌群落结构、总体微生物的多样性以及功能微生物进行了比较。克隆文库结果表明两个系统中细菌群落结构明显不同, 城市生活污水中细菌种类更丰富, 但两个系统的优势菌群都属于变形菌门 (Proteobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidete)。磷脂脂肪酸分析结果显示高氨氮废水短程硝化系统中微生物多样性指数和均匀度指数明显低于城市生活污水。定量 PCR 结果表明, 高氨氮废水短程硝化系统中氨氧化菌 (AOB) 与亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 的数量都多于城市生活污水短程硝化系统; 高氨氮废水短程硝化系统中 AOB 比 NOB 高 3 个数量级, 而城市生活污水短程硝化系统中 AOB 比 NOB 高 2 个数量级。

关键词: 短程硝化; 生物脱氮; 16S rDNA 克隆文库; PLFA; 定量 PCR

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1448-09

Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System

ZHAO Zhi-rui^{1,2}, MA Bin³, ZHANG Shu-jun³, LI Bin⁴, BAI Zhi-hui¹, WANG Xiao-hui⁴, ZHUANG Guo-qiang¹, ZHANG Hong-xun^{1,2}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Nitritation is an important part of the biological nitrogen removal process, and the performance of the process was determined by the microbial community structure. To explore the microbial adaptability to different sewage, the microbial diversity and the amount of bacteria were investigated in a high ammonia wastewater treatment process and a sewage treatment process using the clone library of bacterial 16S rDNA, the phospholipid fatty acid method (PLFA) and the quantitative PCR. The clone library results showed that there was a significantly difference in bacterial community structure of these two processes, although the dominant bacteria belong to the Proteobacteria and Bacteroidete, there were more clusters in the sewage treatment process. The PLFAs results showed that the microbial diversity index and the evenness index of the high ammonium wastewater treatment process were significantly low. The quantitative PCR results showed that amounts of ammonia oxidizing bacteria (AOB) and nitrite-oxidizing bacteria (NOB) in the high ammonium wastewater treatment process were higher than these in sewage treatment process. The copy number of AOB was higher than the copy number of NOB in the high ammonia wastewater treatment process by three orders magnitude. The copy number of AOB was higher than the copy number of NOB in sewage treatment process by two orders of magnitude.

Key words: partial nitritation; biological nitrogen removal; 16S rDNA clone library; phospholipid fatty acid (PLFA); quantitative PCR

氮素污染是引起水体富营养化的重要原因^[1,2], 短程硝化与厌氧氨氧化耦合工艺是目前已知比较经济的污水生物脱氮途径之一^[3,4]。短程硝化工艺是取得良好的出水效果的关键步骤, 微生物在该工艺污水生化处理中起决定性作用, 其种群的组成与数量很大程度上影响着出水质量^[5,6]。因此分析其微生物群落结构对揭示生物处理机制以及优化运行条件具有重要意义^[7,8]。硝化反应是在硝化细菌作用下完成的, 硝化细菌包括两个细菌亚群, 一

类是亚硝酸细菌 (又称氨氧化菌 AOB), 将氨氧化成亚硝酸, 另一类是硝酸细菌 (又称硝化细菌 NOB), 将亚硝酸氧化成硝酸^[9]。这两类菌能分别从氧化过程中获得生长所需要的能量, 但其能量利用率不高, 故生长较缓慢, 其平均代时 (即细菌繁殖一代所需

收稿日期: 2012-06-19; 修订日期: 2012-10-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZZD-EW-09-3, KZCX2-YW-JC407-3, KSCX2-YW-G-054-2)

作者简介: 赵志瑞 (1975 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水处理及环境微生物, E-mail: zhiruizh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhbai@cees.ac.cn

要的时间)在 10 h 以上. 这两类菌为专性化能自养型,通常生活在一起,避免了亚硝酸盐的积累,且均为专性好氧菌^[10]. AOB 和 NOB 对于能源物质的要求都十分严格:前者只能利用氨;后者只能利用亚硝酸. AOB 的代谢产物是亚硝酸,亚硝酸是 NOB 进行同化作用所必需的能源物质,短程硝化是把反应控制在亚硝化阶段,抑制硝化菌的增长,缩短反应时间,节约能源^[11].

在污水处理中,短程硝化系统一般用于处理消化污泥脱水液等高氨氮废水,较少用于处理城市生活污水. 高氨氮系统容易实现短程硝化,系统通过游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)联合抑制实现短程硝化^[12,13]. 而在城市生活污水处理系统中,启动与稳定维持短程硝化较难. 目前国内外对短程硝化反硝化工艺进行了一系列研究,主要集中在工艺的运行与优化,而关于短程硝化系统中的微生物群落结构的相关研究鲜见报道.

本研究通过把高氨氮系统排放的剩余污泥(含大量的 AOB)投加至城市生活污水系统中,通过调整溶解氧(DO)浓度和水力停留时间,从而实现城市生活污水短程硝化^[14]. 用构建 16S rDNA 克隆文库的方法,对城市生活污水短程硝化系统和高氨氮废水短程硝化系统污泥菌群进行对比分析,考察氨氮浓度对硝化菌种类及菌群多样性的影响. 同时用荧光定量 PCR 方法,对两个系统中的 AOB 与 NOB 进行定量分析,考察高氨氮系统污泥投加至城市生活污水系统后,硝化菌优势菌以及构成比率是否有变化,以期对短程硝化系统的微生物群落调控,实现可控短程硝化提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置和样品

