

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

产甲烷微生物研究概况

李煜珊¹, 李耀明^{2*}, 欧阳志云¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 甲烷是仅次于 CO₂ 的第二大温室气体, 因此环境中甲烷来源的研究在环境保护方面具有重要意义. 大气中甲烷的浓度 (体积分数) 约为 1.7×10^{-6} , 其中约有 75% 来源于产甲烷菌的代谢. 产甲烷菌是一类厌氧古生菌, 其分类主要依据为 16S rRNA 以及其他生化指标. 产甲烷菌主要以乙酸、H₂ 和 CO₂ 及甲基类化合物为底物并以甲烷为终产物. 产甲烷菌生命活动过程深受自然环境的影响. 本文从产甲烷菌的发现、形态、分类、代谢机制、生态学研究方面介绍产甲烷菌的研究概况.

关键词: 产甲烷菌; 分类; 代谢; 微生物学; 生态学

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-2025-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.05.056

A Research Overview of Methanogens

LI Yu-shan¹, LI Yao-ming², OUYANG Zhi-yun¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Methane is the second most important greenhouse gas in the atmosphere with a concentration (rate by volume) of 1.7×10^{-6} . Approximately 75% of methane in atmosphere comes from the activity of methanogens in the worldwide. The methanogens are anaerobic archaeobacteria, according to 16S rRNA and other biochemical taxonomy. The methanogens can use compounds such as acetic acid, hydrogen and CO₂ as substrates for methane production. The biochemical metabolisms of methanogens are greatly affected by natural environment where they live in. This paper will present a general situation of methanogens in term of history, morphology, taxonomy, metabolisms and ecology.

Key words: methanogens; taxonomy; metabolism; microbiology; ecology

1 甲烷菌的发现历史

微生物产甲烷是一个非常普遍的现象, 如许多动物的胃肠道系统、湿地土壤、河湖等水体的沉积物以及许多极端环境如高温、高寒、高盐环境等都存在产甲烷过程^[1].

1776 年意大利物理学家 Alessandro Volta 发现富含腐烂水草的溪流、沼泽和湖泊会产生可燃性气体^[2]. 随后 Bechamp 等^[3] 研究发现这些可燃性气体的生成是微生物作用导致的. 1931 年 Fischer 等^[2] 从污泥中得到了一种培养物 (没有指明是纯培养微生物), 可以利用一氧化碳作为碳源生产甲烷. 直到 1933 年 Stephenson 等^[4] 从来自于英国 Ouse 河的污泥中第一次分离得到了产甲烷菌的纯培养物, 他们把样品接种到以甲酸为唯一碳源的培养基中发酵, 结果表明该培养物可以生产甲烷:



接下来他们利用相同的培养基进行继代增殖培养, 最终得到了形态均一的培养物, 虽然平板培养分离以失败告终.

Wolfe 等^[5] 第一个得到了产甲烷菌纯培养物并第一次对产甲烷菌的产甲烷代谢酶类和反应过程进行了研究, 他们的工作被认为是产甲烷菌研究新时

代的标志. 此后随着厌氧培养技术的进步, 特别是 1950 年 Hungate 首创了亨盖特滚管技术, 在厌氧生物降解的环境中如淡水及海水沉积物、昆虫和动物等的消化道、厌氧废弃物处理厂等处分离了大量的产甲烷菌^[5~9]. 近年来由于分子生物学技术和厌氧培养技术的进步, 各种环境如动物胃肠道、水稻田、微生物垫、热泉等环境中也都分离得到了产甲烷^[1,10,11], 使人们加深了产甲烷菌在自然界广泛分布现象的认识.

