

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态

田琪^{1,2}, 王佳¹, 范晓蕾², 罗生军², 郭荣波², 邱艳玲^{2*}

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 2. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所生物燃料重点实验室, 青岛 266101)

摘要: 海洋产甲烷古菌是与海洋中甲烷的产生、释放及天然气水合物的形成等密切相关的微生物类群。以产甲烷菌可能利用的底物为碳源, 评价了海洋油气田沉积物的产甲烷活性。结果表明, 海洋油气田沉积物对于 H_2/CO_2 、甲醇、一甲胺、三甲胺, 在 25℃ 和 37℃ 两种温度条件下都具有较高的产甲烷活性, 少数样品只在 37℃ 对乙酸有产甲烷活性, 说明在海洋油气田环境下, 主要有氢营养型及甲基营养型发酵途径产生天然气甲烷。利用厌氧培养法对产甲烷菌进行了多样性解析, 16S rRNA 基因测序显示, 优势产甲烷菌主要属于 Methanosarcinales 目的 Methanosarcinaceae 科及 Methanomicrobiales 目的 Methanomicrobiaceae 科, 其中 *Methanococcoides*、*Methanogenium* 和 *Methanosarcina* 为油气田沉积物的主要菌属。

关键词: 海洋油气田; 产甲烷活性; 产甲烷菌; 多样性; 16S rRNA 基因

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2322-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.039

Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments

TIAN Qi^{1,2}, WANG Jia¹, FAN Xiao-lei², LUO Sheng-jun², GUO Rong-bo², QIU Yan-ling²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China)

Abstract: Methanogens play an important role in marine sediments, which are related to methane production and methane hydrate deposits. Methanogenic activity of marine gas field sediments was investigated using substrates that methanogens usually used as carbon sources. H_2/CO_2 , methanol, methylamines and trimethylamines could support the growth and methane production of gas field sediments. 16S rRNA gene sequence analysis indicated that the predominant methanogens in the enrichment cultures were related to known cultured methanogens in the family Methanosarcinaceae of the order Methanosarcinales and the family Methanomicrobiales of the order Methanomicrobiales, with genera *Methanococcoides*, *Methanogenium* and *Methanosarcina* as major methanogens.

Key words: marine gas field; methanogenic activity; methanogen; diversity; 16S rRNA gene

海底生物圈蕴藏着巨大的生物量, 在全球生物化学循环过程中起着重要作用。海洋沉积物等极端环境中蕴藏着大量的细菌和古菌^[1,2]。据估计, 深海沉积物中的微生物数量约占地球上微生物总量的 1/2 ~ 5/6, 占地球生物量的 1/10 ~ 1/3^[3,4]。古菌类群是深海沉积物中的优势类群, 其中产甲烷菌被认为是促进油气田及碳水化合物形成过程中的重要微生物。海洋沉积物中含有动植物残骸, 存在着不同的有机物, 促进了厌氧微生物的生长。大量研究表明一些天然气田和海洋中的碳水化合物主要是由生物成因的甲烷形成的^[5,6]。Grabowski 等^[7]对低温油藏样品中的产甲烷菌进行了解析, 发现分子生物学方法鉴定的优势产甲烷菌与培养法获得的产甲烷菌相吻合。该结果说明对于低温油藏环境来说, 培养法获得的产甲烷菌在很大程度上代表油气藏中优势产甲烷菌的实际情况, 传统培养法是研究油气藏环境中产甲烷菌的一种有效手段。目前, 有关油藏中微生物群落的研究较多, 但是生物成因天然气田中的相关微生物群落信息较少。海洋产甲烷古菌是环

境与能源领域密切相关的微生物类群, 其研究对于海洋油气田中甲烷形成机制、天然气水合物的开发及二氧化碳固定具有重要意义。本研究考察了海洋油气田样品的产甲烷活性, 利用培养法对其中的产甲烷微生物多样性进行了解析。

