

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征

席婧茹, 刘素琴, 李琳*, 刘俊新

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 甲烷的温室效应是二氧化碳的 26 倍, 高浓度硫酸盐废水对水体、土壤和植物均有危害. 硫酸盐为氧化剂的甲烷厌氧氧化是减少甲烷的主要途径之一. 本研究以硫酸盐作为电子受体, 驯化培养硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群, 采用 PCR-DGGE 技术分析细菌和古菌菌群多样性和群落结构特征, 并对其中的优势菌进行系统发育分析. DGGE 指纹图谱结果表明, 硫酸盐的加入使微生物群落结构和优势种群数量发生了明显的改变, 其增强了甲烷氧化古菌和硫酸盐还原细菌的丰度, 加入硫酸盐驯化的菌群, 其细菌群落多样性增加而古菌群落多样性略微减少. 典型条带测序结果显示, 驯化后菌群的优势菌种主要包括螺旋体门 (*Spirochaetes*), 除硫单胞菌目 (*Desulfuromonadales*)、甲烷八叠球菌目 (*Methanosarcinales*) 和甲烷丝状菌属 (*Methanosaeta*) 等. 驯化菌群的甲烷厌氧氧化研究结果显示, 甲烷厌氧氧化的同时伴随硫酸盐的还原, 甲烷的氧化产物为二氧化碳, 硫酸盐的转化产物为硫化氢和硫单质.

关键词: 甲烷厌氧氧化; 硫酸盐还原; 驯化; 菌群; 群落结构特征

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4602-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.12.025

Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation

XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, LIU Jun-xin

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The greenhouse effect of methane is 26 times worse than that of carbon dioxide, and wastewater containing high concentrations of sulfate is harmful to water, soil and plants. Therefore, anaerobic oxidation of methane driven by sulfate is one of the effective ways for methane reduction. In this paper, with sulfate as the electron acceptor, a microbial consortium capable of oxidizing methane under anaerobic condition was cultured. The diversity and characteristics of bacterial and archaeal community were investigated by PCR-DGGE, and phylogenetic analysis of the dominant microorganisms was also carried out. The DGGE fingerprints showed that microbial community structure changed distinctly, and the abundance of methane-oxidizing archaea and sulfate-reducing bacteria increased in the acclimatization system added sulfate. After acclimatization, the bacterial diversity increased, while archaea diversity decreased slightly. The representative bands in the DGGE profiles were excised and sequenced. Results indicated that the dominant species in the acclimatization system were *Spirochaetes*, *Desulfuromonadales*, *Methanosarcinales*, *Methanosaeta*. Methane converted into carbon dioxide while sulfate transformed into hydrogen sulfide and sulfur in the process of anaerobic methane oxidation accompanied by sulphate reduction.

Key words: anaerobic oxidation of methane; sulfate reduction; acclimatization; microorganisms; microbial community structure

在污水厌氧处理、污泥浓缩与消化以及垃圾填埋过程中有大量的甲烷生成. 甲烷属于温室气体, 其温室效应是二氧化碳的 26 倍^[1]. 而且甲烷还是危险气体, 其在空气中的体积分数为 5% ~ 15% 时极易发生爆炸. 甲烷的厌氧氧化是减少甲烷的主要途径之一. 每年有 0.3 Gt (1 Gt = 10¹⁵ g) 的甲烷经厌氧反应被消除. 多位研究者相继发现在海底沉积层中, 伴随甲烷的减少, 有硫酸盐还原反应发生, 并且检测到能够利用硫酸盐厌氧氧化甲烷的活性物质^[2, 3]. 在厌氧条件下, 厌氧甲烷氧化菌利用硫酸盐将甲烷氧化为二氧化碳, 硫酸盐还原为硫离子. 垃圾渗滤液、食品医药生产废水、工业废水以及矿山废水中含有大量的硫酸盐. 硫酸盐排入水体, 会引起水体酸化、土壤板结等问题^[4]. 利用含硫酸盐

的废水处理含甲烷的废气, 是废气与废水协同处理的一个有效途径.

本研究采用硫酸盐作为电子受体氧化甲烷. 驯化培养硫酸盐还原-甲烷厌氧氧化菌群, 采用聚合酶链反应-变性梯度胶电泳 (PCR-DGGE) 指纹图谱技术分析菌群多样性和群落结构特征, 通过其甲烷氧化效果, 以期为该菌群应用于甲烷与硫酸盐的协同处理提供科学依据.