2 产甲烷菌的分类

随着越来越多产甲烷菌的分离及进一步的生理生化和基因组特点的分析, 研究人员发现越来越多的

收稿日期: 2013-09-21; 修订日期: 2013-11-02

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-09-3)

作者简介: 李煜珊 (1969 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为生态学, E-mail: liyushan@ucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: liyaoming07@mails.ucas.ac.cn

产甲烷菌和传统意义上的细菌的区别. 19 世纪 70 年代末逐渐形成了区别于细菌的古细菌的概念^[12],并在 1990 年正式确定了古细菌的分类地位^[13]. 产甲烷菌一词则是于 1974 年由 Bryant^[14]首次提出的,将产甲烷菌同嗜甲烷菌(以甲烷为底物的细菌)区分开. 利用 16S rRNA 序列信息对产甲烷菌进行分类是 Balch 等^[15]在 1979 年首先提出的. 他们通过对比 16S rRNA 序列的相似性,把当时已经纯培养的 17 株产甲烷菌分为 3 个目(甲烷杆菌目

(Methanobacteriales)、甲烷球菌目(Methanococcales)和甲烷微菌目(Methanomicrobiales),4 个科,7 个属. 随着所分离的产甲烷菌的增多,需要丰富产甲烷菌类群的分类特征. 当前产甲烷菌新种描述的基本标准特征包括培养特性、形态学特性、革兰氏染色特点、电镜形态、抗原特性、核酸的 GC 含量及序列特点和细胞脂类等. 最新的分类中产甲烷菌包含 6 个目(Methanocellales 目 2008 划分^[16]),12 个科,35 个属^[17](表 1).

表 1 产甲烷菌分类

Table 1 Taxonomy of methanogens

目	科	属
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	<i>Methanobacterium</i>
		<i>Methanobrevibacter</i>
		<i>Methanosphaera</i>
		<i>Methanothermobacter</i>
Methanococcales	Methanothermaceae	<i>Methanothermaceae</i>
	Methanococcaceae	<i>Methanococcus</i>
		<i>Methanothermococcus</i>
	Methanocaldococcaceae	<i>Methanocaldococcus</i>
Methanomicrobiales	Methanomicrobiaceae	<i>Methanotorris</i>
		<i>Methanoculleus</i>
		<i>Methanofollis</i>
		<i>Methanogenium</i>
		<i>Methanolacinia</i>
		<i>Methanomicrobium</i>
		<i>Methanoplanus</i>
		<i>Methanospirillum</i>
		<i>Methanocorpusculum</i>
		<i>Methanocalculus</i>
Methanosarcinales	Unclassified	<i>Methanolinea</i>
		<i>Candidatus Methanoregula</i>
		<i>Candidatus Methanosphaerula</i>
	Methanosarcinaceae	<i>Methanosarcina</i>
		<i>Methanococcoides</i>
		<i>Methanohalobium</i>
		<i>Methanohalophilus</i>
		<i>Methanolobus</i>
		<i>Methanomethylovorans</i>
		<i>Methanimicrococcus</i>
		<i>Methanosalsum</i>
		<i>Methanosaeta</i>
Methanopyrales	Methermicoccaceae	<i>Methermicoccus</i>
	Methanopyraceae	<i>Methanopyrus</i>
Methanocellales	Methanocellaceae	<i>Methanocella</i>

2005 年 Baptiste 等^[18]对除 Methanocellales 外的产甲烷菌进行了系统发育分析,并研究了当时已经发现的产甲烷菌的核糖体蛋白和其他一些共有的蛋白,将产甲烷菌划分为 2 个纲(Class I and Class II):Class I:甲烷杆菌目(Methanobacteriales),甲烷球菌目(Methanococcales)和甲烷火菌目

(Methanopyrales); Class II:甲烷微菌目(Methanomicrobiales)和甲烷八叠球菌目(Methanosarcinales). 目前对于 Class II 的分类得到了学术界的肯定,但是 Class I 还存在许多争议,缺乏足够的数据支撑^[18,19]. 2008 年, Thauer 等^[20]根据细胞中是否含细胞色素将产甲烷菌分为两组