1 材料与方法

1.1 样品采集及培养基

采用 3 种海洋油气田沉积物作为考察对象, 样品 pH 在 7.3 ~ 7.8 之间(表 1)。东海油气田沉积物(代号 EG), 于 2012 年 7 月采集; 渤海油气田沉积物 2 种(代号 BO1, BO2), 于 2012 年 11 月由中国海洋大学“东方红 2”号考察船采集。沉积物的采集使用抓斗式采泥器, 沉积物采集后放入 50 mL 无菌离

收稿日期: 2013-10-31; 修订日期: 2013-12-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA052103); 国家自然科学基金项目(311091918); 青岛市引进专项计划项目(11-2-4-15-YX); 泰山学者建设工程项目

作者简介: 田琪(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: tianqi_0425@aliyun.com

* 通讯联系人, E-mail: qiyul@qibebt.ac.cn

表 1 海洋沉积物样品特性¹⁾

Table 1 Characteristics of samples collected from marine sediments

样品	来源	深度/m	pH	经度	纬度
EG	东海	—	7.3	—	—
BO1	渤海	27.5	7.4	120°11.733'E	38°20.126'N
BO2	渤海	25	7.8	119°47.567'E	38°19.858'N

1) “—”表示未能获取相关信息

心管中 4℃ 保存。

产甲烷活性实验及产甲烷菌的分离培养,采用不含硫酸盐的人工海水培养基。因为硫酸盐的存在会促进硫酸还原菌的生长,对产甲烷古菌产生竞争作用,而且有可能消耗甲烷^[8]。培养基以氮气和二氧化碳混合气体 ($N_2:CO_2=80:20$, 体积比) 置换液体培养基中的气体。本研究采集样品的 pH 为 7.5 左右,而且大量研究表明偏碱性有利于大多数产甲烷菌的生长,因此本实验采用的培养基 pH 为 7.5。

1.2 产甲烷活性评价

产甲烷活性实验以 H_2/CO_2 (80:20, 体积比, 0.2 MPa)、甲酸、乙酸、甲醇、一甲胺、三甲胺、2-丙醇、2-丁醇等($5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)作为评价指标,利用气相色谱定期测量甲烷产量,评价油气田沉积物对不同底物的产甲烷活性。沉积物样品用 PBS 磷酸缓冲液清洗 2 次以除去碳源,将沉积物用培养基悬浮,转移到 60 mL 血清瓶中(液体 20 mL),于 25℃ 和 37℃ 避光静置培养。实验周期为 60 d,每隔 7 d 测定甲烷产量。氢气及甲烷采用 SP-6890 型气相色谱测定^[9]。

1.3 产甲烷菌的富集培养

为获得油气田中优势产甲烷菌,以上述具有产甲烷潜力的培养系为植种源,进行富集培养。以甲烷产量为判断指标,当甲烷产量接近理论产量的 50%~80%,传代培养于新鲜培养基中,接种量为 10%。对于富集的培养系,采用液体系列稀释法、亨盖特滚管技术,添加抗生素等各种传统分离培养方法进行产甲烷菌的分离纯化。固体培养基采用高纯琼脂(2%)作为凝胶物质。选用氨苄西林(ampicillin)、盘尼西林(penicillin)、卡那霉素(kanamycin)及四环素(treptomycin)这 4 种抗生素进行产甲烷菌的纯化。

1.4 DNA 提取、PCR 扩增及系统解析

采用直接测序法对高度富集或纯化的培养系进行了解析。DNA 提取采用玻璃珠及氯仿-苯酚提取法。16S rRNA 基因的 PCR (Polymerase Chain Reaction) 反应采用产甲烷古菌的特异性引物 ARC 109F - UNIV 1492R^[9]。PCR 产物用天根生化科技有限公司的试剂盒纯化 (TIAN quick Midi

