

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺和 Fe³⁺对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析

曾国驱^{1,2}, 贾晓珊^{1*}, 郑小红², 杨丽平², 孙国萍²

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 广东省微生物研究所, 广州 510070)

摘要: 采用 PCR-DGGE 技术, 对硫酸盐还原反应器 UASB 污泥驯化过程中微生物群落的变化进行了分析. 结果表明, 污泥驯化过程中, 微生物群落生物多样性与反应器硫酸盐及 COD 去除率呈明显的正相关, 微生物群落 Shannon 指数大于 3.45 时, 反应器硫酸盐去除率稳定在 95% 左右; 对 DGGE 图谱中优势条带进行回收克隆并测序表明, 污泥中微生物群落主要包含 Firmicutes、Proteobacteria、Deinococcus-Thermus 和 Chloroflexi 这 4 大类群, 分别占总数的 50.0%、28.6%、14.3% 和 7.1%; 其中厌氧发酵细菌 *Clostridium* sp. 在驯化全过程中均占优势, 但优势菌群的种类发生变化; 厌氧细菌 *Chloroflexi* sp.、*Geopsychrobacter* sp. 等在污泥驯化过程中曾成为优势菌群但之后消亡; 厌氧细菌 *Geobacter* sp. 则在污泥驯化过程中逐渐成为优势菌群; *Desulfovibrio* sp. 在污泥驯化的最后 2 个阶段成为优势菌.

关键词: 硫酸盐还原; 污泥驯化; PCR-DGGE; 微生物群落; 优势菌群

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4244-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.029

Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor

ZENG Guo-qu^{1,2}, JIA Xiao-shan¹, ZHENG Xiao-hong², YANG Li-ping², SUN Guo-ping²

(1. School of Environmental Science and Engineering of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The variations of microbial community in the sludge of sulfate-reducing UASB during domestication period were analyzed by PCR-DGGE technique. The results showed that the diversity of microbial community was strongly related to the sulfate reduction and COD removal performance. The sulfate reduction rate of the reactor was about 95% when the Shannon index of microbial community was higher than 3.45. The preponderant bands in DGGE figure were excised and cloned, and the sequencing analysis indicated there were Firmicutes, Proteobacteria, Deinococcus-Thermus and Chloroflexi in the sludge, which accounted for 50.0%, 28.6%, 14.3% and 7.1% of the total sequences of samples, respectively. The anaerobic fermentative bacteria of *Clostridium* sp. were predominant in the whole domestication period, but the predominant species was changing. Some anaerobic bacteria like *Chloroflexi* sp. and *Geopsychrobacter* sp. were detected to be dominant species, which then disappeared along with further domestication, but anaerobic bacteria *Geobacter* sp. became gradually predominant in the domestication process. Species of *Desulfovibrio* sp. were detected to be predominant only in the last two phases of domestication.

Key words: sulfate-reducing; domestication of the sludge; PCR-DGGE; microbial community; predominant bacteria

厌氧污泥是多种厌氧微生物形成的复杂聚集体, 不同处理工艺内污泥中微生物群落的研究成为废水处理反应器的研究热点. 反应器内微生物的群落结构的变化及生态演替受生态因子如温度^[1, 2]、pH^[2]、氧化还原电位^[3]、反应器进水成分^[4]、进水碳硫比^[5, 6]等的影响; 同时, 微生物种群的分布^[10]、不同微生物种群之间存在的协同^[11]和竞争制约^[12]生态学效应等, 直接影响着反应器的处理效果.

厌氧污泥的驯化是 UASB 等厌氧反应器运行的关键, 对厌氧污泥驯化过程中微生物生态结构的变化及群落演替的研究具有重要的意义. 近年来不依赖纯培养的分子生物学的方法发展迅速, 也得到广泛的应用^[13], 其中利用 PCR-DGGE 来研究未培养或不能培养的微生物, 能够提供群落中优势种类信

息和同时分析多个样品, 适合于监测或调查种群的时空变化, 自从 1993 年被 Muyzer 等^[14]引入微生物生态学研究以来, 已广泛应用于分析活性污泥^[15]、生物滤池^[16]、生物膜^[17]、土壤^[18]、底泥^[19]、水体^[20]等各种环境中生物多样性、种群演替等方面. 本研究采用变性梯度凝胶电泳 (denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE) 技术, 通过不依赖分离培养的核酸信息对处理高浓度硫酸盐有机废水 UASB 反应器污泥驯化过程中微生物群落的变化进行了分