表 2 A/O 反应器进水水质及运行效果¹⁾

Table 2 Influent quality and running effect of A/O reactor					
系统	进水氨氮浓度 /mg·L ⁻¹	进水 COD 浓度 /mg·L ⁻¹	MLSS /mg·L ⁻¹	SVI /mL·g ⁻¹	NAR/%
城市污水系统	42.08 ~ 53.16 (47.70)	121.0 ~ 165.7 (142.6)	3 500 ~ 5 000 (4 300)	74 ~ 77 (75)	84.59 ~ 93.99 (90.60)
高氨氮废水系统	291 ~ 387 (337)	100 ~ 171 (128)	2 500 ~ 3 500 (3 064)	52 ~ 95 (77)	95.0 ~ 98.3 (96.6)

1) 括号内为均值; MLSS 为混合液挥发性悬浮固体; SVI 为污泥体积指数; NAR 为亚硝酸盐积累率

1.2 试验方法

1.2.1 DNA 提取与聚合酶链式反应(PCR)

样品总 DNA 提取采用活性污泥提取试剂盒,取 0.5 g 活性污泥样品,依照说明进行 DNA 的提取 (Omega, USA),提取 DNA 的浓度为 40 ng·μL⁻¹.

以连续流缺氧/好氧(A/O)反应器作为高氨氮废水与城市生活污水短程硝化反应器,该反应器由有机玻璃制作. 城市生活污水短程硝化 A/O 反应器有效容积为 24 L,被等分为 6 个格室,第 1 个格室为缺氧区,剩余 5 个格室为好氧区. 高氨氮废水短程硝化 A/O 反应器有效容积为 28 L,被等分为 7 个格室,第 1 个格室为缺氧区,剩余 6 个格室为好氧区 (如图 1). 进水流量与污泥回流量都通过蠕动泵调整控制. 城市生活污水短程硝化系统采用砂头曝气,高氨氮废水短程硝化系统采用微孔曝气管曝气,曝气量计量都采用转子流量计. 缺氧区通过搅拌器搅拌实现活性污泥与污水混合均匀,实现良好的传质效果. A/O 反应器运行温度通过加热棒控制,温度为 (26 ± 1) °C. 反应器试运行条件、进水水质及运行效果如表 1 和表 2.

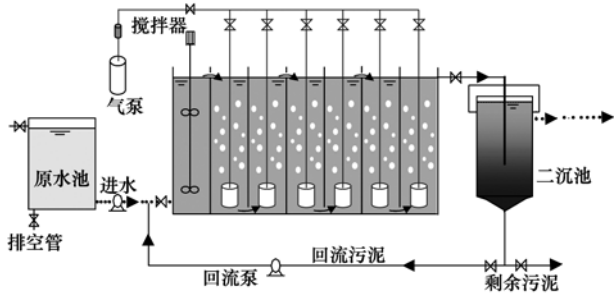


图 1 连续流缺氧/好氧(A/O)工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of plug-flow anoxic/oxic (A/O) process

表 1 A/O 反应器试运行条件¹⁾

Table 1 Running conditions of A/O reactor				
系统	Q/L·d ⁻¹	HRT/h	SRT/d	DO
城市污水系统	82	8.2	10	0.41
高氨氮废水系统	184	3.13	4.5	0.96

1) Q 为进水流量; HRT 为水力停留时间; SRT 为污泥龄; DO 为好氧区域平均溶解氧浓度

提取到的 DNA 使用细菌 16S rDNA 通用引物 27f/1492r 进行 PCR 扩增^[15]. PCR 扩增总体积为 50 μL:10 × buffer 5 μL,dNTPs(10 mmol·L⁻¹) 1 μL,引物 27f、1492r(浓度为 10 μmol·L⁻¹) 各 1 μL,Taq 酶 (2.5 U)0.5 μL, DNA 模板 0.5 μL (20 ng),灭菌的

超纯水补足至 50 μL . 反应条件为,预变性 95 $^{\circ}\text{C}$ 3 min,95 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,56 $^{\circ}\text{C}$ 1 min,72 $^{\circ}\text{C}$ 2 min,30 个循环;72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 10 min;最后 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存.

1.2.2 克隆文库的构建

使用 3S 柱离心式琼脂糖胶 DNA 回收试剂盒将 PCR 产物切胶纯化,根据载体说明书将纯化后的 PCR 产物与 pGEM-T easy vector (Promega, USA) 进行连接. 连接体系为 2 $\times$ Rapid Ligation Buffer 5 μL , pGEM-T easy vector (50 $\text{ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$) 1 μL , PCR 产物 75 ng (与载体的摩尔比为 3:1), T4 DNA ligase 1 μL 混匀,4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中过夜. 转入大肠杆菌 DH5 α (Tiangen),培养后的菌液涂布在含青霉素 (AMP) 抗生素以及表面涂布有 IPTG 和 X-Gal 的 LB 平板上,37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 12 h 后,挑取一定数量的带有插入片段的白色克隆,转到新的含 AMP 的 LB 平板上,培养后再用 PCR 的方法检查插入片段的大小,鉴定片段大小在 1 500 bp. 每个样品挑选 230 个鉴定为阳性克隆的克隆子再用 T7/SP6 进行 PCR 扩增,扩增产物用限制性内切酶 *RsaI* (Promega, USA) 和 *HhaI* (Promega, USA) 进行分型,每个酶切类型挑取 1 个代表菌株进行测序 (北京博迈德生物技术有限公司),用 Bioedit 对测序结果进行编辑,把编辑好的序列在 GenBank 中进行同源性检索后下载同源性序列构建系统发育树采用 clustalx1.83 中 Do Complete Alignment 进行比对,用 Bootstrap N-J tree 重复 1000 次构建系统进化树,系统发育树的绘制使用 MEGA 4.1 的软件完成.