Purification Kit),测序由上海桑尼生物科技有限公司完成,于 GenBank 数据库进行序列比对。

2 结果与分析

2.1 油气田沉积物产甲烷活性

产甲烷潜力实验(图 1)可以反映海洋沉积物中产甲烷菌的微生物活性。以 3 种海洋油气田沉积物

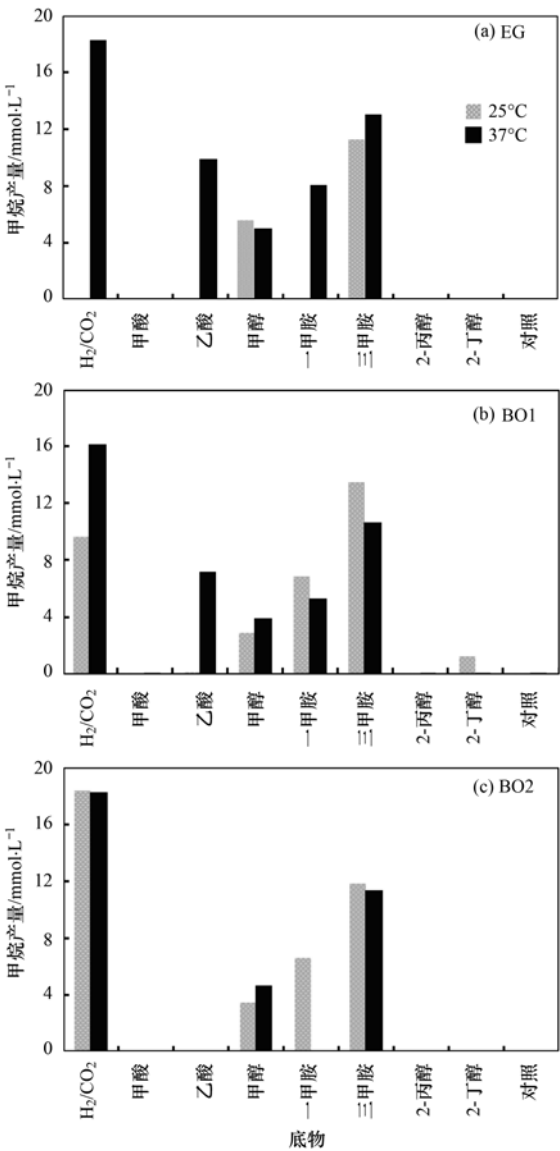


图 1 油气田样品对不同底物的 60 d 甲烷产量

Fig. 1 Methane production from different substrates by gas field samples after 60 days incubation

作为研究对象,以产甲烷菌可能利用的底物作为碳源:①氢营养型, H_2/CO_2 及甲酸;②乙酸发酵型,乙酸;③甲基发酵型,甲基类化合物(如甲醇、一甲胺、三甲胺)及其他一些醇类(如2-丙醇、2-丁醇).海水温度接近 $25^\circ C$,而大部分产甲烷菌在中温 $37^\circ C$ 条件下生长更快,因此采用 $25^\circ C$ 和 $37^\circ C$ 评价产甲烷菌活性.如图1所示,3种样品在60 d实验周期,对于不同底物两种温度下的产甲烷活性如下:甲醇>三甲胺> H_2/CO_2 >一甲胺;氢营养型底物主要是 H_2/CO_2 ,3种样品在 $25^\circ C$ 及 $37^\circ C$ 都有较高的氢气利用活性;以一甲胺为底物时,同一样品对于培养温度具有选择性,如东海样品只在 $37^\circ C$ 有活性,而渤海-2样品只在 $25^\circ C$ 有活性;乙酸为底物时,东海与渤海-1这2种油气田样品在 $37^\circ C$ 有活性,而 $25^\circ C$ 条件下培养6个月均没有活性;以甲酸、2-丙醇、2-丁

醇为底物时都没有甲烷产生,延长培养6个月也没有活性(数据未显示).活性实验结果表明,在海洋油气田环境下,主要是氢营养及甲基营养型途径产生天然气甲烷.不同来源的海洋油气田沉积物,在不同底物和温度下,表现了复杂的产甲烷活性,整体来说 $37^\circ C$ 培养条件的产甲烷速率高于 $25^\circ C$.