收稿日期: 2014-04-27; 修订日期: 2014-05-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA06Z322); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07211-003)

作者简介: 曾国驱 (1966 ~), 男, 研究员, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: zengguoqu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: eesjxs@mail. Sysu.edu.cn

析,以期为工艺优化和揭示厌氧污泥中硫酸盐生物处理机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 硫酸盐还原反应器污泥的驯化

采用 UASB 为硫酸盐还原反应器,容积为 19.4 L. 接种污泥来源于某污水处理厂 ABR 的厌氧污泥和河涌底泥的混合污泥,以人工配水进行污泥驯化. 配水成分包含葡萄糖 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 酵母抽提物 $0.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, Na_2SO_4 $1.7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MgSO_4 $0.03 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, CaCl_2 $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $0.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4Cl $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, NaHCO_3 $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 进水 pH 约为 7.0.

反应器污泥驯化采用固定进水浓度,逐渐缩短水力停留时间的方法以提高反应器硫酸盐负荷. 整个驯化过程历时 240 d,按水力停留时间的不同分为 4 个驯化阶段,其中第 0~150 d 为第 1 阶段,水力停留时间为 80 h; 第 150~180 d 为第 2 阶段,水力停留时间为 60 h; 第 180~210 d 为第 3 阶段,水力停留时间为 48 h; 第 210~240 d 为第 4 阶段,水力停留时间为 24 h.

1.2 采样

本研究共采集污泥样品 7 个,自反应器污泥驯化的 4 个不同阶段,分别于驯化开始的第 30、60、120、150、180、210 和 240 d 采用灭菌的离心管采集污泥样品,样品依次标记为 A、B、C、D、E、F 和 G. 所采集的样品直接用于基因组 DNA 的提取或冻存 -80°C 冰箱中待用,并测定 MLVSS. 此外,定期采集反应器进出水水样,测定其中 COD 和硫酸盐含量的变化.

1.3 理化分析方法

MLVSS、COD、硫酸盐采用文献[21]的方法进行测定.

1.4 变性梯度凝胶电泳(DGGE)分析微生物群落变化

1.4.1 细菌基因组总 DNA 的提取与纯化

取 5 g 污泥样品,采用 Zhou 等^[22]的方法进行总 DNA 提取. 所得 DNA 初提液采用天根公司的 DNA 纯化试剂盒进行纯化.

1.4.2 PCR 扩增及变性梯度凝胶电泳(DGGE)分析

以纯化后的细菌基因组总 DNA 为模板,采用细菌通用引物 27F 与 1492R 扩增以得到全长 16S rDNA; 再以该扩增产物为模板,采用对大多数细菌和古生菌的 16S rDNA 基因 V3 区具有特异性

的引物对 GC-341F 和 534R^[23]进行扩增.

PCR 反应在 MyCycler (Bio-Rad)上进行,50 μL 反应体系为 50 ng 的模板、20 pmol 正反向引物、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ dNTP、5 μL 的 $10\times$ PCR buffer (不含 MgCl_2)、 $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 MgCl_2 、1 U 的 ExTaq DNA 聚合酶和适量的双蒸水. 反应程序: 94°C 4 min; 94°C 45 s, 55°C 1 min, 72°C 45 s, 30 次循环; 72°C 10 min.

采用 D-code 基因突变检测系统 (Bio-Rad Laboratories Inc. USA)对 PCR 反应产物进行 DGGE 分离. 采用 8% 聚丙烯酰胺凝胶,变性剂范围为 35%~55% (100% 的变性剂定义为 $7 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 尿素和 40% 去离子甲酰胺),在 $1\times$ TAE ($40 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris, $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸, $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA, pH 7.4) 中, 60°C 、150 V 电泳 6 h,用 Goldenview 染液染色, Bio-Rad 凝胶成像系统观察并拍照.