1.2.3 荧光定量分析

试验采用 SYBR Green 染料法,采用 AOB (Eub338/Nso1225)^[16] 与 NOB 特异性引物 (NSR1113/FNSR 1264R)^[17] 扩增 16S rDNA 基因片段,将 PCR 产物克隆到载体上,然后抽提质粒,经测量计算样品浓度的数值,结果 AOB 的拷贝数为 59×10^{10} , NOB 的拷贝数为 3.61×10^{10} . 把两种质粒 DNA 作为绝对定量的标准品,将标准品稀释成不同浓度的样品,并作为模板用 Real Master Mix (SYBR Green, TIANGEN) 体系进行 PCR 反应,仪器为 Mx3000P 荧光定量 PCR 仪 (Genetimes 公司). 25 μL 反应体系中含正向引物和反向引物各 0.5 μL ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 2 μL 待测样品和质粒标准品 DNA, 9 μL 2.5 $\times$ Master Mix, 每个样品做 3 个平行试验,结果取平均值. 以标准品拷贝数的对数值为横坐标,以测得的 C_t 值为纵坐标,绘制标准曲线. 对系统中的 AOB 与

NOB 进行定量,根据样品的 C_t 值,即可在标准曲线中定出样品的拷贝数.

1.2.4 磷脂脂肪酸 (PLFAs) 分析

磷脂是几乎所有微生物细胞膜的重要组成部分,在自然条件下其含量相对稳定,不同的微生物类群含有不同种类和数量的 PLFAs,某些 PLFAs 还特性地存在于某类微生物的细胞膜中,PLFAs 可以作为微生物生物量和群落结构变化的生物标记分子.

试验采用修正的 Bligh-Dyer 方法^[18],取 5 g (称准至 0.01 g) 污泥样品提取 PLFA. 以总碳数:双键数和双键距离分子末端位置命名,c 表示顺式,t 表示反式,a 和 i 分别表示支链的异型 (anteiso)- (甲基在 C 末端第三位 C 原子上) 和同型 (iso)- (甲基在 C 末端第二位 C 原子上),br 表示甲基的位置未知,10Me 表示一个甲基团在距分子末端第 10 个碳原子上,环丙烷脂肪酸用 cy 表示, α 和 β 代表羟基脂肪酸的—OH 分别在第 2、3 位 C 原子上,革兰氏阳性细菌含有多支链的脂肪酸,如: i13:0, a13:0, i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0; 革兰氏阴性细菌含有单不饱和脂肪酸,如: 14:1 ω 5c, 15:1 ω 6c, 16:1 ω 7c, 16:1 ω 7t, 16:1 ω 5c, 18:1 ω 9c, 18:1 ω 7c, 18:1 ω 7t, 真菌含有特殊的脂肪酸,如: 18:2 ω 6c, 18:3 ω 6c, 18:3 ω 3c^[19,20].

根据质谱图和标准数据库对检测到的磷脂脂肪酸进行识别,采用内标法计算每种磷脂脂肪酸的相对含量,进行主成分分析和聚类分析时先将单体 PLFAs 的摩尔分数进行对数转换. 统计分析软件采用 SPSS 13.0. 采用 Shannon-Wiener 指数 (H') 来评价样品微生物群落结构多样性,群落中生物种类增多代表了群落的复杂程度增高,即 H' 值愈大,群落所含的信息量愈大. Pielou 均匀度指数,估计该群落物种分布的均匀度 (E).

计算公式为:

$$H' = - \sum p_i \ln(p_i)$$

$$p_i = n_i / N$$

$$E = H' / H'_{\max}$$

式中, H' 为实际观察的物种多样性指数, $H'_{\max}$ 为最大的物种多样性指数, $H'_{\max} = \ln S$ (S 为群落中的总物种数), n_i 为第 i 个种的个体数目, N 为群落中所有种的个体总数^[21].

2 结果与讨论

2.1 高氨氮废水克隆文库结构

高氨氮废水样品的克隆文库中,有 36 个 OTUs,从图 2 和图 3 可以看出所有 OTUs 分别属于细菌域的 5 个主要类群. 主要是拟杆菌门(Bacteroidetes) 26.9%; 其中绿弯菌门(Chloroflexi)13.7%; 螺旋菌门(Spirochaetes) 12.3%; 厚壁菌门(Firmicutes) 4.7%. 其中变形菌门(Proteobacteria)的克隆子占总数的 42.4%,这与 Snaird 等^[22]学者对常规活性污泥

中菌群多样性的研究结论较为吻合,即活性污泥池中的优势类群为 Proteobacteria. 该样品中 Proteobacteria 类群又可分为 β -变形菌(β -Proteobacteria) 22.2%; γ -变形菌纲(γ -Proteobacteria)1.9%; δ -变形菌纲(δ -Proteobacteria) 4.7% 和 α -变形菌纲(α -Proteobacteria)9.9%; ε -变形菌纲(ε -Proteobacteria)3.7%.