2.2 产甲烷菌的富集培养

以具有产甲烷活性的培养系为接种源,以 H_2/CO_2 、甲醇、一甲胺及三甲胺作为底物,进行传代培养.获得了具有产甲烷活性的培养系23个,其中甲醇的活性最高,传代频率为3~5 d、三甲胺为5~7 d、 H_2/CO_2 为1~2周、一甲胺为1~3周.采用各种传统分离培养方法进行产甲烷菌的分离纯化,获得的海洋产甲烷培养系及菌株如图2所示.

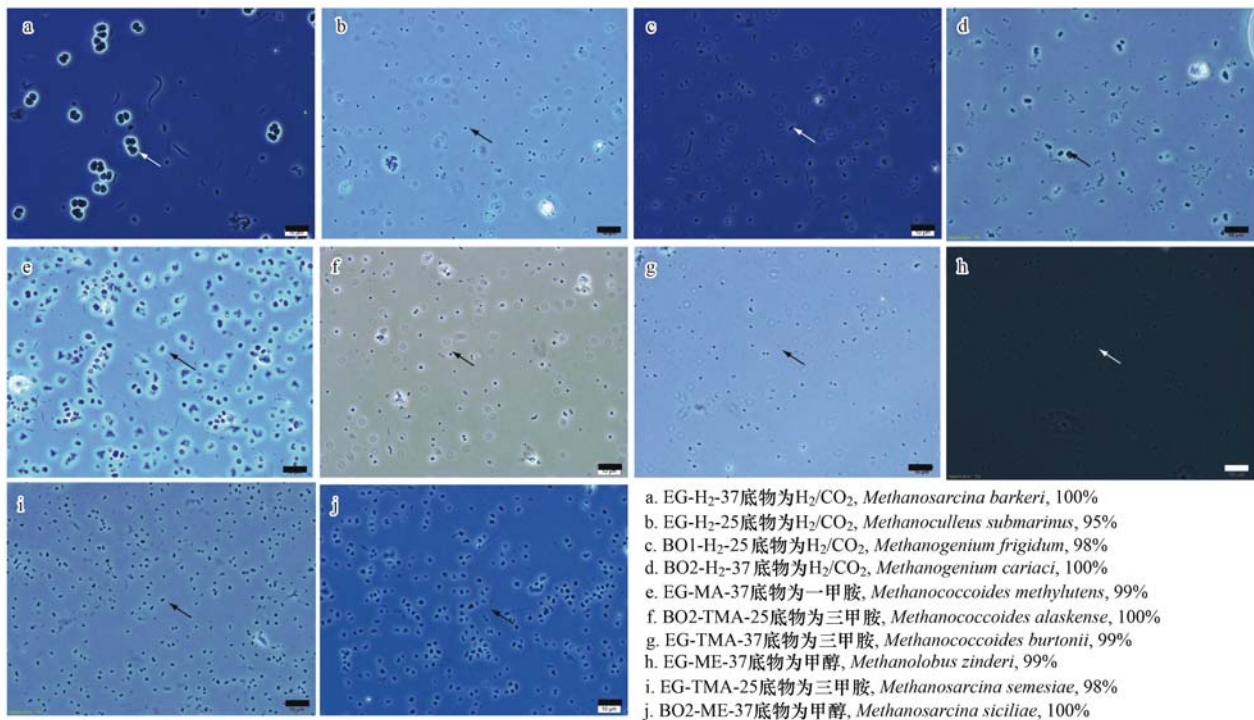


图2 海洋油气田沉积物获得的产甲烷菌位相差照片(标尺为 $10\ \mu m$)

Fig. 2 Phase-contrast micrographs of methanogens obtained from marine gas field sediments

2.3 16S rRNA 系统鉴定

采用16S rRNA直接测序法,对产甲烷菌基本纯化的培养系(富集6代以上)或纯菌株进行解析,23个体系中的优势产甲烷菌主要属于Methanosarcinales目Methanosarcinaceae科及Methanomicrobiales目Methanomicrobiaceae科,共计5个属、10个种,与已知产甲烷菌相似度在95%~100%(表2).3种油气田样品,以 H_2/CO_2 为底物