收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178451); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2010ZX07319-001)

作者简介: 席婧茹 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为挥发性有机物和恶臭物质生物处理技术, E-mail: xijingru@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: leel@rcees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 甲烷厌氧氧化-硫酸盐还原菌群的驯化方法

甲烷厌氧氧化-硫酸盐还原菌群的驯化接种物取自北京某污水处理厂厌氧段污泥,污泥性质见表 1. 将接种物与营养液按一定比例混合,混合液的污泥浓度为 $2\,800\sim3\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, K_2SO_4 的浓度为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 营养液的成分为: $\text{NaCl}\ 2.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2\ 0.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgCl}_2\cdot6\text{H}_2\text{O}\ 3.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{FeCl}_2\cdot4\text{H}_2\text{O}\ 0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4\text{Cl}\ 1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 7.2, 所用试剂均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司生产. 混合液加入

100 mL 血清瓶中再通入 50 mL 甲烷(60%, 余气为氦气, 北京华元气体化工有限公司), 将血清瓶密封后放入恒温摇床(30°C , $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 厌氧培养. 每隔 30 d, 取出 10 mL 混合液转入相同营养液中, 再通入 50 mL 浓度为 60% 甲烷, 相同条件下继续培养、驯化. 定期取样, 测定反应瓶中甲烷、硫酸钾及其产物的量, 监测反应效果. 3 个月后, 反应瓶内的甲烷浓度持续减少, 驯化完成. 为了对比不同条件下的驯化效果及菌群特征, 设计了系列驯化试验, 试验条件列于表 2. 用驯化好的混合菌群在相同条件下进行甲烷厌氧氧化研究.

表 1 污泥性质

Table 1 Characteristics of sludge

有机质含量 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	无机质含量 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TOC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH 值
14 820	13 080	8 332.24	27 320	7.2

表 2 试验条件

Table 2 Conditions of test

编号	接种污泥浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	CH_4 浓度/%	K_2SO_4 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	余气
MS1	3 529	57.29	5 000	氦气
MS2	3 561	0	0	氦气
MS3	3 485	60.43	0	氦气
MS4	3 557	41.95	500	氦气
MS5	3 428	0	5 000	氦气

1.2 分析方法

甲烷、二氧化碳和硫化氢均采用气相色谱仪(安捷伦 6890N 型, 美国)检测, 外标法计算气相中相应气体浓度.

CH_4 : 氢火焰离子检测器, N_2 为载气; HP-5 毛细管柱($30\text{ m}\times0.32\text{ mm}\times0.25\text{ }\mu\text{m}$, Agilent); 进样口温度、柱温和检测器温度分别为: 50、100 和 250°C .

CO_2 : 热导检测器, He 为载气; 不锈钢填充柱 Tbx-01($2\text{ m}, \phi 2\text{ mm}$, 60~80 目); 进样口温度、柱温和检测器温度分别为: 110、100 和 250°C .

H_2S : 火焰光度检测器, N_2 为载气; DB-1701($30\text{ m}\times0.32\text{ mm}\times0.25\text{ }\mu\text{m}$, Agilent); 进样口温度、柱温和检测器温度分别为: 100、50 和 200°C .

SO_4^{2-} 浓度: DIONEX ICS1000 离子色谱仪(美国)测定.

化学需氧量(COD): HACH COD 测定仪(美国).

总有机碳(TOC): TOC-V CPH 测定仪(日本)测定.

总悬浮固体(TSS)和挥发性悬浮固体(VSS): 重量法测定(国家标准 GB/T 11901-1989).

生物相分析: 用 MOBIO Power Soil 基因组提取试剂盒(美国 Mobio)提取基因组 DNA. 选取引物 357F-GC, 517R 和 344F-GC, 522R 对提取的 DNA 分别进行细菌和古菌 16S rDNA 基因 V3 区扩增, 其序列见表 3. 扩增反应体系($50\text{ }\mu\text{L}$)包括: DNA 模板 $5\text{ }\mu\text{L}$, $10\times\text{Buffer}\ 5\text{ }\mu\text{L}$, dNTP $4\text{ }\mu\text{L}$, $\text{MgCl}_2\ 4\text{ }\mu\text{L}$, 引

表 3 PCR 引物序列^[5, 6]

Table 3 Primers of PCR

微生物类群	引物名称	引物序列
细菌	357F-GC	5'-CGCCCGCCGCGCGCGCGGGCGGGGCGGGGCACGGGGGCTACGGGAGGCAGCAG-3'
	517R	5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3'
古菌	344F-GC	5'-CGCCCGCCGCGCGCGCGGGCGGGGCGGGGCACGGGGGACGGGGHGCAGCAGGCGCGA-3'
	522R	5'-GWATTACCGCGGCKGCTG-3'

物($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)各 $1 \mu\text{L}$, Ex *Taq* 酶(Takara, 中国大连) $0.3 \mu\text{L}$, 灭菌超纯水 $29.7 \mu\text{L}$. 细菌扩增程序为: 94°C 预变性 5 min , 94°C 变性 1 min , 48°C 退火 1 min , 72°C 延伸 1 min , 30 个循环, 72°C 延伸 10 min . 古菌扩增程序为: 94°C 预变性 5 min , 94°C 变性 30 s , $68 \sim 58^\circ\text{C}$ 退火 30 s , 72°C 延伸 1 min , 10 个循环, 94°C 变性 30 s , 58°C 退火 30 s , 72°C 延伸 1 min , 20 个循环, 72°C 延伸 10 min .