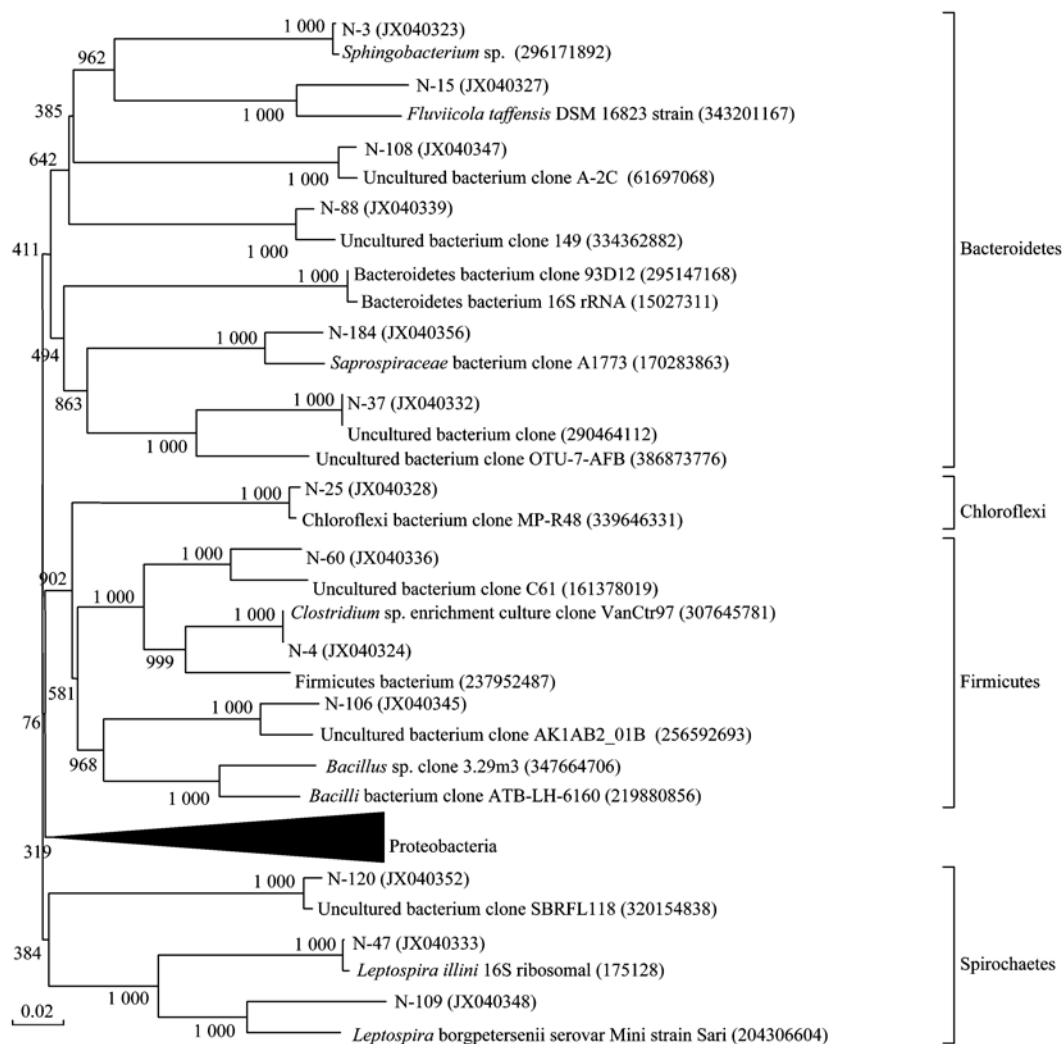


图 2 高氨氮工艺活性污泥的细菌系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree of the bacteria of active sludge in the high ammonia nitrogen process

2.2 城市生活污水克隆文库结构

在活性污泥 2 号样品的克隆文库中,共计 215 个克隆子,55 个 OTU. 从图 4 和图 5 可以看出,所有 OTU 分别属于细菌域的 7 个主要类群,主要是拟杆菌门 23.26%; 绿弯菌门 1.4%; 厚壁菌门 4.68%. 放线菌门(Actinobacteria) 1.86%. 浮霉菌门(Planctomycetes) 3.72%. 另外还有反硝化细菌(Denitrifying bacterium)5.56%. 其中变形菌门的克隆子占总数的 52.1%,也是该样品中最多类群. 该

样品中 Proteobacteria 类群又可分为 β -变形菌纲、 δ -变形菌纲和 γ -变形菌纲、 α -变形菌纲,占克隆文库的比例分别为 23.72%、2.8%、14.88%、10.7%. 非培养细菌(Uncultured bacterium)7.46%.

从以上试验结果可以看出,两种样品中都含有绿弯菌门、拟杆菌门和厚壁菌门,但所占比例不同,这些菌落在高氨氮废水中高于城市生活污水,达到 45.26%. 然而城市生活污水微生物的多样性多于高氨氮废水,高氨氮废水含有螺旋菌,在城市生活污水