采用 Quantity One 软件对 DGGE 图谱进行分析,对各泳道的条带数目、位置及亮度,不同样品间细菌群落相似度用 Dice 系数计算,生成相似度矩阵. 根据图谱中不同条带的光密度值,采用公式 (1) 和 (2) 计算微生物群落的 Shannon-Wiener 指数.

$$p_i = a_i / \sum (a_i) \quad (1)$$

$$H = - \sum (p_i) (\ln p_i) \quad (2)$$

式中, a_i 为泳道中 i 条带的光密度值, p_i 为 i 条带光密度值占该泳道中所有条带总光密度值的百分数, H 为微生物群落的 Shannon-Wiener 指数.

采用 SPSS 软件对驯化污泥化过程中反应器 COD 及硫酸盐去除效率、微生物群落 Shannon-Wiener 指数等参数的变化进行相关性分析,选择 Pearson 相关分析选项,软件自动完成.

1.4.3 切胶测序及系统发育分析

对 DGGE 图谱上的优势条带进行切胶回收,以 V3 区引物 (不带 GC 夹) 采用相同程序进行 PCR 扩增,扩增产物经纯化后采用 PGM-T 载体克隆至 *E. coli* Top10 后送交上海生物工程技术公司测序. 将测序结果提交 NCBI 数据库 Blast 搜索出相似性高的序列,利用 Clustal X 软件进行多序列比对,通过 Mega 5 构建系统发育树.

2 结果与讨论

2.1 微生物群落多样性及反应器处理效率变化

为考察厌氧污泥驯化过程中群落多样性的变化

情况,采集反应器驯化不同时期的污泥样品,对其进行微生物总 DNA 提取,并采用试剂盒对 DNA 初提液进行纯化,并以此为模板,采用巢式扩增,先用引物对 27F/1492R 扩增得到污泥中微生物全长 16S rDNA,再以此为模板,采用引物对 341/534 扩增得到微生物 16S rDNA V3 可变区基因,通过变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 进行分析,不同泳道分别代表反应器驯化不同天数时所取反应器泥样. 污泥驯化不同时期微生物群落变性梯度凝胶电泳图谱分析如图 1 所示. 结果表明,重复电泳的结果非常相似,重复间的相似性达 99%,7 个不同时期的污泥样品中微生物群落电泳图谱中条带的位置和数量不同,电泳条带呈现较明显的变化,显示反应器污泥驯化的不同时期,随着反应器的污泥驯化,污泥样品 DGGE 电泳图谱中条带数量增多,微生物群落结构和种群数量存在明显的演替过程. 既有一些相同的微生物种群,如条带 1、4、7、8、9 等,虽然亮度有所变化,但存在于整个驯化过程中;也有一些种群(条带)逐渐消亡或者减弱的,而一些种群(条带)逐级出现或增强;也有一些样品各自独有的种群,如第 150 d 样品的条带 3;另外还有相邻阶段共有的条带,如第 180 d 和第 210 d 样品的条带 13.

表 1 反应器驯化不同时期污泥样品 DGGE 图谱相似度

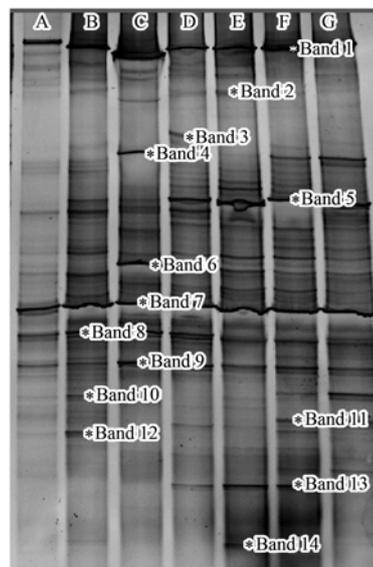
Table 1 Coefficients (Cs) comparing the similarities of the DGGE profiles at different sludge domestication stages

	A	B	C	D	E	F	G
A	100.0	42.7	26.3	42.5	40.1	25.1	33.2
B	42.7	100.0	37.8	45.6	30.7	23.8	35.6
C	26.3	37.8	100.0	36.6	27.2	23.0	27.7
D	42.5	45.6	36.6	100.0	56.9	47.1	39.8
E	40.1	30.7	27.2	56.9	100.0	33.8	51.7
F	25.1	23.8	23.0	47.1	33.8	100.0	57.0
G	33.2	35.6	27.7	39.8	51.7	57.0	100.0

D 与样品 E,以及样品 F 与样品 G 之间相似度均为 57% 左右,表明反应器驯化的第 150 ~ 180 d、第 210 ~ 240 d 这 2 个阶段污泥中微生物群落变化较小. 而从不同时期反应器处理效率(图 2)可知,恰好这 2 个阶段是反应器硫酸盐处理效率高和稳定的时期,去除率达 90% ~ 99%.