(Group1 和 Group 2), Group1: 甲烷八叠球菌目; Group2: 甲烷杆菌目、甲烷球菌目、甲烷火菌目和甲烷微菌目. 2009 年 Luo 等^[21]以基因序列为计算基础,利用 MSOAR 软件分析了 8 株产甲烷菌的同源基因. 他们的分析结果同样支持产甲烷菌的 2 纲分类理论,但是不同的是他们把甲烷杆菌目和甲烷火菌目同样归为 Class II. 而 Anderson 等^[22]依据产甲烷菌的关键蛋白基因将产甲烷菌分为 3 个纲:Class I: 甲烷杆菌目,甲烷球菌目和甲烷火菌目; Class II: 甲烷微菌目; Class III: 甲烷八叠球菌目.

3 产甲烷菌的形态学和主要生化特征

产甲烷菌在形态上与其他微生物变化不大,已发现的产甲烷菌形态上有杆状、规则或不规则的球状、长链杆状、螺旋状、八叠状等,有时也呈现一些不规则形状如不规则扁平盘状^[17]. 一些菌株可以聚集生长形成菌落. 产甲烷菌的细胞壁结构与其他细菌的细胞壁结构差别很大. 一般细菌的细胞壁均

有胞壁酸和 *N*-乙酰葡萄糖胺组成的肽聚糖或二氨基庚二酸成分,产甲烷菌的细胞壁没有胞壁酸也没有二氨基庚二酸成分而是有大量的杂多糖和许多蛋白质亚基组成^[23]. 细胞壁的特性决定了其革兰氏染色结果不同于其他细菌. 产甲烷菌的革兰氏染色既有阴性也有阳性,甚至在同一属内不同种之间也是既有阴性也有阳性^[24]. 不同的产甲烷菌细胞壁之间也有区别. 甲烷八叠球菌属和甲烷鬃菌属的部分种的细胞中含有气泡. 产甲烷菌的细胞膜结构与细菌的细胞膜差别很大,甚至产甲烷菌之间的差别也很大.

产甲烷菌对底物有很强的特异性,它们可以利用的底物只有 H₂、CO₂、甲酸、甲醇、甲胺、乙酸等,最终的代谢产物都含有甲烷. 产甲烷是产甲烷菌获得能量的唯一途径,同时产甲烷菌是唯一以甲烷作为代谢终产物的微生物类群^[25]. 目前的研究发现产甲烷菌有 3 种代谢类型,分别是 CO₂ 营养型、甲基营养型和乙酸营养型^[26]. 3 种代谢途径的典型反应和自由能如表 2 所示.

表 2 不同代谢类型产甲烷菌的典型反应和典型微生物^[26]

Table 2 Free energies and typical organisms of methanogenesis reactions		
反应式	$\Delta G^{0'}$ a (以 CH ₄ 计)/kJ·mol ⁻¹	产甲烷菌类群
I. CO ₂ -type		
4 H ₂ + CO ₂ → CH ₄ + 2 H ₂ O	-135	Most methanogens
4 HCOOH → CH ₄ + 3 CO ₂ + 2 H ₂ O	-130	Many hydrogenotrophic methanogens
CO ₂ + 4 isopropanol → CH ₄ + 4 acetone + 2 H ₂ O	-37	Some hydrogenotrophic methanogens
4 CO + 2 H ₂ O → CH ₄ + 3 CO ₂	-196	Methanothermobacter and Methanosarcina
II. Methylated C1 compounds		
4 CH ₃ OH → 3 CH ₄ + CO ₂ + 2 H ₂ O	-105	Methanosarcina and other methylotrophic methanogens
CH ₃ OH + H ₂ → CH ₄ + H ₂ O	-113	Methanomicrococcus blatticola and Methanosphaera
2 (CH ₃) ₂ -S + 2 H ₂ O → 3 CH ₄ + CO ₂ + 2 H ₂ S	-49	Some methylotrophic methanogens
4 CH ₃ -NH ₂ + 2 H ₂ O → 3 CH ₄ + CO ₂ + 4 NH ₃	-75	Some methylotrophic methanogens
2 (CH ₃) ₂ -NH + 2 H ₂ O → 3 CH ₄ + CO ₂ + 2 NH ₃	-73	Some methylotrophic methanogens
4 (CH ₃) ₃ -N + 6 H ₂ O → 9 CH ₄ + 3 CO ₂ + 4 NH ₃	-74	Some methylotrophic methanogens
4 CH ₃ NH ₃ Cl + 2 H ₂ O → 3 CH ₄ + CO ₂ + 4 NH ₄ Cl	-74	Some methylotrophic methanogens
III. Acetate		
CH ₃ COOH → CH ₄ + CO ₂	-33	Methanosarcina and Methanosaeta