在两种温度条件下,获得的产甲烷菌属于3个属的4个种:*Methanosarcina barkeri*、*Methanogenium frigidum*、*Methanogenium cariaci*及*Methanoculleus submarinus*.这些产甲烷菌都属于氢营养型产甲烷菌,主要利用氢气和甲酸盐,只有*Methanosarcina barkeri*还可以利用醋酸、甲醇、甲胺、丙醇等^[10].*Methanogenium cariaci*和*Methanoculleus submarinus*都分离自海洋沉积物,是海洋沉积物中的常见产甲

烷 菌^[11,12]. 而 *Methanosarcina barkeri*、*Methanogenium frigidum* 分离自淡水环境,但具有一定的耐盐性^[10,13].

以甲醇为底物获得的优势产甲烷菌都属于 *Methanosarcinales* 目 *Methanosarcinaceae* 科的 3 个属 *Methanosarcina*、*Methanolobus* 和 *Methanococcoides*. 25℃ 的培养条件下所获得的优势产甲烷菌都与 *Methanococcoides methylutens* 近缘,而在 37℃ 的培养条件下,3 种样品所获得的优势产甲烷菌不同,分别与 *Methanolobus zinderi*、*Methanococcoides methylutens* 和 *Methanosarcina sicilae* 近缘. *Methanococcoides methylutens*、*Methanolobus zinderi* 和 *Methanosarcina sicilae* 都是甲基营养型产甲烷菌. *Methanolobus zinderi* 首先分离于煤层中的盐水中,能在高盐的培养基中生长,而且在海水的盐度范围内生长更快^[14]; *Methanosarcina sicilae* 分离于湖泊沉积物,轻微嗜盐具有耐盐性^[15].

以一甲胺为底物在两种温度条件下获得的产甲

烷菌都与 *Methanococcoides methylutens* 近缘(相似性 99% ~ 100%). *Methanococcoides methylutens* 分离于海洋沉积物,是甲基营养型产甲烷菌,主要利用甲基类的碳源,如甲醇、一甲胺、二甲胺、三甲胺^[16]. 以三甲胺为底物所获得的 6 个培养系中,优势产甲烷菌都属于 *Methanosarcinales* 目 *Methanosarcinaceae* 科的 2 个属 *Methanosarcina* 和 *Methanococcoides*. 其中 5 个培养系中的产甲烷菌属于 *Methanococcoides* 属的 3 个种: *Methanococcoides burtonii*、*Methanococcoides methylutens* 及 *Methanococcoides alaskense*,另一个东海 EG 样品 25℃ 培养系,优势产甲烷菌与 *Methanosarcina semesiae* 近缘. *Methanococcoides alaskense* 和 *Methanococcoides methylutens* 首先分离于海洋沉积物^[16,17]; *Methanococcoides burtonii* 分离于南极洲的深水湖泊,但湖泊的粒子组成与海水相似^[18]; *Methanosarcina semesiae* 分离于红树林沼泽,但具有嗜盐性,海水的盐度更适合其生长^[19]. 海洋沉积物中的产甲烷菌大多具有耐盐性,有一些高度耐盐^[20].

表 2 海洋油气田富集培养的产甲烷菌 16S rRNA 基因解析¹⁾

Table 2 Methanogens of the enrichment cultures from marine gas field determined by 16S rRNA gene-based direct sequence analysis