为了解驯化过程中反应器处理效率与污泥中微生物群落多样性指数变化的关系,采用 SPSS 软件,对反应器驯化时间、COD 与硫酸盐负荷及其去除效果、污泥浓度、污泥中微生物群落多样性指数进行相关性分析,结果见表 2.

结合图 2 和表 2 来分析,可见反应器硫酸盐及 COD 去除率与驯化时间、污泥浓度、污泥中微生物



A. 第 30 d, B. 第 60 d, C. 第 120 d, D. 第 150 d, E. 第 180 d, F. 第 210 d, G. 第 240 d

图 1 污泥驯化不同阶段的变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 图谱

Fig. 1 DGGE patterns of different sludge samples

采用凝胶分析软件 Quantity One 对反应器驯化不同时期污泥样品电泳图谱相似度进行分析,分析结果见表 1. 结果显示,反应器驯化相邻阶段时期,污泥中微生物群落相似度均在 30% 以上,其中样品

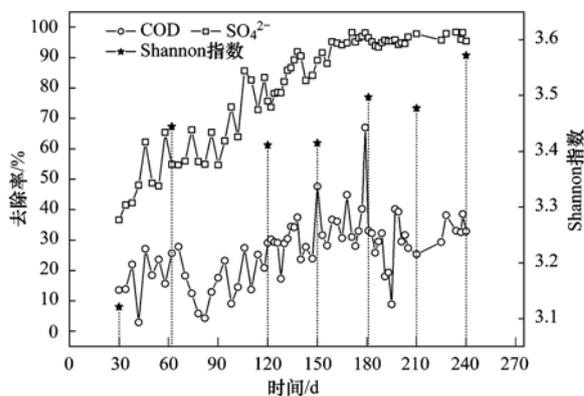


图 2 污泥驯化不同时期反应器处理效率及微生物群落多样性变化的关系

Fig. 2 Relation between removal efficiency and variation of microbial community at different sludge domestication stages

表 2 各参数相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis among parameters

		Shannon 指数	COD 去除率	硫酸盐去除率	MLVSS	COD 负荷	硫酸盐负荷	天数
Shannon 指数	Pearson Correlation							
	Sig. (2-tailed)							
	N							
COD 去除率	Pearson Correlation	0.758 *						
	Sig. (2-tailed)	0.048						
	N	7						
硫酸盐去除率	Pearson Correlation	0.825 *	0.923 **					
	Sig. (2-tailed)	0.022	0.003					
	N	7	7					
MLVSS	Pearson Correlation	0.795 *	0.903 **	0.892 **				
	Sig. (2-tailed)	0.033	0.005	0.007				
	N	7	7	7				
COD 负荷	Pearson Correlation	0.570	0.532	0.556	0.736			
	Sig. (2-tailed)	0.181	0.219	0.195	0.059			
	N	7	7	7	7			
硫酸盐负荷	Pearson Correlation	0.571	0.538	0.556	0.738	1.000 **		
	Sig. (2-tailed)	0.180	0.213	0.195	0.058	0.000		
	N	7	7	7	7	7		
天数	Pearson Correlation	0.810 *	0.880 **	0.970 **	0.924 **	0.731	0.729	
	Sig. (2-tailed)	0.027	0.009	0.000	0.003	0.062	0.063	
	N	7	7	7	7	7	7	

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

群落多样性指数呈明显的正相关。王爱杰等^[24]在产酸脱硫反应器研究中发现,在不同的群落演替阶段,每个种群的代谢活性有一定差别,表现为 COD 去除率、 SO_4^{2-} 去除率的差异。而本研究中随着污泥驯化的进行,微生物群落生物多样性得以提高,当微生物群落 Shannon 指数大于 3.45、污泥浓度大于 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,硫酸盐去除率稳定在 95% 左右,这说明反应器污泥驯化成熟,处理系统中各菌群处于良好的协同状态。