采用 DCode 通用突变检测系统(美国 Bio-Rad)对 PCR 反应产物进行电泳分离, 聚丙烯酰胺凝胶浓度梯度: $6\% \sim 12\%$ (质量浓度), 凝胶变性梯度: $40\% \sim 70\%$, 上样量: $15 \mu\text{L}$, 60°C 下 65 V 电泳 16 h , SYBRE Green 染色后用 Gel Doc XR 凝胶成像仪(美国 Bio-Rad)捕获凝胶数字图像, 并用图形分析软件 Quantity One 对 DGGE 指纹图谱进行分析.

对目的条带进行切胶、扩增、纯化和克隆^[7], 使用 T7 引物($5'$ -TAATACGACTCACTATAGGG- $3'$)测序. 将获得的序列在 NCBI (National Center for Biotechnology Information, <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov>)数据库进行 BLAST (Basic local alignment search tools)分析.

以 Shannon-Weiner index (H) 表示反应体系的微生物群落多样性, 计算公式如式(1)^[8]:

$$H = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (1)$$

式中, n_i : 每个条带的峰高; i : 第 i 个泳道的条带数; N : 第 i 个泳道所有条带的总峰高.

2 结果与讨论

2.1 硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群结构特征

2.1.1 细菌菌群结构特征

细菌的 DGGE 谱图如图 1 所示. 接种物(MS2)与未加硫酸盐的驯化菌种(MS3)的 DGGE 谱图条带数量和迁移位置相似. MS2 与 MS3 体系驯化时, 都没有加入硫酸盐, MS3 加入了 60% 的甲烷, 驯化后这两个体系的菌群群落结构相近, 丰度值差异不明显. 与 MS2 和 MS3 相比, 加有硫酸盐的 MS1 体系的群落结构差异显著, 其香农指数为 3.79, 明显高于 MS2 和 MS3. 细菌群落聚类分析结果显示, MS2 和 MS3 体系的菌群群落相似性为 78%, MS1 与前两者的相似性仅为 63%. 细菌群落结构因硫酸盐的加入发生了明显变化, 并且多样性增加.

在驯化过程中, 细菌和古菌的群落结构和种群数量存在明显的演替过程, 在演替过程中, 既有原始

种群的消亡, 也有一些种群的增强, 还有始终处于优势的种群, 种群的功能地位处于动态变化中. 对比 MS1、MS2 和 MS3 的 DGGE 谱图, MS1 中增强的条带有 11 个, 即 B2、B3、B7、B9 ~ B11、B14、B16、B17、B19 和 B24. 条带 B4、B8、B12、B15、B18、B20、B22、B23 和 B25 在 MS1、MS2 和 MS3 中均有检出, 表明这些在接种物中原有的菌种在驯化过程中一直存在. 同时条带 B1、B5、B6、B13、B21 和 B26 消失, 这些种群可能因受到硫酸盐的抑制而被淘汰.

选择 26 个荧光强度较亮的 DGGE 条带(B1 ~ B26)进行切胶、纯化、克隆和测序, 所得序列在 GenBank 数据库中用 BLAST 进行同源性比较, 确定各条带所代表的细菌菌群分类地位, 分析 MS1、MS2 和 MS3 中的优势菌群. 各体系中优势细菌及其相似菌列于表 4. 大部分相似菌(相似度大于 98%)是从污水处理的厌氧消化污泥中分离得到的, 它们分别属于螺旋菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、热袍菌门、绿弯菌门、变形菌门、浮霉菌门、放线菌门及未知菌. 与 MS2 和 MS3 相比, MS1 中热袍菌门增强.

条带 B14 和 B2 是 MS1 独有的种群, 不存在于 MS2 和 MS3 中, 属于驯化过程中丰度提高显著的 2

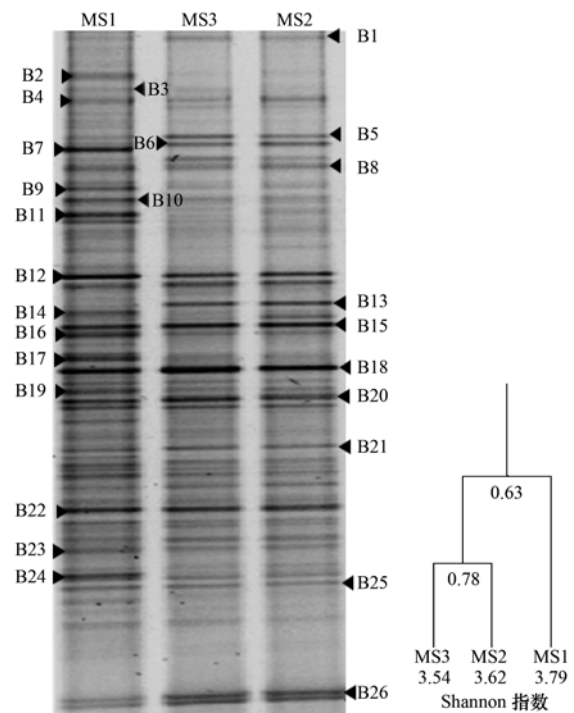


图 1 驯化过程中细菌的 DGGE 谱图和群落聚类分析

Fig. 1 DGGE fingerprint and community clustering analysis of bacteria during acclimation