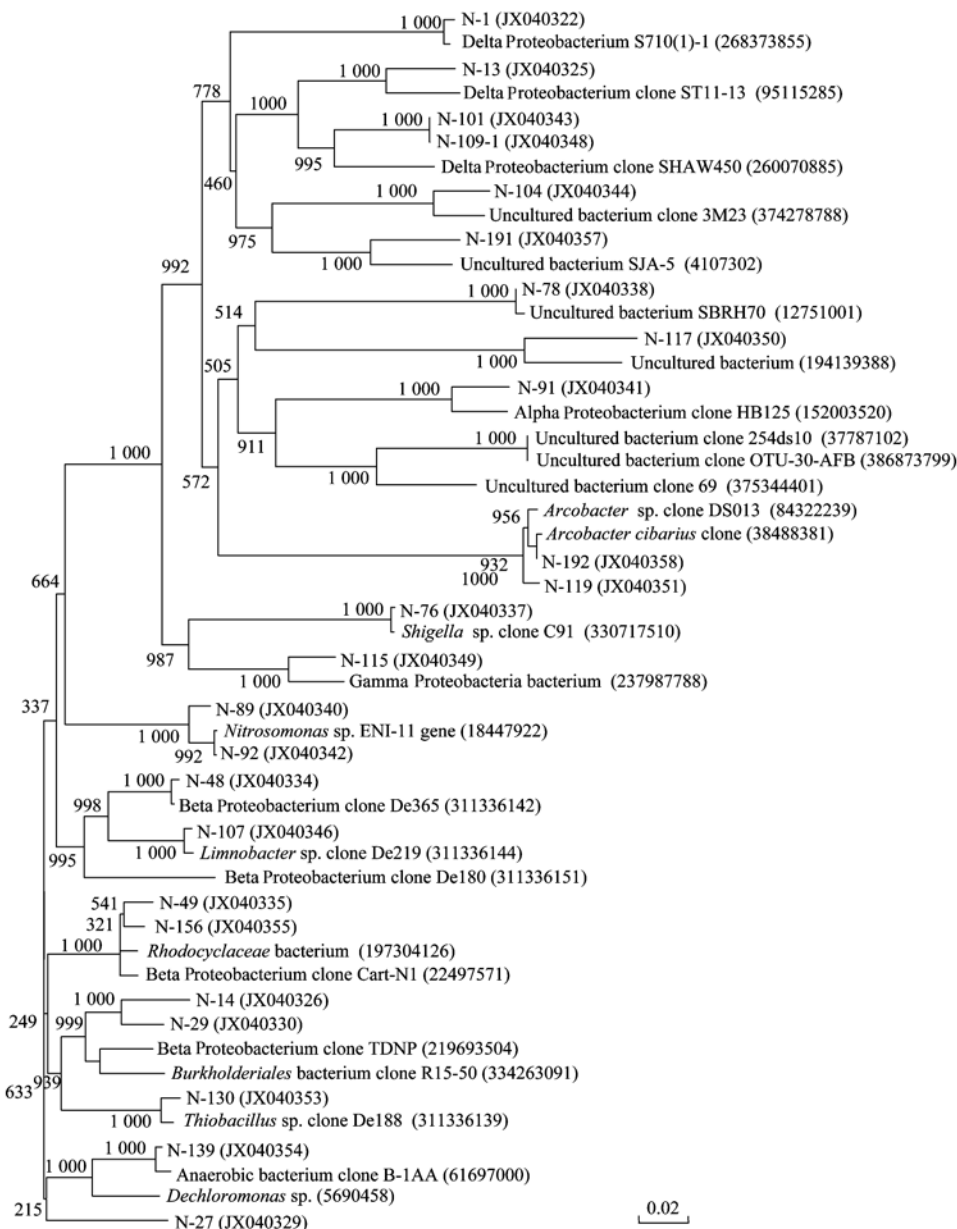


图3 高氨氮工艺活性污泥的变形细菌系统发育树

Fig. 3 Phylogenetic tree of the proteobacteria of active sludge in the high ammonia nitrogen process

水中没有发现;而在城市生活污水中的放线菌、浮霉菌和反硝化细菌在高氨氮废水中没有发现. 在两种废水中,变形菌都是优势菌群,多数脱氮细菌也分布在这一类中,其各个亚纲与脱氮细菌的关系如下: ① β -变形菌纲是污水处理系统中的优势菌群,这与文献[23]的结论一致, AOB 是其主要成员,包含亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 和亚硝化螺菌属 (*Nitrospira*)^[24]; ② γ -变形菌纲,其主要成员有 NOB 即硝化球菌属 (*Nitrococcus*); ③ δ -变形菌纲的脱硫杆菌目 (*Desulfobacterales*)、脱硫盒菌科 (*Desulfoarculaceae*)、也包含 NOB 为硝化刺菌属 (*Nitrospina*)^[25]. 在两种样品中都包含 α 、 β 、 γ 、 δ

变形菌纲,说明两种废水中的主要脱氮菌群比较相似。在一种活性污泥中,不同硝化细菌的种群的优势地位与一些环境因子相关,包括碳氮比和溶解氧,而许多研究表明亚硝化单胞菌属和亚硝化杆菌属(*Nitrobacter*)更多出现在高氨氮环境中。本研究在高氨氮废水中也出现了能够耐受高氨氮低溶氧的亚硝化单胞菌属细菌,说明在废水脱氮工艺中脱氮细菌种群结构发生了变化。在城市生活污水反应器中一些具有反硝化功能的菌群出现,说明在反应器中除了传统的硝化途径外,还同时存在着多种反硝化反应作用于氨氮的去除过程中。同时出现浮霉菌属细菌,说明城市生活污水运行环境处于低溶解氧状