2.2 污泥中微生物系统发育分析

为了进一步分析微生物群落结构中的优势菌株和污泥中微生物的系统发育,对电泳图谱中较亮条带进行切割回收后,采用 T 载体克隆并测序进行系统发育分析见图 3。

结合图 1 和图 3 可知,反应器污泥中微生物群落中主要包含 4 大类群,其中 Firmicutes 占总数的 50.0%, Proteobacteria 占总数的 28.6%, Deinococcus-Thermus 占总数的 14.3%, Chloroflexi 占总数的 7.1%。

污泥驯化过程中出现大量属于 Firmicutes 的发酵产酸菌,如条带 1、4、7、8、9、10、14。发酵产酸

细菌能够将大分子的底物(如蔗糖、葡萄糖和果糖等)转化为乙酸、乙醇、氢气、甲醇和甲酸等易被 SRB 利用的物质;在为 SRB 提供底物,缓冲碱度变化,维持系统适合的代谢环境等方面起着决定作用^[24]。本研究中的 Firmicutes 细菌均属于梭菌属 *Clostridium* sp., 其中大部分菌群如条带 1、4、7、8、9 所代表的菌群在反应器驯化的 4 个阶段中均可监测到,为微生物群落中的优势菌属。*Clostridium* 严格厌氧,能够产 NH_3 、 H_2S 、 H_2 , 具有固氮、发酵糖类产乙酸乳酸等功能^[25]。Kaksonen 等^[26]在硫酸盐还原反应器中曾分离得到 *Clostridium* 菌株。此外,任南琪等^[27]在硫酸盐还原反应器中也监测到 *Clostridium* 的某些菌种随硫酸盐去除率的升高得以富集,在反应器中占优势。有研究表明,随着不同种类的 *Clostridium* 属细菌的出现,其代谢产生大量发酵终产物作为硫酸盐还原过程的作用底物,从而影响硫酸盐还原菌群的丰度变化^[28],由此造成硫酸盐还原菌群与 *Clostridia* 菌群呈平行的动态变化^[29]。本研究中 *Clostridium* 细菌在所监测的微生物群落中所占百分数为 50.0%,并且随着反应器硫酸盐负荷的提高,属于该属的某些种类细菌相继出现或消亡,