个种群. 其中, 条带 B14 属于除硫单胞菌目 (Desulfuromonadales), 其相似菌分离自处理含硫酸盐废水的颗粒污泥, 能以硫酸盐或硫磺为电子受体进行无氧呼吸, 此种微生物能很好地以硫酸盐为底物进行生长^[9, 10]. B2 与紫单胞菌科中的 *Proteiniphilum* 相似, 可以将蛋白质水解为乙酸和丙酸^[11]. 大部分增强的种群具有降解有机物的性质, B7 类似于热袍菌门的 *Mesotoga*, 该类菌能在高温环境下分解碳水化合物, 产物氢可被产甲烷菌利用^[12, 13]. 与 B10 相似的鞘脂单胞菌属 (*Sphingomonas*) 对芳香化合物有极广泛的代谢能

力, 具有特殊的代谢调控机制, 可以适应营养物缺乏的环境^[14]. B11、B16、B17、B19 和 B23 的相似菌均属于螺旋体门 (*Spirochaetes*), 它们经常出现在厌氧消化污泥中, 厌氧发酵碳水化合物. 通过条带亮度可以看出, 条带 B12 和 B18 是驯化过程一直存在的优势种群, 从加乙酸盐的厌氧反应器分离的 BH62 与 B18 相似^[15]. B12 与在水稻田中发现的浮霉菌门 (*Planctomycetes*) 相似, 浮霉菌门的某些种属具有与甲烷氧化作用相关的 C 转移基因^[16, 17].

经过驯化, MS1 的细菌菌群中的优势功能种群包括硫酸盐还原菌、有机物降解菌以及产甲烷菌.

表 4 MS1、MS2、MS3 体系中优势细菌的相似菌
Table 4 Similar bacteria of the dominant bacteria in MS1, MS2, MS3

门类	条带	相似菌	分离来源	相似度/%	登录号
螺旋菌门	B11, B16, B20	Uncultured Spirochaetes bacterium MADSa69	anaerobic digester sludge	100	AB669259. 1
	B17	Uncultured Spirochaetes bacterium QEDN10AH07	mesophilic anaerobic digester which treats municipal wastewater sludge	99	CU926612. 1
	B19, B23	Uncultured Spirochaetes bacterium SWHR3	surface water	99	JQ346773. 1
拟杆菌门	B2	Uncultured <i>Proteiniphilum</i> sp. zeo1	swine manure	100	KF530887. 1
	B26	Uncultured Bacteroidetes bacterium SAO1 B74	anaerobic lab scale digester	100	JN998177. 1
厚壁菌门	B3	<i>Clostridium</i> sp. JCC	human stools	100	HG726039. 1
	B13	<i>Lactococcus garvieae</i> strain TRF1	timber rattlesnake fecal material	100	KF111340. 1
热袍菌门	B7	Thermotogales bacterium PhosAc3	— ¹⁾	99	FN611033. 2
	B9	Uncultured Thermotogae bacterium QEDR1CC12	mesophilic anaerobic digester which treats municipal wastewater sludge	99	CU922832. 1
绿弯菌门	B8	Uncultured Chloroflexi bacterium QEDN1BG08	mesophilic anaerobic digester which treats municipal wastewater sludge	99	CU925985. 1
	B22	Uncultured Chloroflexi bacterium QEDR2CF02	mesophilic anaerobic digester which treats municipal wastewater sludge	100	CU922863. 1
δ-变形菌门	B14	Uncultured Desulfuromonadales bacterium D3N26	Estuary in middle of river	90	KC006088. 1
	B15	Uncultured <i>Syntrophus</i> sp. OWB-7	petroleum hydrocarbon contaminated sludge	99	JF773293. 1
α-变形菌门	B10	<i>Sphingomonas</i> sp. NBM13	Manikaran hot spring, India	99	HQ703929. 1
浮霉菌门	B12	Uncultured Planctomycetes bacterium FeB12	Fe oxide mottles in rice field	100	AB368748. 1
放线菌门	B25	Uncultured actinobacterium 13_121-M13F_E05	mixed liquor	100	JX442892. 1
未知菌	B1	Uncultured Unclassified bacterium QEEA1CG01	mesophilic anaerobic digester which treats municipal wastewater sludge	99	CU918505. 1
	B4	Uncultured bacterium QEEA2BA07	mesophilic anaerobic digester which treats municipal wastewater sludge	99	CU918473. 1
	B5, B18	Bacterium enrichment culture BH62	mesophilic acetate-fed anaerobic reactors	99	KC961908. 1
	B6, B21	Uncultured bacterium Bact_2011_C_1A-H6	UASB granulated biomass from brewery waste waters	100	KC736282. 1
	B24	Bacterium L55B-115	Methanogenic consortium enriched with crude oil-contaminated soil	99	JF947100. 1

1) 表示文章中没有相关数据

2.1.2 古菌菌群结构特征

古菌的 DGGE 谱图显示接种物 MS2 与未加硫酸盐的驯化物 MS3 古菌菌群的群落结构相似 (图 2), 相似性达到 96%, 而与 MS1 有明显区别. MS1、MS2 和 MS3 的香农指数分别为 2.51、2.53 和

2.53, 古菌的多样性差别不明显, 加入硫酸盐的 MS1 体系古菌群落多样性略微降低.