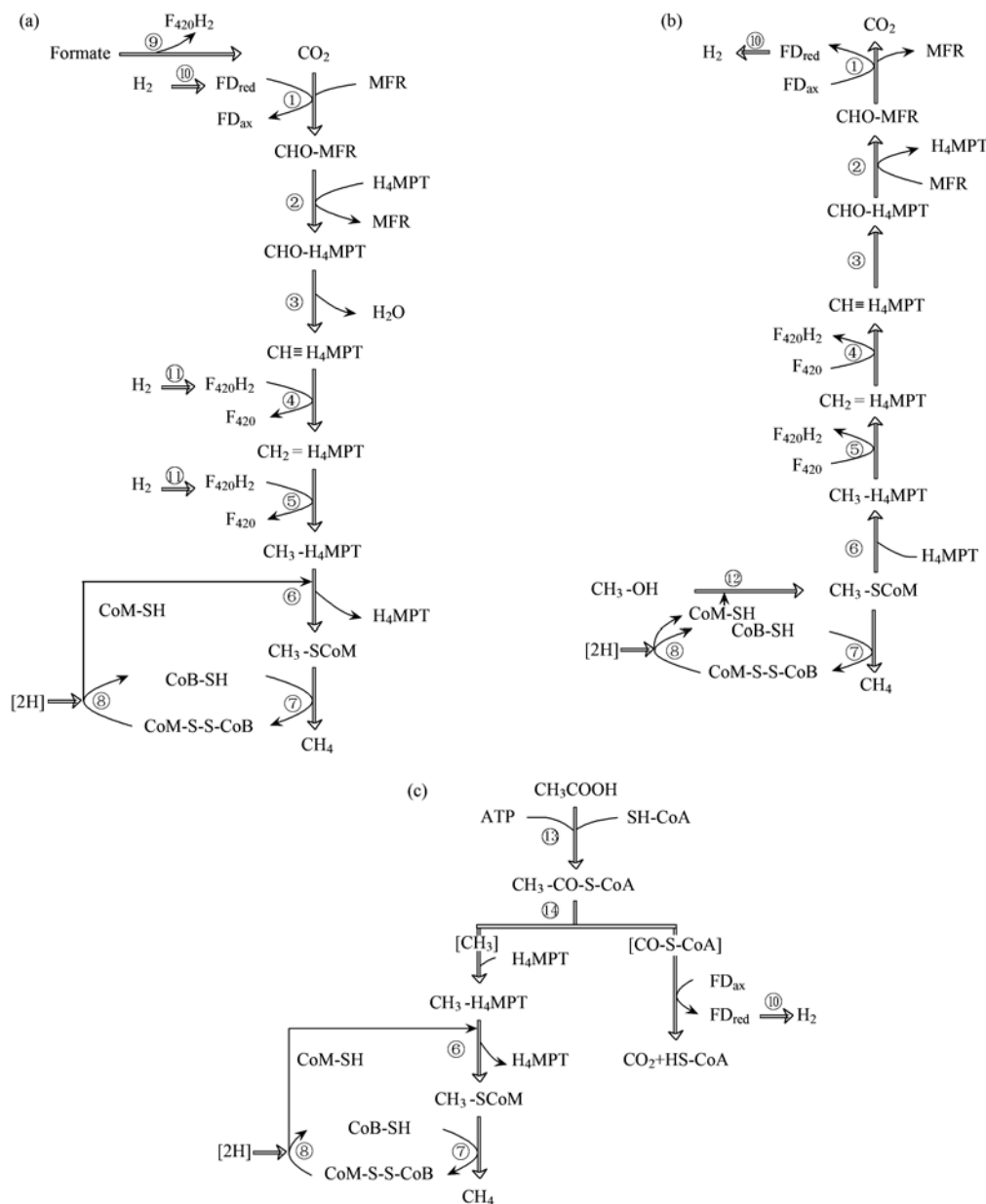
产甲烷菌的代谢具有区别于其他微生物的明显生化特征,产甲烷菌细胞内有独特的辅助因子参与甲烷的合成,这些辅助因子包括:① 甲烷呋喃(MFR),把 CO₂ 还原为甲酰基水平并使其与呋喃的氨基侧链结合,然后转移给第二个辅酶;②、四氢甲烷蝶呤(MP, F342 因子),辅助甲酰基还原为甲基. 在细胞内以 H₄MPT 形式存在;③ 辅酶 M, (CoM),甲基的载体;④ 辅酶 F430,作用与辅酶 M 作用相似;⑤ 辅酶 F420,可在低氧化还原电势下做双电子载体;⑥ 辅酶 HS-HTP,在甲烷形成的最终步骤中作为甲基还原酶的电子供体. 其中前 4 种辅酶