接种源	培养温度/℃	培养系	底物	所属目/科	近缘种	相似度/%	序列号
BG	25	EG-H ₂ -25	H ₂ -CO ₂	Methanomicrobiales/ Methanomicrobiaceae	<i>Methanoculleus submarinus</i>	95	NR_028856
		EG-ME-25	methanol	Methanosarcinales/ Methanosarcinaceae	<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
		EG-MA-25	methylamine		<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
		EG-TMA-25	trimethylamines		<i>Methanosarcina semesiae</i>	98	NR_028182
	37	EG-H ₂ -37	H ₂ -CO ₂	Methanosarcinales/ Methanosarcinaceae	<i>Methanosarcina barkeri</i>	100	NR_074253
		EG-ME-37	methanol		<i>Methanolobus zinderi</i>	99	NR_044558
		EG-MA-37	methylamine		<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
		EG-TMA-37	trimethylamines		<i>Methanococcoides burtonii</i>	99	NR_074242
BO1	25	BO1-H ₂ -25	H ₂ -CO ₂	Methanomicrobiales/ Methanomicrobiaceae	<i>Methanogenium frigidum</i>	98	FR749908
		BO1-ME-25	methanol	Methanosarcinales/ Methanosarcinaceae	<i>Methanococcoides methylutens</i>	100	FR733669
		BO1-MA-25	methylamine		<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
		BO1-TMA-25	trimethylamines		<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
	37	BO1-H ₂ -37	H ₂ -CO ₂	Methanomicrobiales/ Methanomicrobiaceae	<i>Methanogenium cariaci</i>	99	FR733663
		BO1-ME-37	methanol	Methanosarcinales/ Methanosarcinaceae	<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
		BO1-MA-37	methylamine		<i>Methanococcoides methylutens</i>	100	FR733669
		BO1-TMA-37	trimethylamines		<i>Methanococcoides alaskense</i>	99	AY941802
BO2	25	BO2-H ₂ -25	H ₂ -CO ₂	Methanomicrobiales/ Methanomicrobiaceae	<i>Methanogenium cariaci</i>	100	FR733663
		BO2-ME-25	methanol	Methanosarcinales/ Methanosarcinaceae	<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
		BO2-MA-25	methylamine		<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669
		BO2-TMA-25	trimethylamines		<i>Methanococcoides alaskense</i>	100	AY941802
	37	BO2-H ₂ -37	H ₂ -CO ₂	Methanomicrobiales/ Methanomicrobiaceae	<i>Methanogenium cariaci</i>	100	FR733663
		BO2-ME-37	methanol	Methanosarcinales/ Methanosarcinaceae	<i>Methanosarcina sicilae</i>	100	FR733698
		BO2TMA-37	trimethylamines		<i>Methanococcoides methylutens</i>	99	FR733669

1) H₂/CO₂ 为 200 kPa,其余底物浓度均为 5 mmol·L⁻¹

3 讨论

在海洋油气田沉积物中存在着各种碳源^[21]. 发酵型细菌将大分子有机物质分解为产甲烷菌能利用的小分子物质,如氢气、甲基氨及乙酸等,为产甲烷菌的生长提供了底物. 本研究的油气田样品对 H_2/CO_2 、甲醇和甲基类化合物有较高的产甲烷活性,说明在海洋油气田环境下,主要有氢营养及甲基营养型途径产生天然气甲烷. 通过富集培养获得 5 属 10 种产甲烷菌,均属于 *Methanosarcinales* 目及 *Methanomicrobiales* 目,大多属于海洋沉积物中的常见产甲烷菌. 这一结论与 Grabowski 等^[7]在 2005 年对低温油藏的研究中所获得的优势产甲烷菌相一致. Orphan 等^[22]在 2000 年对 70℃ 的高温油藏的分子解析结果表明,高温油藏中的优势产甲烷菌同样属于 *Methanosarcinales* 目和 *Methanomicrobiales* 目,但是其通过富集培养的方法获得的优势产甲烷菌则属于 *Methanobacteriales* 目、*Methanomicrobiales* 目和 *Methanococcales* 目. 虽然利用两种方法所获得的优势产甲烷菌有很大差别,但是优势目都有 *Methanomicrobiales* 目,这与本研究所得结果相一致. 其中富集培养获得的 *Methanobacteriales* 目中的 *Methanobacterium* 属和 *Methanococcales* 目中的 *Methanococcus* 属均属于高温油田的常见属. 这表明这些嗜热产甲烷菌群在高温油藏中分布广泛,在高温油藏的形成过程中起重要作用. 在富集培养中采用 60~90℃ 的培养温度接近油气田实际环境温度,但是富集培养和分子解析的优势产甲烷菌仍有很大的不同,这与高温油气田的环境在实验室中难以模拟,只控制温度不能模拟实际环境相关. 2012 年 Zhao 等^[23]用分子手段对 20.6、32 和 37℃ 的油田样品进行了解析,其中优势产甲烷菌也是 *Methanosarcinales* 目和 *Methanomicrobiales* 目,而高温油田的优势产甲烷菌则属于 *Methanosarcinales* 目和 *Methanobacteriales* 目. Wang 等^[24]对 70℃ 的高温油田采用富集培养法获得的优势产甲烷菌与 Machimaru 等^[25]用分子手段对日本海的 53℃ 高温气田的解析结果中获得的优势产甲烷菌相同,均属于 *Methanosarcinales* 目和 *Methanomicrobiales* 目. 综合本研究及文献报道, *Methanosarcinales* 目、*Methanobacteriales* 目和 *Methanomicrobiales* 目是油气田中的常见产甲烷菌,其中 *Methanosarcinales* 目和 *Methanobacteriales* 目在高温油田中占优势,而 *Methanosarcinales* 目和 *Methanomicrobiales* 目在中低