11 个条带 (A1 ~ A11) 经切胶、测序比对后, 各体系中优势古菌及其相似菌列于表 5. 结果表明, 这些菌分别属于广古菌门和泉古菌门. 大部分相似菌

(相似度大于 98%)分离自厌氧生物反应器。

MS1 体系中增强 5 个条带,即 A1、A5、A8、A9 和 A10。其中,A1 与甲烷丝状菌属的相似度为 100%,Valentine 等^[18]在研究土壤中的甲烷厌氧氧化反应时发现该类菌具有甲烷氧化功能。根据系统发育分析,通常将甲烷厌氧氧化古菌(ANME)分为 3 个类群,即 ANME-1、ANME-2 和 ANME-3。这 3 个类群都属于广古菌门(Euryarchaeota),具有催化甲烷的厌氧氧化的生理学特征。其中 ANME-1 与甲烷八叠球菌目(Methanosarcinales)和甲烷微菌目(Methanomicrobiales)的亲缘关系较近,ANME-2 属于甲烷八叠球菌目(Methanosarcinales),ANME-3 与拟甲烷球菌属(*Methanococcoides*)亲缘关系较近^[19]。A5 的相似菌属于甲烷微菌目,与 ANME-1 亲缘关系较近。Hinrichs 等^[20]在研究某海底甲烷冷泉附近的沉积物中古菌群落发现有该类菌存在,并有甲烷水合物的分解现象。A9 与甲烷球菌目的相似度为 99%,该类菌属于能与硫酸盐还原菌共生的 ANME-2^[21, 22]。

MS1、MS2 和 MS3 有一些相同的微生物种群,如条带 A3、A7、A8、A9 和 A10,虽然亮度有所变化,但存在于整个驯化过程中,可能在微生物群落的物质和能量代谢中发挥着重要作用。其中,A7 与甲烷丝状菌属(*Methanosaeta*)相似度为 99%。A3 与甲烷囊菌属相似,该类菌是稻田土壤里发现的产甲烷菌中的一种^[23]。A4 号条带与甲烷八叠球菌属的相似度为 99%,Bryant^[24]发现其能将乙酸或甲醇代谢生成甲烷。A11 条带与甲烷杆菌科相似,属产甲烷菌。条带 A2 和 A6 驯化后明显减弱,A2 的相似菌属于甲烷囊菌属,而 A6 的相似菌属于甲烷八叠球菌目(相似度为 100%),该菌株(Methanosarcinales)分离自处理市政污水的厌氧消化污泥。硫酸盐的抑制可能是此 2 种微生物数量减少的原因。

综上所述,驯化过程中,产甲烷古菌始终处于优势的种群。硫酸盐的加入,极有可能增强了硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化古菌的丰度,使得它们也成为优势菌群。

表 5 MS1、MS2、MS3 体系中优势古菌的相似菌
Table 5 Similar archaea of the dominant archaea in MS1,MS2,MS3

门类	条带	相似菌	分离来源	相似度 /%	登录号
广古菌门	A1	Uncultured <i>Methanosaeta</i> sp. 8B	Luzhou-flavor Pit Mud	100	KF358383.1
	A2	Uncultured <i>Methanoculleus</i> sp. 11B	Luzhou-flavor Pit Mud	97	KF358386.1
	A3	<i>Methanoculleus</i> sp. Arz-ArchMG-1	Arzakan hot spring	99	JQ929040.1
	A4	Uncultured <i>Methanosarcina</i> sp. CA02	iron corrosion-inducing microbial community	99	AB854354.1
	A5	Uncultured Methanomicrobiales A1	thickened sewage sludge of methane fermentor	100	AB721087.1
	A6	Uncultured Methanosarcinales QEBH2ZC011	mesophilic anaerobic digester treating municipal wastewater sludge	100	KF198804.1
	A7	Uncultured <i>Methanosaeta</i> sp. 9B	Luzhou-flavor Pit Mud	99	KF358384.1
	A9	Uncultured Methanosarcinales LiM 2B-7A	Limonene degrading methanogenic cultures	99	FN646492.1
	A10	Uncultured Euryarchaeota clone 027D03. g	slurry of biogas-reactor	100	EU838253.1
	A11	Uncultured Methanobacteriaceae DH16	expanded granular sludge bed (EGSB) bioreactor treating wastewaters	100	GU982677.1
泉古菌门	A8	Uncultured crenarchaeote br21fP1R2arcF01	anaerobic bioreactor	100	JN394621.1