是作 C1 的载体的辅酶,另外两种是参与氧化还原反应的辅酶.

大多数的产甲烷菌可以利用氢作为电子供体将 CO₂ 还原为甲烷[图 1(a)]. 宏基因组研究发现产甲烷菌利用 H₂ 和 CO₂ 生成甲烷的过程中有 200 多个基因参与^[27]. 许多 CO₂ 营养型产甲烷菌既可以利用氢作为电子供体也可以以甲酸作为电子供体. 这些微生物可以通过甲酸脱氢酶将甲酸氧化为 CO₂ 然后进入 CO₂ 代谢途径. CO₂ 首先与 MFR 结合并被还原为甲酰基水平. 然后甲酰基转移到 H₄MPT 上,形成次甲基复合物并进一步形成亚甲基复合物

和甲基复合物。然后甲基转移给 CoM, 形成甲基-CoM 复合物。最后一步由甲基辅酶 M 还原酶 (Mcr) 将甲基还原为甲烷。第二种产甲烷代谢类型为甲基营养型, 可利用的底物包括甲醇, 含甲基的胺类 (甲胺、二甲胺、三甲胺、和四甲基铵), 含甲基的硫化物 (甲硫醇和二甲基硫) [图 1(b)]. 能够利用甲基化合物的产甲烷菌只局限于甲烷八叠球菌目以及甲烷杆菌目的甲烷球形菌。甲基化合物在代谢时首先通过一个中间蛋白将甲基转移给 CoM 形成甲基-CoM 复合物。甲基-CoM 复合物进入产甲烷代谢通路最终被还原为甲烷。第三种营养类型为乙酸营

养型 [图 1(c)]. 乙酸是微生物厌氧代谢过程的主要的中间产物, 大约有三分之二生物成因的甲烷是乙酸代谢的结果。但是到目前为止只发现了 2 个属 (甲烷八叠球菌属, *Methanosarcina* 和甲烷鬃菌属, *Methanosaeta*) 的产甲烷菌可以利用乙酸产甲烷。这两个属的产甲烷菌通过解乙酸反应分解乙酸然后将羧基氧化为 CO_2 , 将甲基还原为甲烷。甲烷八叠球菌属的微生物生长较快, 利用乙酸时第一步将乙酸活化需要消耗一个高能磷酸键, 对乙酸的浓度要求较高。同时甲烷八叠球菌属的微生物代谢底物较为广泛, 并且有些微生物利用甲醇和甲胺的倾向比利