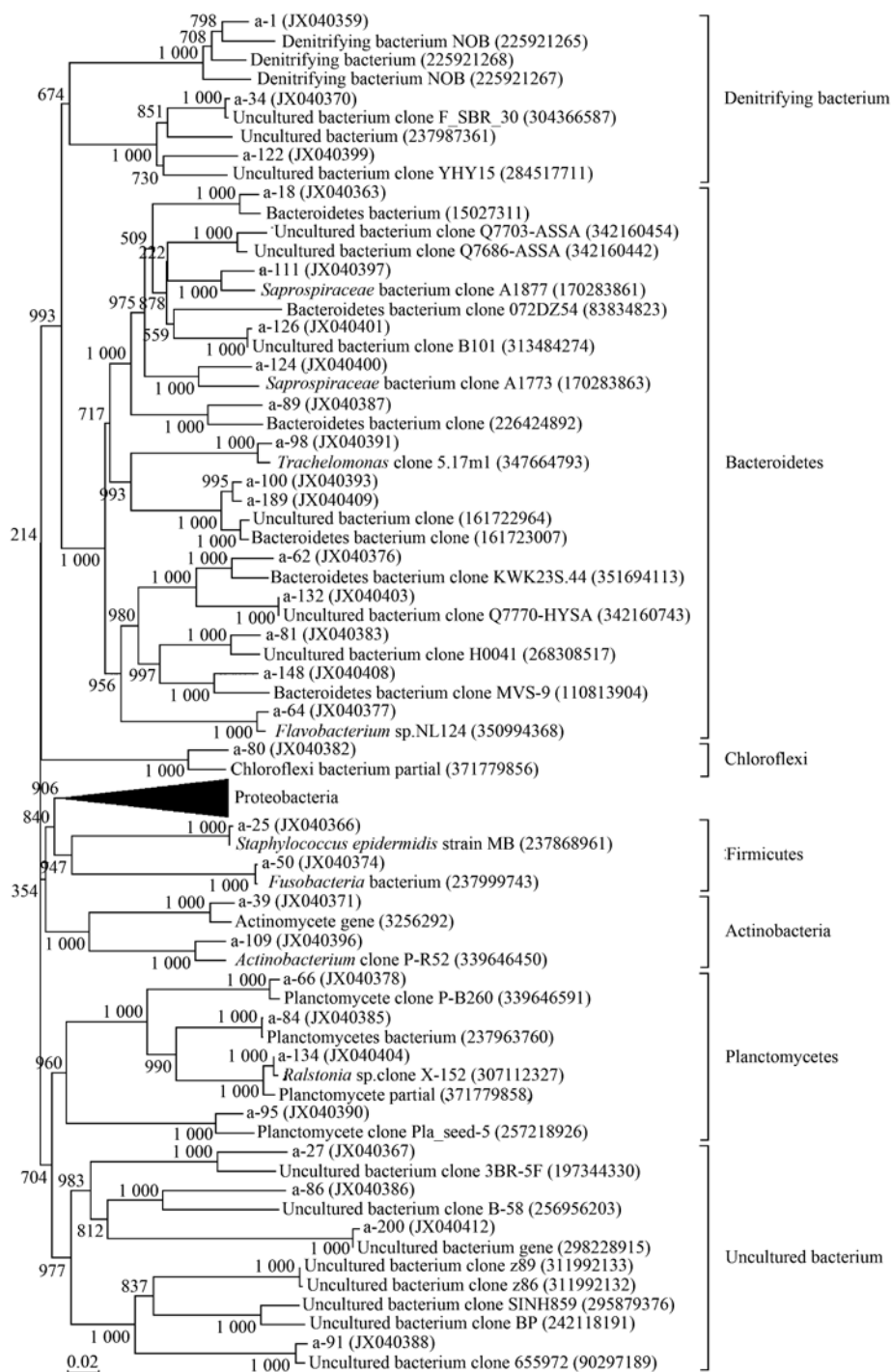


图4 城市生活污水工艺活性污泥的细菌系统发育树

Fig. 4 Phylogenetic tree of the bacteria of active sludge in the municipal wastewater process

态,而这种低氨氮浓度与低溶解氧导致这些厌氧菌的出现. 浮霉菌门能够在缺氧环境下利用亚硝酸盐(NO_2^-)氧化铵离子(NH_4^+)生成氮气来获得能量,因此称作厌氧氨氧化菌(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX),该菌对全球氮循环具有重要意义,也是低氨氮短程硝化污水处理工艺中重要的细菌. 文献[26]中也报道了当氨氮浓度较低时,

厌氧菌将出现,这可能缘于氨氮浓度降低,污泥停留时间增加,DO 浓度降低,污泥群落发生变化.

2.3 定量 PCR 结果

因为对于所有的细菌其每个基因组内只有一个 rRNA 基因拷贝^[27],所以应用定量 PCR 技术所测得的其基因拷贝数质量浓度即为细菌在样品中的细胞质量浓度. 高氨氮废水工艺每克活性污泥 16S rDNA