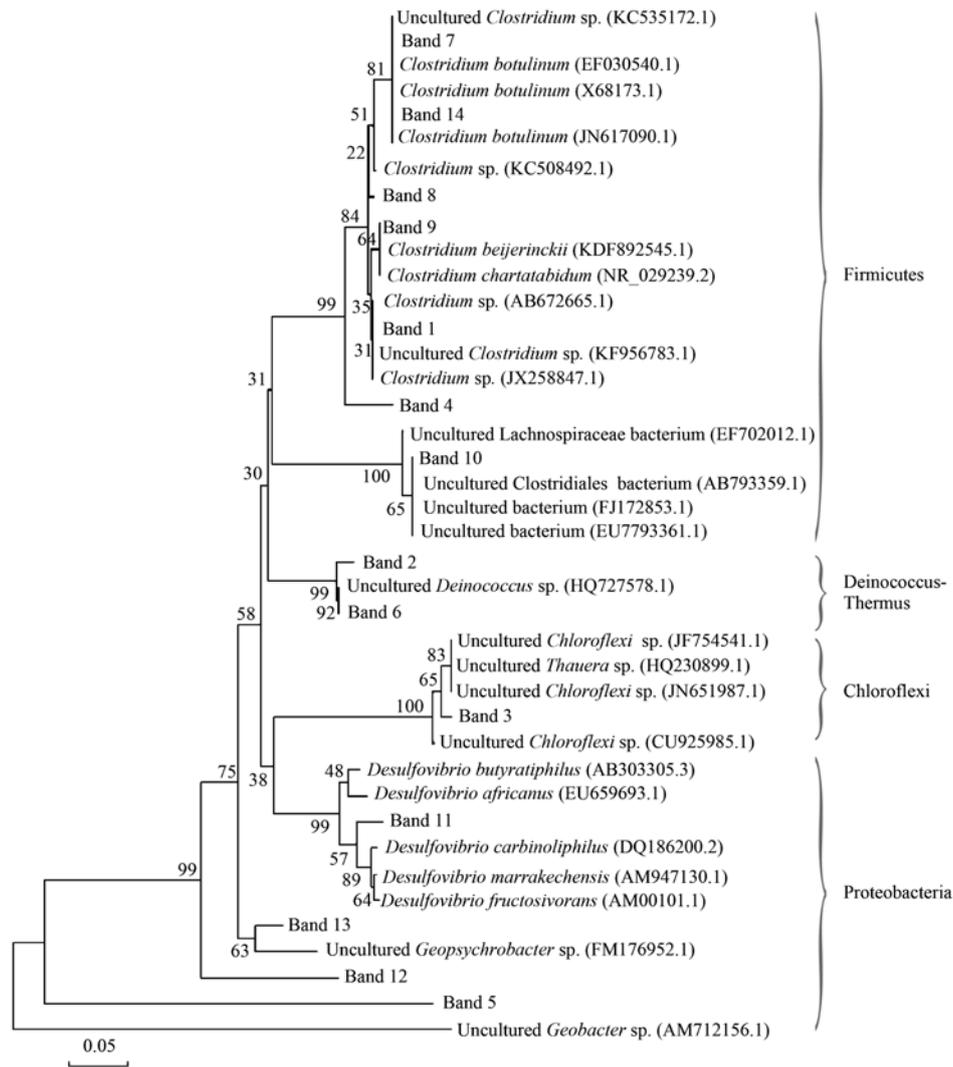


图3 基于 DGGE 条带 16S rDNA 序列的不同泥样细菌系统发育树

Fig. 3 Phylogenetic tree of bacteria in different sludge samples based on the 16S rDNA sequences of DGGE bands

由此推测该属菌群在本反应器的硫酸盐还原过程中起着重要的作用。

Chloroflexi、*Geobacter*、*Geopsychrobacter* 是废水厌氧处理系统中的常见菌^[30]，在本研究的污泥中也存在。条带 3 包含的序列属于 *Chloroflexi*，在反应器污泥驯化过程中（第 150 d）曾成为优势菌群，但后来随着反应器污泥的进一步驯化而消失。颗粒污泥中经常监测到 *Chloroflexi* 细菌，Roest 等^[31]认为污泥中的 *Chloroflexi* 细菌可能直接或间接参与丁酸盐的降解。条带 5 包含的序列属于变形菌门中的 *Geobacter sp.*，自反应器驯化的第 30 d 后开始成为反应器中的优势菌群之一，驯化至第 150 d 后，条带亮度增强。*Geobacter* 为厌氧菌，能够氧化有机物为 CO_2 ，以铁氧化物作为电子受体，被用于去除废水中有机及金属污染物^[32]。近年来在环境修复的研究

中也发现该类菌的存在^[33]。条带 12、13 包含的序列属于 *Geopsychrobacter sp.*，其中，条带 12 在第 60 d 条亮度最强，在驯化的污泥过程中亮度减弱或消失，条带 13 在污泥驯化的第 150 ~ 210 d 内占优势，该属的某些细菌具有还原元素硫及 Mn(IV) ，并氧化乙酸盐、琥珀酸盐、丙酸盐的功能^[34]。

本研究在污泥驯化的第 1 及第 2 阶段（第 0 ~ 180 d）硫酸盐还原菌属均未占优势，但在驯化的最后 2 个阶段（第 210 ~ 240 d）监测到 *Desulfovibrio sp.*（条带 11）占优势。*Desulfovibrio sp.* 是革兰氏阴性菌，为快速生长的硫酸盐还原菌，能够部分氧化某些有机物为乙酸盐和 CO_2 ^[35]，并利用氢为能源，以 H^+ 为电子受体，还原硫酸盐为硫化物^[36]。本研究中仅监测到这一类硫酸盐还原菌群，是由于人工配水驯

化,底物单一的原因. 此外,*Desulfovibrio* 占优势的 2 个阶段,反应器硫酸盐去除效率最高,为 95% 以上,可见 *Desulfovibrio* 的数量与硫酸盐去除率间存在明显的正相关,因此该菌属的数量与活性是影响反应器硫酸盐去除效率的重要因素. 这些结果与任南琪等^[27]的研究结果一致.

此外,条带 2、6 所包含的序列属于异常球菌-栖热菌门 (*Deinococcus-Thermus*),它们在微生物生态系统中所起的作用尚不明确,还有待进一步探索.