(a) 以 H_2/CO_2 或甲酸盐为底物的代谢途径; (b) 以甲醇为底物的代谢途径; (c) 以乙酸盐为底物的代谢途径

图 1 产甲烷菌产甲烷代谢途径^[26]

Fig. 1 Pathways of methanogenesis by methanogens

用乙酸更大一些,有些也可以利用氢气作为电子供体。甲烷鬃菌属的产甲烷菌生长缓慢只能利用乙酸,利用乙酸时第一步将乙酸活化需要消耗两个高能磷酸键,对乙酸有很高的亲和力^[28]。

4 产甲烷菌的生态学研究

产甲烷菌广泛分布于自然界各种厌氧环境中,尤其是有机质含量高、氢含量在 $7 \sim 10 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 缺乏 NO_3^- 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 等电子受体,氧化还原电位低于 -200 mV 的厌氧环境中(-320 mV 以下正常生长, -160 mV 时可以生长繁殖但极为缓慢)^[26,29,30]。水稻田内甲烷菌分布广泛,成为产甲烷菌生态研究的热点^[28]。水稻田土壤中乙酸型产甲烷菌的数量(以干土计,下同)在 $10^6 \sim 10^8$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ^[31,32]。在乙酸营养型产甲烷菌中甲烷鬃菌属在利用乙酸时比甲烷八叠球菌属消耗更多的能量,所以对乙酸的亲和力更强,可以在乙酸含量小于 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的环境中生长。甲烷八叠球菌属对乙酸含量要求较高,但是生长速度快,并可以利用 H_2 和 CO_2 作为底物。这可能是甲烷鬃菌属和甲烷八叠球菌属在环境中分布的生态学机制之一。氢营养型产甲烷菌在环境中的分布也非常广泛,大部分的产甲烷菌都可以利用 H_2 和 CO_2 作为底物。在水稻田土壤中,氢营养型产甲烷菌的数量在 10^6 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ^[31]。其中存在一类重要的对氢具有高亲和力的产甲烷菌: *Methanocellales* [之前为 *Rice Cluster I* (RC-I)]。这类微生物适应了根际的特殊环境,对 H_2 的亲和力较高,对氧有一定的耐受能力,是根际甲烷释放的主要贡献者^[33]。但是对这类产甲烷菌的分离培养似乎异常困难。近年来研究发现产甲烷菌尤其是甲烷八叠球菌也广泛分布于氧含量高的环境^[34,35]。目前这种氧耐受机制还不清楚,可能一方面是由于这类微生物基因组中含有能够消除氧毒性的基因如过氧化氢酶基因,另一方面是由于周围好氧微生物对氧的代谢保护了产甲烷菌^[36,37]。动物的胃肠道系统中的产甲烷菌以甲烷短杆菌属 (*Methanobrevibacter*) 居多,并且都是氢营养型^[30,38]。产甲烷菌一方面可以维持 H_2 的平衡,另一方面可以帮助寄主动物从食物中获得更多的能量。 H_2 的浓度成为这种环境中影响产甲烷菌生态学分布的主要原因。

影响环境中产甲烷菌分布的因素还包括温度、有机质含量、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 等电子受体含量、植被类型(土壤)等。温度的变化可以影响所有的生

化过程,包括产甲烷菌的代谢以及为产甲烷菌提供底物的微生物的代谢活性。同时温度也会影响土壤的含水量,改变土壤的透气性对 O_2 和 CH_4 的扩散产生影响,进而影响产甲烷菌。 NO_3^- 、 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 等电子受体存在时,相应的微生物,如硝酸盐还原菌、铁还原菌、硫酸盐还原菌,可以利用这些作为电子受体与产甲烷菌竞争底物。同时 NO_3^- 作为反硝化作用的底物会产生 NO 、 N_2O 等,这些中间产物对产甲烷菌造成不良影响。植被类型对产甲烷菌的影响一方面是植物根系分泌物、凋落物等作为产甲烷菌的底物,另一方面作为甲烷释放和氧气扩散的通道来影响产甲烷菌的分布。