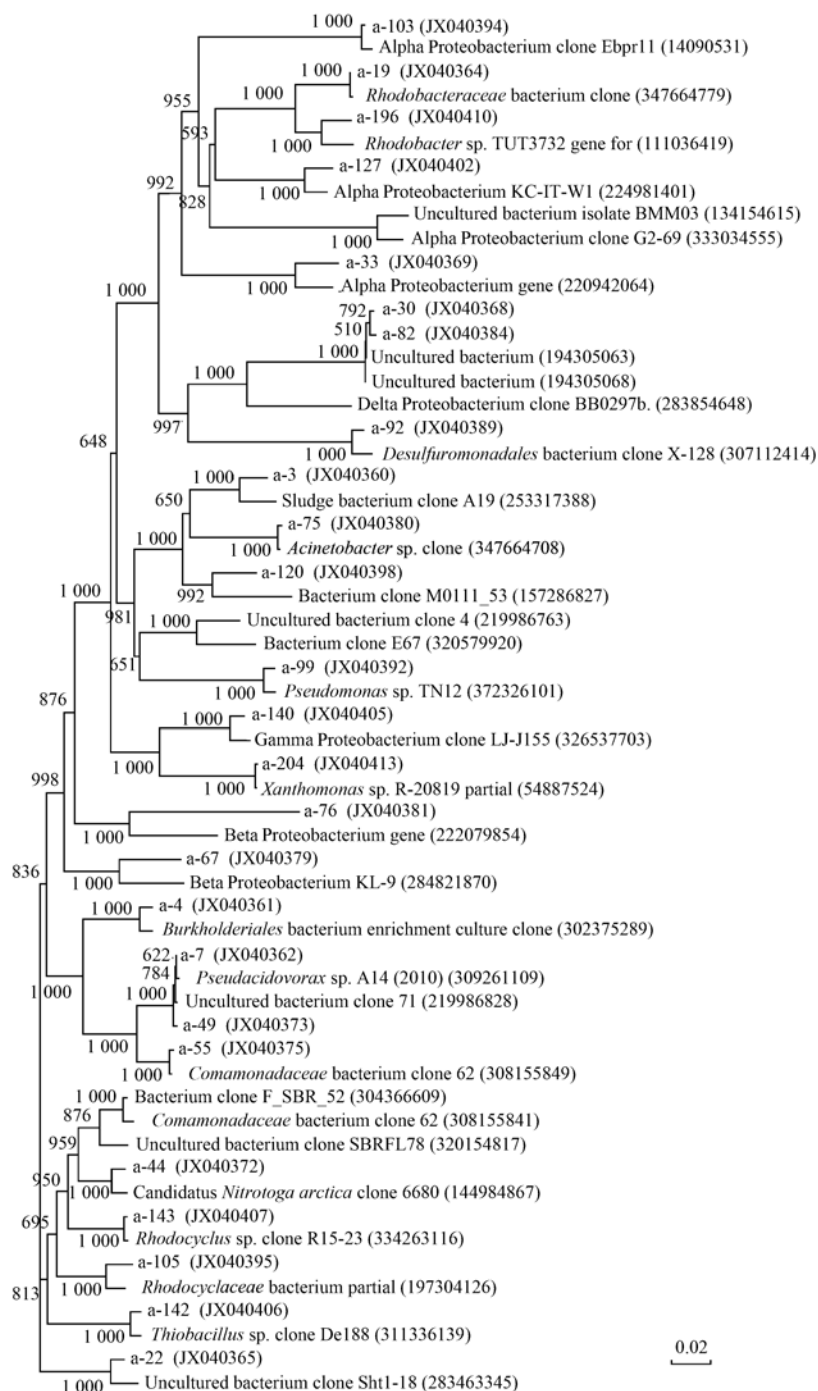


图 5 城市生活污水工艺活性污泥的变形菌系统发育树

Fig. 5 Phylogenetic tree of the proteobacteria of active sludge in the municipal wastewater process

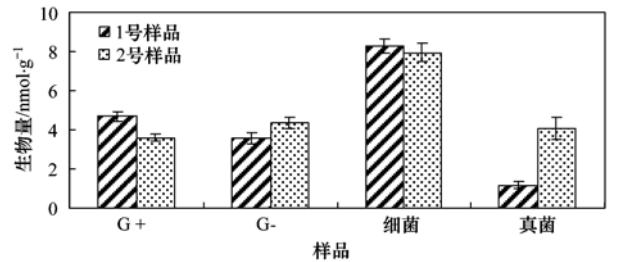
定量结果: AOB 6.69×10^8 拷贝数, NOB 3.58×10^5 拷贝数; 城市生活污水工艺每克活性污泥中 16S rDNA 定量结果: AOB 3.17×10^6 拷贝数, NOB 4.15×10^4 拷贝数. 在城市生活污水样品中, 由于氨氮含量降低, 使反应器内 AOB 与 NOB 细胞数量大幅下降. 高氨氮废水中总 AOB 的细胞数量比城市生活污水高 2 个数量级, 而 NOB 的细胞数量只高 1 个数量级, 而且高氨氮废水中 AOB 的细胞数量比

NOB 高 3 个数量级, 与高氨氮废水短程硝化速率高相关, 此过程中大量 NOB 已被淘洗出反应器. 两种样品中 AOB 的细胞数量远远高于 NOB 细胞数量与反应器良好的运行效果一致. 在不同的样品中 AOB 的量有着明显的变化, 尽管它们仅仅是整个细菌群落的一部分, 但是其敏感的变化规律为整个脱氮过程提供了一个潜在的指示. AOB 作为废水脱氮过程的指示菌比总细菌群落更加敏感和容易检测.

2.4 PLFAs 分析结果

比较不同样品的总 PLFAs 可以发现,样品的总生物量差别明显. 高氨氮废水系统中活性污泥的总生物量为 $9.43\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$; 城市生活污水系统中活性污泥的总生物量为 $12.0\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$.

由图 6 可以看出, 在高氨氮废水中革兰氏阳性菌含量水平较高,而城市生活污水革兰氏阴性菌含量水平较高,细菌在高氨氮废水中含量水平较高,而真菌在城市生活污水中含量较高. 微生物群落结构多样性(H)和均匀度(E)结果见表 3.



1 号样品为高氨氮废水,2 号样品为城市生活污水

图 6 样品各生物量比较

Fig. 6 Comparison of sample biomass

表 3 各样品多样性指数与均匀度指数比较

Table 3 Comparison of the diversity index and Evenness index of samples

项目	高氨氮废水	城市生活污水
H	1.24	1.41
E	0.637	0.725

从表 3 可看出,城市生活污水的生物多样性指数和均匀度指数均高于高氨氮废水,说明在城市生活污水中含有更多种类的微生物类群,细菌群落分布更均匀,原因可能与城市生活污水营养更丰富和游离氨浓度较低两者对微生物种群多样性产生影响有关,在高氨氮废水中由于游离氨浓度较高抑制其它菌群的生长,以致使脱氮菌群优先生长.