3 结论

(1) 反应器污泥驯化过程中,微生物群落生物多样性与反应器硫酸盐及 COD 去除率呈明显的正相关关系. 当微生物群落 Shannon 指数大于 3.45、污泥浓度大于 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,硫酸盐去除率稳定在 95% 左右,处理系统中各菌群处于良好的协同状态.

(2) 反应器污泥中微生物群落主要包含 Firmicutes、Proteobacteria、*Deinococcus-Thermus*、Chloroflexi 4 大类群,分别占总数的 50.0%、28.6%、14.3% 和 7.1%. 随着反应器污泥的驯化,污泥的微生物群落结构和种群数量存在明显的演替过程. 其中厌氧发酵细菌 *Clostridium* sp. 在驯化全过程中均占优势,但优势菌群的种类发生变化;厌氧细菌 *Chloroflexi* sp. 在反应器驯化污泥第 150 d 曾成为优势菌群,但后来随着反应器污泥的进一步驯化而消失;厌氧细菌 *Geobacter* sp. 自反应器驯化的第 30 d 后开始成为反应器中的优势菌群之一,驯化至第 150 d 后,成为优势菌群;厌氧细菌 *Geopsychrobacter* sp. 在污泥驯化过程中相继出现或消亡;*Desulfovibrio* sp. 在污泥驯化的最后 2 个阶段占优势.

参考文献:

- [1] 李津,左剑恶,邢薇. EGSB 反应器在 20℃ 下处理啤酒废水的工艺及微生物学研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 990-995.
- [2] Liu W T, Chan O C, Fang H H P. Microbial community dynamics during start-up of acidogenic anaerobic reactors[J]. Water Research, 2002, **36**(13): 3203-3210.
- [3] 赵丹,任南琪,王爱杰,等. 产酸相稳定发酵类型微生物生态学研究[J]. 环境科学与技术, 2003, **26**(6): 37-38, 48.
- [4] 张斌,孙宝盛,刘慧娜,等. 处理不同废水 MBR 系统中微生物群落结构的比较[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2944-2949.
- [5] 任南琪,王爱杰. 产酸脱硫反应器中碳硫比对群落生态特征的影响[J]. 环境科学, 2002, **23**(4): 52-56.
- [6] 王爱杰,任南琪,黄志,等. 产酸脱硫反应器中 COD/SO₄²⁻ 比制约的群落生态演替规律[J]. 环境科学, 2002, **23**(2): 34-38.
- [7] 苏俊峰,马放,王弘宇,等. 利用 PCR-DGGE 技术分析生物陶粒硝化反应器中微生物群落动态[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(3): 386-390.
- [8] Ding Y, Wu W X, Han Z Y, et al. Correlation of reactor performance and bacterial community composition during the removal of trimethylamine in three-stage biofilters [J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, **38**(2): 248-258.
- [9] Miura Y, Hiraiwa M N, Ito T, et al. Bacterial community structures in MBRs treating municipal wastewater: Relationship between community stability and reactor performance[J]. Water Research, 2007, **41**(3): 627-637.
- [10] 任随周,郭俊,曾国驱,等. 处理印染废水的厌氧折流板反应器中的微生物种群组成及分布规律[J]. 生态学报, 2005, **25**(9): 2297-2303.
- [11] 刘广民,任南琪,王爱杰,等. 产酸-硫酸盐还原系统中产酸菌的发酵类型及其与 SRB 的协同作用[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(5): 782-788.
- [12] Colleran E, Pender S. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of sulphate-containing wastewaters[J]. Water Science and Technology, 2002, **45**(10): 231-235.
- [13] Sanz J L, Kochling T. Molecular biology techniques used in wastewater treatment: An overview[J]. Process Biochemistry, 2007, **42**(2): 119-133.
- [14] Muyzer G, de Waal E C, Uitterlinden A G. Profiling of complex microbial population by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes encoding for 16S rRNA[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, **59**(3): 695-700.
- [15] 刘新春,吴成强,张昱,等. PCR-DGGE 法用于活性污泥系统中微生物群落结构变化的解析[J]. 生态学报, 2005, **25**(4): 842-847.
- [16] 李建军,廖东奇,许玫英,等. 生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2552-2559.
- [17] 欧阳科,刘俊新. 膜生物反应器与传统活性污泥反应器内生物群落特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 499-503.
- [18] 罗海峰,齐鸿雁,薛凯,等. PCR-DGGE 技术在农田土壤微生物多样性研究中的应用[J]. 生态学报, 2003, **23**(8): 1570-1575.
- [19] Aburto-Medina A, Adetutu E M, Aleer S, et al. Comparison of indigenous and exogenous microbial populations during slurry phase biodegradation of long-term hydrocarbon-contaminated soil [J]. Biodegradation, 2012, **23**(6): 813-822.
- [20] 刘敏,朱开玲,李洪波,等. 应用 PCR-DGGE 技术分析黄海冷水团海域的细菌群落组成[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1082-1091.
- [21] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. (20th ed.). USA Washington DC: American Public Health Association, 1998.