温油田普遍存在.

4 结论

(1) 本研究的海洋油气田沉积物主要对氢气、甲醇、甲胺具有较高的产甲烷活性,而对甲酸盐及乙酸盐则没有微生物活性. 不同来源的海洋油气田沉积物,在不同底物和温度下,表现了复杂的产甲烷活性,整体来说 37℃ 培养条件的产甲烷速率高于 25℃.

(2) 利用培养法对海洋油气田中的产甲烷菌进行了多样性解析,获得的优势产甲烷菌主要属于 *Methanosarcinales* 目的 *Methanosarcinaceae* 科及 *Methanomicrobiales* 目的 *Methanomicrobiaceae* 科,其中 *Methanococcoides*、*Methanogenium* 和 *Methanosarcina* 为海洋油气田中主要优势菌属,推测与油气田形成相关.

致谢:在此感谢中国海洋大学海洋地球科学学院王厚杰副教授提供油气田沉积物样品.

参考文献:

- [1] Hoehler T M, Jørgensen B B. Microbial life under extreme energy limitation [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, **11**: 83-94.
- [2] Orcutt B N, Sylvan J B, Knab N J, *et al.* Microbial ecology of the dark ocean above, at, and below the seafloor [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2011, **75** (2): 361-422.
- [3] Whitman W B, Coleman D C, Wiebe W J. Prokaryotes: The unseen majority [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, **95** (12): 6578-6583.
- [4] Parkes R J, Cragg B A, Wellsbury P. Recent studies on bacterial populations and processes in subseafloor sediments: a review [J]. *Hydrogeology Journal*, 2000, **8** (1): 11-28.
- [5] Sakata S, Sano Y, Maekawa T, *et al.* Hydrogen and carbon isotopic composition of methane as evidence for biogenic origin of natural gases from the Green Tuff Basin, Japan [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, **26** (5): 399-407.
- [6] Noble R, Henk F. Hydrocarbon charge of a bacterial gas field by prolonged methanogenesis: an example from the East Java Sea, Indonesia [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, **29** (1): 301-314.
- [7] Grabowski A, Nercessian O, Fayolle F, *et al.* Microbial diversity in production waters of a low-temperature biodegraded oil reservoir [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, **54** (3): 427-443.
- [8] Imachi H, Aoi K, Tasumi E, *et al.* Cultivation of methanogenic community from subseafloor sediments using a continuous-flow bioreactor [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5** (12): 1913-1925.
- [9] Qiao J T, Qiu Y L, Yuan X Z, *et al.* Molecular characterization