2.2 驯化过程中甲烷的变化

定期取样,测定驯化体系中甲烷的量,监测甲烷的变化。随驯化时间延长,MS1 的甲烷浓度均逐渐降低(图 3)。在驯化过程中,体系内种群的功能地位发生变化,MS1 中的甲烷氧化古菌和硫酸盐还原细菌逐渐成为优势菌群,导致甲烷浓度下降。由于产甲烷菌存在于整个驯化过程中,甲烷氧化与甲烷产生同时存在并相互竞争,引起 MS1 中的甲烷浓度出现波动。与硫酸根浓度较低的 MS4 相比,MS1 的甲烷减少更多,由初始 57.29% 减少为 35.45%。在驯化初期,MS4 的甲烷浓度由 41.95% 迅速升高至

58.56%,10 d 后缓慢下降,下降幅度低于 MS1。硫酸盐的量影响甲烷的氧化效果,在硫酸盐浓度较高的体系中甲烷氧化效果更好。

同样条件下,接种物 MS2 中的甲烷浓度持续升高。接种物为污水处理厂厌氧消化池的污泥,其有机质和无机质比例为 1.13(表 1),有机质含量较高。MS2 中产甲烷细菌、产甲烷古菌以及有机物降解菌是优势功能菌,在厌氧条件下,发生厌氧消化反应。污泥中的碳水化合物、蛋白质、脂肪、纤维素等非水溶性高分子有机物水解成溶解性的有机物质。乙酸菌将水解产物,有机物、乙醇等转变为乙

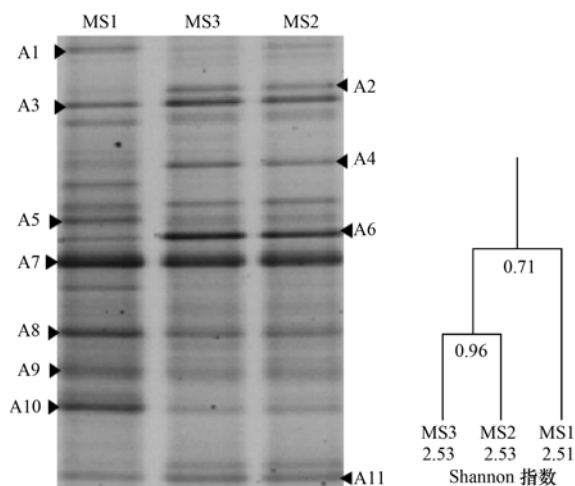


图2 驯化过程中古菌的 DGGE 谱图和群落聚类分析

Fig. 2 DGGE fingerprint and community clustering analysis of archaea during acclimation

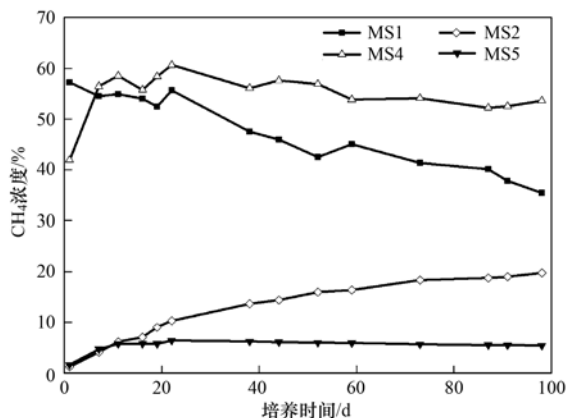
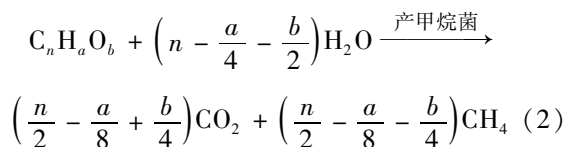


图3 MS1、MS2、MS4 和 MS5 驯化时甲烷浓度变化

Fig. 3 Concentration of methane in MS1, MS2, MS4 and MS5

酸. 污泥厌氧消化后期, 乙酸在产甲烷菌作用下转化为 CH_4 [(式(2))] [25]. 因此, MS2 中出现甲烷浓度持续升高的现象.



在加硫酸盐的 MS5 体系中, 其驯化初期甲烷浓度升高显著, 10 d 后甲烷浓度不再升高, 保持稳定, 并随驯化时间延长有下降趋势. 这可能是由于有机物降解菌和产甲烷菌是驯化初始时期的优势菌群, 因而体系以产甲烷为主; 随驯化时间的延长, 产甲烷菌受到硫酸盐的抑制, 而甲烷厌氧氧化古菌逐渐成为优势菌, 因此甲烷氧化反应逐渐占优势.