5 产甲烷菌研究展望

多年的研究成果表明,纯培养产甲烷菌的代谢过程和生化特性等相对清楚,但是分子生物学技术揭示环境中存在的尚不可培养的产甲烷微生物,其可能存在新的生化特性有待于人们去认识,但必须获得纯培养物,因此如何发现新的培养条件和技术而获得纯培养甲烷菌是重要的研究方向之一。另一方面,由于甲烷产生与环境 and 能源密切相关,应用分子生物学高通量测序技术、同位素标记技术、基因芯片技术等对产甲烷菌的生态学机制研究,揭示微生物群落和功能相关性,都具有重要的理论和实际意义。

参考文献:

- [1] Matheus Carnevali P B, Rohrsen M, Dodsworth J A, et al. Archaea in arctic thermokarst lake sediments [A]. In: Proceedings of The AGU Fall Meeting Abstracts [C]. USA: The AGU Fall Meeting Abstracts, 2011.
- [2] Thauer R K. Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson: 1998 Marjory Stephenson Prize Lecture [J]. Microbiology, 1998, **144**(9): 2377-2406.
- [3] Barker H A. Bacterial fermentations [M]. New York: John Wiley and Sons, 1956.
- [4] Stephenson M, Stickland L H. Hydrogenase: The bacterial formation of methane by the reduction of one-carbon compounds by molecular hydrogen [J]. Biochemical Journal, 1933, **27**(5): 1517-1527.
- [5] Wolfe R S. An historical overview of methanogenesis [A]. In: Methanogenesis: Ecology, Physiology, Biochemistry & Genetics [M]. US: Springer, 1993. 1-32.
- [6] Simankova M V, Kotsyurbenko O R, Lueders T, et al. Isolation and characterization of new strains of methanogens from cold terrestrial habitats [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2003, **26**(2): 312-318.
- [7] Bräuer S L, Cadillo-Quiroz H, Yashiro E, et al. Isolation of a novel acidiphilic methanogen from an acidic peat bog [J]. Nature, 2006, **442**(7099): 192-194.