以上结果表明运用不同试验能更加准确地评价活性污泥系统,其结果为系统的调控提供更加准确的理论依据.

3 结论

(1) 在高氨氮废水和城市生活污水短程硝化的活性污泥系统中,细菌群落都具有高度的多样性,分别为变形菌门、拟杆菌门、螺旋菌门、绿弯菌门、浮霉菌门等,其中以变形菌门的细菌含量最多,包括 α -Proteobacteria、 β -Proteobacteria、 γ -Proteobacteria 和 δ -Proteobacteria 等. 但是这两系统中的群落结构

差异显著,同时脱氮细菌种群结构明显不同,生活污水中可检测出放线菌、反硝化菌和浮霉菌,而高氨氮废水中未检出.

(2) AOB 含量与氨氮的浓度呈正相关,高氨氮废水短程硝化系统活性污泥中 AOB/NOB 的比例显著大于城市污水短程硝化系统,指示出前者的短程硝化效率高. 城市生活污水样品比高氨氮废水样品具有更丰富的微生物量,其多样性指数和均匀度指数均高于高氨氮废水,指示出系统功能的全面性.

参考文献:

[1] Rabalais N N, Turner R E, Scavia D. Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River[J]. BioScience, 2002, **52**(2): 129-142.

[2] Cloern J E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem[J]. Marine Ecology Progress Seriesar, 2001, **210**: 223-253.

[3] 刘冬英, 邱艳玲, 袁宪正, 等. 厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3208-3213.

[4] 徐少阳, 蒋进元, 周岳溪, 等. 三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3172-3176.

[5] Zhu G B, Peng Y Z, Li B K, *et al.* Biological removal of nitrogen from wastewater [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, **192**: 159-195.

[6] 曾薇, 张悦, 李磊, 等. 生活污水常温处理系统中 AOB 与 NOB 竞争优势的调控[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1430-1436.

[7] 孙洪伟, 王淑莹, 张树军, 等. 高氨渗滤液短程深度脱氮及反硝化动力学[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 129-133.

[8] 徐金兰, 侯圣春, 黄廷林. 强化厌氧污泥体系同步脱硫反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1246-1251.

[10] Tan N C G, Kampschreur M J, Wanders W, *et al.* Physiological and phylogenetic study of an ammonium-oxidizing culture at high nitrite concentrations[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2008, **31**(2): 114-125.

[11] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 短程硝化生物脱氮工艺的稳定性[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 63-67.

[12] Yu D S, Peng Y Z, Song X Q, *et al.* Nitrogen removal from the sewage containing seawater via nitrite pathway [J]. Environmental Science, 2003, **24**(3): 51-55.

[13] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z. Free ammonia and free nitrous acid inhibition on the anabolic and catabolic processes of nitrosomonas and nitrobacter [J]. Water Science and Technology, 2007, **56**(7): 89-97.

[14] 韩晓宁, 张树军, 甘一萍, 等. 以 FA 与 FNA 为控制因子的短程硝化启动与维持[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 809-814.

[15] Ma B, Zhang S J, Wang J M, *et al.* Bio-augmentation for achieving stable nitrification in a continuous anoxic/aerobic reactor treating sewage[A]. In: Cities of the Future Xi'an: Technologies

- for Integrated Urban Water Management (CoF-XIAN2011) [C]. Xi'an, China, 2011. 15-19.
- [16] Gu L K, Bai Z H, Jin B, Hu Q, *et al.* Assessing the impact of fungicide enostroburin application on bacterial community in wheat phyllosphere [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(1): 134-141.
- [17] Li H M, Cheng L, Wang B L, *et al.* Analysis of Ammonia Oxidizing Bacteria Diversity in Paddy Soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, **20**(5): 111-116.
- [18] Geets J, De Cooman M, Wittebolle L, *et al.* Real-time PCR assay for the simultaneous quantification of nitrifying and denitrifying bacteria in activated sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **75**(1): 211-221.
- [19] Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. Microbial biomass measured as total lipid phosphate in soils of different organic content[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1991, **14**(3): 151-163.
- [20] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and Lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **29**(2): 111-129.
- [21] Priha O, Grayston S J, Penmanen T, *et al.* Microbial activities related to C and N cycling and microbial community structure in the rhizospheres of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* seedlings in an organic and mineral soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1999, **30**(2): 187-199.
- [22] Zak J C, Willig M R, Moorhead D L, *et al.* Functional diversity of microbial communities: A quantitative approach [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(9): 1101-1108.
- [23] Snaird J, Amann R, Huber I, *et al.* Phylogenetic analysis and in situ identification of bacteria in activated sludge[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(7): 2884-2896.
- [24] Amann R I, Ludwig W, Schleifer K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation[J]. *Microbiological Reviews*, 1995, **59**(1): 143-169.
- [25] Utåker J B, Nes I F. A qualitative evaluation of the published oligonucleotides specific for the 16S rRNA gene sequences of the ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1998, **21**(1): 72-88.
- [26] Teske A, Aim E, Regan J M, *et al.* Evolutionary relationships among ammonia-and nitrite-oxidizing bacteria [J]. *Journal of Bacteriology*, 1994, **176**(21): 6623-6630.
- [27] 王伟,彭永臻,孙亚男. 污泥回流比对分段进水 A/O 生物脱氮工艺的影响 [J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(2): 116-120.
- [28] Aakra A, Utaker J B, Nes I F. RFLP of rRNA genes and sequencing of the 16S-23S rDNA intergenic spacer region of ammonia-oxidizing bacteria: A phylogenetic approach [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1999, **49**(1): 123-130.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行