2.3 甲烷厌氧氧化-硫酸盐还原反应产物形式和菌群结构

用驯化好的混合菌群进行甲烷厌氧氧化研究, 定期取样分析反应物和产物, 监测甲烷氧化效果, 分析结果如图 4 所示. 随甲烷减少二氧化碳逐渐增多, 减少的甲烷被氧化为二氧化碳. 产生的二氧化碳一部分溶于水形成碳酸盐, 使溶液中保持一定量的无机碳. 同时反应体系中溶解性总有机碳也增加 (图 5). 以往的研究显示, 硫酸盐还原型的甲烷厌氧氧化的途径有 3 种, 每种途径的甲烷氧化过程中, 甲烷经过一系列的中间反应最终被氧化为二氧化碳, 其间反应步骤和中间产物较多, 并且反应速率缓慢. 甲醇和甲酸 [26]、乙酸和甲基化合物 [18] 以及乙酰 [27] 为不同氧化途径的中间产物. 因此, 除了微生物的自身分解和污泥的厌氧消化以外, 甲烷氧化的中间产物的产生也会增加溶解性总有机碳的量.

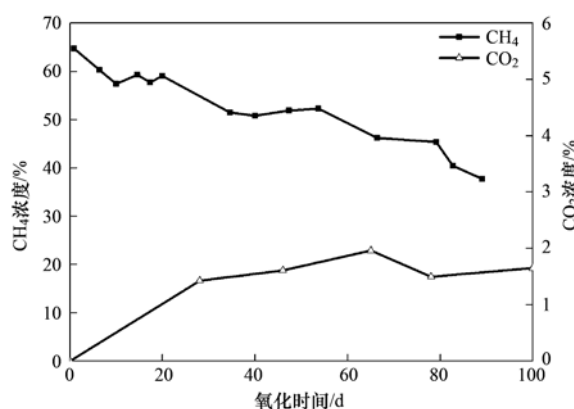


图4 甲烷氧化过程的甲烷-二氧化碳浓度变化

Fig. 4 Concentration of methane and carbon dioxide during methane oxidation

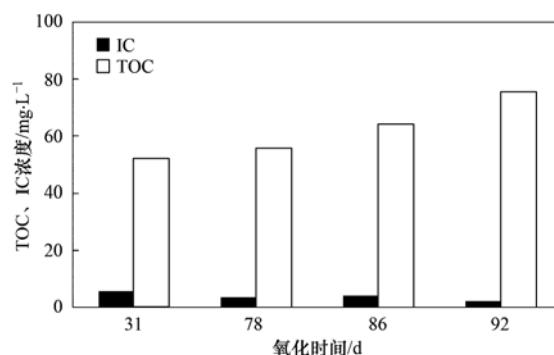
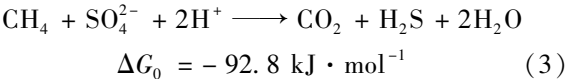


图5 甲烷氧化过程的无机碳和总有机碳浓度变化

Fig. 5 Concentration of inorganic carbon and total organic carbon during methane oxidation

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化的特点是甲烷厌氧氧化的同时伴随硫酸盐的还原, 反应过程是以 SO_4^{2-}

作为最终的电子受体,产物为 HCO_3^- 和 HS^- . 当体系中有 H^+ 时, HCO_3^- 转化为二氧化碳, HS^- 转化为 H_2S . 体系中伴随硫酸盐的减少,可以检测到硫化氢的产生(表6). 体系中发生了甲烷氧化-硫酸盐还原反应,反应式如式(3)^[19].



另外,硫酸盐的浓度还会影响产物的形式,当 SO_4^{2-} 浓度高于 $6\,200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,检测到有硫单质生成,同时硫化氢的产生量减少.

表6 甲烷氧化过程的硫酸盐和硫化氢浓度变化

Table 6 Concentration of sulfate and sulfide hydrogen during methane oxidation

反应时间/d	SO_4^{2-} 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	H_2S 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
0	2 427.95	0
13	2 386.10	0.48
31	2 293.05	2.10
78	1 973.74	1.77
86	1 880.01	2.25

3 结论

(1)经过驯化,硫酸盐还原甲烷氧化体系中种群的功能地位发生了明显变化,既有原始种群的消亡和新种群的增强,也有始终处于优势的种群. 硫酸盐的加入,使参与甲烷厌氧氧化反应的甲烷氧化古菌和硫酸盐还原细菌逐渐成为优势菌群. 同时,有机物降解菌以及产甲烷菌也是体系中的优势种群. 可见,体系中同时存在甲烷的氧化与产生两个反应过程,它们在体系中同时发生并存在相互竞争.

(2)对驯化菌群甲烷厌氧氧化功能的研究结果表明,甲烷厌氧氧化的同时伴随硫酸盐的还原. 甲烷的氧化产物为二氧化碳. 二氧化碳一部分存在于气相中,一部分溶于水形成碳酸盐. 中间产物的形成增加了反应体系中溶解性总有机碳的量. 硫酸盐的转化产物为硫化氢和硫单质. 硫化氢是一种恶臭物质,极易从溶液中逸散到空气中,形成恶臭污染. 因此,可通过调节硫酸盐浓度,使硫酸盐的还原产物以硫单质为主,以实现氧化甲烷、还原硫酸盐的同时,回收硫单质,避免恶臭.