- [8] Jones W J, Paynter M J B, Gupta R. Characterization of *Methanococcus maripaludis* sp. nov., a new methanogen isolated from salt marsh sediment [J]. Archives of Microbiology, 1983, **135**(2): 91-97.
- [9] Miller T L, Wolin M J, De Macario E C, *et al.* Isolation of *Methanobrevibacter smithii* from human feces [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1982, **43**(1): 227-232.
- [10] Poole J A, Kelley C A, Chanton J, *et al.* Methanogens in hypersaline environments and their substrates for methane production [A]. In: Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstracts [C]. USA: The AGU Fall Meeting Abstracts, 2009.
- [11] Lewin A, Wentzel A, Valla S. Metagenomics of microbial life in extreme temperature environments [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2013, **24**(3): 516-525.
- [12] Woese C R, Magrum L J, Fox G E. Archaeobacteria [J]. Journal of Molecular Evolution, 1978, **11**(3): 245-252.
- [13] Woese C R, Kandler O, Wheelis M L. Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1990, **87**(12): 4576-4579.
- [14] Bryant M P. Methane-producing bacteria. Part 13. [A]. In: Buchanan R E, Gibbons N E (Eds.). Bergey's Manual of Determinative Bacteriology [M]. (8th ed.). Baltimore: The Williams & Wilkins Co, 1974. 472-477.
- [15] Balch W E, Fox G E, Magrum L J, *et al.* Methanogens: reevaluation of a unique biological group [J]. Microbiological Reviews, 1979, **43**(2): 260-296.
- [16] Sakai S, Imachi H, Hanada S, *et al.* *Methanocella paludicola* gen. nov., sp. nov., a methane-producing archaeon, the first isolate of the lineage 'Rice Cluster I', and proposal of the new archaeal order *Methanocellales* ord. nov [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2008, **58**(4): 929-936.
- [17] Liu Y. Taxonomy of methanogens [J]. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology, 2010. 547-558.
- [18] Bapteste É, Brochier C, Boucher Y. Higher-level classification of the Archaea: evolution of methanogenesis and methanogens [J]. Archaea, 2005, **1**(5): 353-363.
- [19] Gao B, Gupta R S. Phylogenomic analysis of proteins that are distinctive of Archaea and its main subgroups and the origin of methanogenesis [J]. BMC Genomics, 2007, **8**(1): 86.
- [20] Thauer R K, Kaster A K, Seedorf H, *et al.* Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation [J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, **6**(8): 579-591.
- [21] Luo H W, Sun Z Y, Arndt W, *et al.* Gene order phylogeny and the evolution of methanogens [J]. PloS One, 2009, **4**(6): e6069.
- [22] Anderson I, Ulrich L E, Lupa B, *et al.* Genomic characterization of methanomicrobiales reveals three classes of methanogens [J]. PloS One, 2009, **4**(6): e5797.
- [23] Firtel M, Southam G, Harauz G, *et al.* Characterization of the cell wall of the sheathed methanogen *Methanospirillum hungatei* GPI as an S layer [J]. Journal of Bacteriology, 1993, **175**(23): 7550-7560.
- [24] Beveridge T J, Schultze-Lam S. The response of selected members of the archaea to the Gram stain [J]. Microbiology, 1996, **142**(10): 2887-2895.
- [25] Reeve J N. Molecular biology of methanogens [J]. Annual Reviews in Microbiology, 1992, **46**(1): 165-191.
- [26] Liu Y C, Whitman W B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2008, **1125**(1): 171-189.
- [27] Hedderich R, Whitman W B. Physiology and Biochemistry of the Methane-Producing Archaea, The Prokaryotes [M]. New York: Springer-Verlag, 2013. 635-662.
- [28] Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs [J]. Advances in Agronomy, 2007, **96**: 1-63.
- [29] Lovley D R, Goodwin S. Hydrogen concentrations as an indicator of the predominant terminal electron-accepting reactions in aquatic sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, **52**(12): 2993-3003.
- [30] Saengkerdsud S, Rieke S C. Ecology and characteristics of methanogenic archaea in animals and humans [J]. Critical Reviews in Microbiology, 2014, **40**(2): 97-116.
- [31] Krüger M, Frenzel P, Kemnitz D, *et al.* Activity, structure and dynamics of the methanogenic archaeal community in a flooded Italian rice field [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2005, **51**(3): 323-331.
- [32] Conrad R, Klose M. Dynamics of the methanogenic archaeal community in anoxic rice soil upon addition of straw [J]. European Journal of Soil Science, 2006, **57**(4): 476-484.
- [33] Sakai S, Conrad R, Liesack W, *et al.* *Methanocella arvarezae* sp. nov., a hydrogenotrophic methanogen isolated from rice field soil [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2010, **60**(12): 2918-2923.
- [34] Lee C G, Watanabe T, Murase J, *et al.* Growth of methanogens in an oxic soil microcosm: Elucidation by a DNA-SIP experiment using ¹³C-labeled dried rice callus [J]. Applied Soil Ecology, 2012, **58**: 37-44.
- [35] Angel R, Claus P, Conrad R. Methanogenic archaea are globally ubiquitous in aerated soils and become active under wet anoxic conditions [J]. The ISME Journal, 2012, **6**(4): 847-862.
- [36] Thorgersen M P, Stirrett K, Scott R A, *et al.* Mechanism of oxygen detoxification by the surprisingly oxygen-tolerant hyperthermophilic archaeon, *Pyrococcus furiosus* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, **109**(45): 18547-18552.
- [37] Horne A J, Lessner D J. Assessment of the oxidant tolerance of *Methanosarcina acetivorans* [J]. FEMS Microbiology Letters, 2013, **343**(1): 13-19.
- [38] Brune A. Methanogenesis in the digestive tracts of insects [A]. In: Timmis K N (Ed.). Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 707-728.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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