- [22] Zhou J Z, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(2): 316-322.
- [23] 郑小红,肖琳,任晶,等. 玄武湖微囊藻水华暴发及衰退期细菌群落变化分析 [J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2956-2962.
- [24] 王爱杰,任南琪,刘伟,等. 产酸脱硫反应器中SRB种群的功能与地位 [J]. 中国环境科学, 2001, **21**(2): 119-123.
- [25] Matthies C, Kuhner C H, Acker G, et al. *Clostridium uliginosum* sp. nov., a novel acid-tolerant, anaerobic bacterium with connecting filaments [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2001, **51**(3): 1119-1125.
- [26] Kaksonen A H, Plumb J J, Robertson W J, et al. Culturable diversity and community fatty acid profiling of sulfate-reducing fluidized-bed reactors treating acidic, metal-containing wastewater [J]. Geomicrobiology Journal, 2004, **21**(7): 469-480.
- [27] 任南琪,赵阳国,王爱杰,等. PCR-SSCP 技术分析碱度影响下硫酸盐还原反应器中微生物群落动态 [J]. 中国科学(C 辑): 生命科学, 2006, **36**(1): 51-58.
- [28] Vladár P, Ruzsnyák A, Márialigeti K, et al. Diversity of sulfate-reducing bacteria inhabiting the rhizosphere of phragmites australis in Lake Velencei (Hungary) revealed by a combined cultivation-based and molecular approach [J]. Microbial Ecology, 2008, **56**(1): 64-75.
- [29] Mallet C, Basset M, Fonty G, et al. Microbial population dynamics in the sediments of a eutrophic lake (Aydat, France) and characterization of some heterotrophic bacterial isolates [J]. Microbial Ecology, 2004, **48**(1): 66-77.
- [30] Björnsson L, Hugenholtz P, Tyson G W, et al. Filamentous Chloroflexi (green non-sulfur bacteria) are abundant in wastewater treatment processes with biological nutrient removal [J]. Microbiology, 2002, **148**(8): 2309-2318.
- [31] Roest K, Heilig H G H J, Smidt H, et al. Community analysis of a full-scale anaerobic bioreactor treating paper mill wastewater [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2005, **28**(2): 175-185.
- [32] Cord-Ruwisch R, Lovley D R, Schink B. Growth of *Geobacter sulfurreducens* with acetate in syntrophic cooperation with hydrogen-oxidizing anaerobic partners [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(6): 2232-2236.
- [33] Ramos D T, da Silva M L B, Chiaranda H S, et al. Biostimulation of anaerobic BTEX biodegradation under fermentative methanogenic conditions at source-zone groundwater contaminated with a biodiesel blend (B20) [J]. Biodegradation, 2013, **24**(3): 333-341.
- [34] Vandieken V, Mussmann M, Niemann H et al. *Desulfuromonas svalbardensis* sp. nov. and *Desulfuromusa ferrireducens* sp. nov., psychrophilic, Fe(III)-reducing bacteria isolated from Arctic sediments, Svalbard [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, **56**(5): 1133-1139.
- [35] Widdel F, Hansen T A. The dissimilatory sulfate- and sulfur-reducing bacteria [A]. In: The Prokaryotes [M]. (2nd ed.). New York: Springer, 1992. 583-624.
- [36] Oude Elferink S J W H, Vorstman W J C, Sopjes A, et al. Characterization of the sulfate-reducing and syntrophic population in granular sludge from a full-scale anaerobic reactor treating papermill wastewater [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1998, **27**(2): 185-194.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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