参考文献:

[1] 吕镇梅, 闵航, 陈中云, 等. 水稻田土壤甲烷厌氧氧化在整个甲烷氧化中的贡献率[J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 13-17.

[2] Boetius A, Ravensschlag K, Schubert C J, *et al.* A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane[J]. Nature, 2000, **407**(6804): 623-626.

[3] Joye S B, Boetius A, Orcutt B N, *et al.* The anaerobic oxidation of methane and sulfate reduction in sediments from Gulf of Mexico cold seeps[J]. Chemical Geology, 2004, **205**(3): 219-238.

[4] 李宽峰, 吴鹏, 沈耀良, 等. 含硫酸盐废水处理研究现状与展望[J]. 水处理技术, 2013, **39**(11): 17-22.

[5] Kimura M, Shibagaki T, Nakajima Y, *et al.* Community structure of the microbiota in the floodwater of a Japanese paddy field estimated by restriction fragment length polymorphism and denaturing gradient gel electrophoresis pattern analyses [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **36**(4): 306-312.

[6] Vetriani C, Jannasch H W, MacGregor B J, *et al.* Population structure and phylogenetic characterization of marine benthic archaea in deep-sea sediments[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(10): 4375-4384.

[7] Zhou X, Guo X, Han Y, *et al.* Enhancing nitrogen removal in an Orbal oxidation ditch by optimization of oxygen supply: practice in a full-scale municipal wastewater treatment plant[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2012, **35**(7): 1097-1105.

[8] Li L, Gao M, Liu J. Distribution characterization of microbial aerosols emitted from a wastewater treatment plant using the Orbal oxidation ditch process [J]. Process Biochemistry, 2011, **46**(4): 910-915.

[9] Borin S, Brusetti L, Daffonchio D, *et al.* Biodiversity of prokaryotic communities in sediments of different sub-basins of the Venice lagoon[J]. Research in Microbiology, 2009, **160**(5): 307-314.

[10] Cheng T, Lin L, Wang P, *et al.* Methane-related microbial processes and metabolic stratification in a terrestrial mud volcano, southwestern Taiwan [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts, 2009.

[11] Chen S, Dong X. *Proteiniphilum acetatigenes* gen. nov., sp. nov., from a UASB reactor treating brewery wastewater [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2005, **55**(6): 2257-2261.

[12] Connors S B, Mongodin E F, Johnson M R, *et al.* Microbial biochemistry, physiology, and biotechnology of hyperthermophilic Thermotoga species[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2006, **30**(6): 872-905.

[13] Muralidharan V, Rinker K D, Hirsh I S, *et al.* Hydrogen transfer between methanogens and fermentative heterotrophs in hyperthermophilic cocultures [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1997, **56**(3): 268-278.

[14] 胡杰, 何晓红, 李大平, 等. 鞘氨醇单胞菌研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13**(3): 431-437.

[15] Chien I C, Meschke J S, Gough H L, *et al.* Characterization of persistent virus-like particles in two acetate-fed methanogenic reactors[J]. PLoS One, 2013, **8**(11): e81040.

[16] Cahyani V R, Murase J, Ikeda A, *et al.* Bacterial communities in iron mottles in the plow pan layer in a Japanese rice field: Estimation using PCR-DGGE and sequencing analyses[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2008, **54**(5): 711-717.

- [17] Chistoserdova L, Jenkins C, Kalyuzhnaya M G, *et al.* The enigmatic planctomycetes may hold a key to the origins of methanogenesis and methylotrophy [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2004, **21**(7): 1234-1241.
- [18] Valentine D L, Reeburgh W S. New perspectives on anaerobic methane oxidation [J]. *Environmental Microbiology*, 2000, **2**(5): 477-484.
- [19] Caldwell S L, Laidler J R, Brewer E A, *et al.* Anaerobic oxidation of methane: mechanisms, bioenergetics, and the ecology of associated microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(18): 6791-6799.
- [20] Hinrichs K U, Hayes J M, Sylva S P, *et al.* Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments [J]. *Nature*, 1999, **398**(6730): 802-805.
- [21] Hallam S J, Girguis P R, Preston C M, *et al.* Identification of methyl coenzyme M reductase A (*mcrA*) genes associated with methane-oxidizing archaea [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(9): 5483-5491.
- [22] Orphan V J, House C H, Hinrichs K U, *et al.* Methane-consuming archaea revealed by directly coupled isotopic and phylogenetic analysis [J]. *Science*, 2001, **293**(5529): 484-487.
- [23] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, **37**(1): 25-50.
- [24] Bryant M. Microbial methane production-theoretical aspects [J]. *Journal of Animal Science*, 1979, **48**(1): 193-201.
- [25] Buswell A, Mueller H. Mechanism of methane fermentation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952, **44**(3): 550-552.
- [26] Zehnder A, Brock T. Methane formation and methane oxidation by methanogenic bacteria [J]. *Journal of Bacteriology*, 1979, **137**(1): 420-432.
- [27] Hinrichs K U, Boetius A. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry [A]. In: *Ocean Margin Systems* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. 457-477.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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