- of bacterial and archaeal communities in a full-scale anaerobic reactor treating corn straw [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 512-518.
- [10] Maestrojuan G M, Boone D R. Characterization of *Methanosarcina barkeri* MST and 227, *Methanosarcina mazei* S-6T, and *Methanosarcina vacuolata* Z-761T [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1991, **41**(2): 267-274.
- [11] Romesser J A, Wolfe R S, Mayer F, *et al.* *Methanogenium*, a new genus of marine methanogenic bacteria, and characterization of *Methanogenium cariaci* sp. nov. and *Methanogenium marisnigri* sp. nov [J]. *Archives of Microbiology*, 1979, **121**(2): 147-153.
- [12] Mikucki J A, Liu Y, Delwiche M, *et al.* Isolation of a methanogen from deep marine sediments that contain methane hydrates, and description of *Methanoculleus submarinus* sp. nov [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(6): 3311-3316.
- [13] Franzmann P D, Liu Y, Balkwill D L, *et al.* *Methanogenium frigidum* sp. nov., a psychrophilic, H₂-using methanogen from Ace Lake, Antarctica [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1997, **47**(4): 1068-1072.
- [14] Doerfert S N, Reichlen M, Iyer P, *et al.* *Methanolobus zinderi* sp. nov., a methylotrophic methanogen isolated from a deep subsurface coal seam [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2009, **59**(5): 1064-1069.
- [15] Elberson M A, Sowers K R. Isolation of an acetoclastic strain of *Methanosarcina siciliae* from marine canyon sediments and emendation of the species description for *Methanosarcina siciliae* [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1997, **47**(4): 1258-1261.
- [16] Sowers K R, Ferry J G. Isolation and characterization of a methylotrophic marine methanogen, *Methanococcoides methylutens* gen. nov., sp. nov [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1983, **45**(2): 684-690.
- [17] Singh N, Kendall M M, Liu Y, *et al.* Isolation and characterization of methylotrophic methanogens from anoxic marine sediments in Skan Bay, Alaska: description of *Methanococcoides alaskense* sp. nov., and emended description of *Methanosarcina baltica* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2005, **55**(6): 2531-2538.
- [18] Franzmann P D, Springer N, Ludwig W, *et al.* A Methanogenic Archaeon from Ace Lake, Antarctica: *Methanococcoides burtonii* sp. nov [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1992, **15**(4): 573-581.
- [19] Lyimo T J, Pol A, Den Camp H O, *et al.* *Methanosarcina semesiae* sp. nov., a dimethylsulfide-utilizing methanogen from mangrove sediment [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2000, **50**(1): 171-178.
- [20] Lazar C S, Parkes R J, Cragg B A, *et al.* Methanogenic diversity and activity in hypersaline sediments of the centre of the Napoli mud volcano, Eastern Mediterranean Sea [J]. *Environmental Microbiology*, 2011, **13**(8): 2078-2091.
- [21] Bennett B, Adams J J, Gray N D, *et al.* The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface-Part 3. The impact of microorganism distribution on petroleum geochemical gradients in biodegraded petroleum reservoirs [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, **56**: 94-105.
- [22] Orphan V J, Taylor L T, Hafenbradl D, *et al.* Culture-dependent and culture-independent characterization of microbial assemblages associated with high-temperature petroleum reservoirs [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(2): 700-711.
- [23] Zhao L, Ma T, Gao M, *et al.* Characterization of microbial diversity and community in water flooding oil reservoirs in China [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2012, **28**(10): 3039-3052.
- [24] Wang L Y, Gao C X, Mbadinga S M, *et al.* Characterization of an alkane-degrading methanogenic enrichment culture from production water of an oil reservoir after 274 days of incubation [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, **65**(3): 444-450.
- [25] Mochimaru H, Yoshioka H, Tamaki H, *et al.* Microbial diversity and methanogenic potential in a high temperature natural gas field in Japan [J]. *Extremophiles*, 2007, **11**(3): 453-461.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiya Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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