

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM_{2.5}质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉,江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5}中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵,黄晓锋,何凌燕,胡敏,王川,任宇超,应红梅,周军,汪伟峰,许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5}中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳,石金辉,李丽平,姚小红,高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞,张柯,王洪宝,李娜,王洁,杨文慧,殷喆,焦周光,温占波,李劲松 (3144)

2015年春节北京市空气质量分析 程念亮,陈添,张大伟,李云婷,孙峰,魏强,刘嘉林,刘保献,孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之,缪孝平,欧阳杜娟,叶杰旭,陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙,李云梅,李渊,吕恒,刘闯,王旭东,张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳,吴晓东,刘波,闫德智,张攻琪,周阳 (3186)

河北洺河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达,张慧,何小松,檀文炳,张媛,马丽娜,席北斗,党秋玲,高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕,傅世锋,蔡晓琼,汤坤贤,曹超,陈庆辉,梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵,孙玉川,王尊波,师阳,江泽利,张媚,谢正兰,廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC}的影响 黄奇波,覃小群,刘朋雨,张连凯,苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳,吴勇,杨军,孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪,饶拉,黄金良,白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍,崔益斌,李梅,余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵,赵玲,尹平河,谭烁,舒万姣,侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正,陈珂莉,危忠,王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱,管运涛,刘安,李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛,徐斌,张天阳,程拓,夏圣骥,楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙,郭雪峰,王敏慧,焦茹媛,石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦,吴纯德,刘吕刚,袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹,许丽英,王少锋,肖翻,贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋,刘锐,徐灿灿,舒小铭,许江军,兰亚琼,陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞,佟娟,申佩弘,魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇,川岸朋树,宋小燕,刘锐,陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓,崔丙健,金德才,吴尚华,杨波,邓晔,庄国强,庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩,孙凤侠,谢杭冀,陈敬,睦稀,甘志明,王修平,史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川,袁林江,周国标,李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏,王建芳,钱飞跃,王琰,陈重军,沈耀耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究,以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙,范会,姜珊珊,蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强,龙攀,刘依依,钟娟,龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜,王睿,廖婷婷,陈诺,郑循华,姚志生,张海,Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖,许明祥,张亚锋,王超华,樊会敏,王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,赵世伟,张兴昌 (3393)

宁夏山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞,黄懿梅,牛丹,赵彤,闫浩,蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁,马志敏,蓝家程,伍宇春,陈高起,傅瓦利,文志林,王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点:以潜江市为例 王玉竹,肖和艾,周萍,童成立,葛体达,曾冠军,吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿,江长胜,郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕,王新,王博,许淑婧,高福元,余晔,夏敦胜,夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价 郭鹏然,雷永乾,周巧丽,王畅,潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁,李晓东,赵中华,祁志福,陈彤,严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎,郑国灿,朱恒,张进忠,朱秀英,胡淑春,吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华,崔丙健,吴尚华,白志辉,黄占斌 (3471)

4株外生菌根真菌对 Al³⁺吸收与吸附的研究 王明霞,袁玲,黄建国,周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 于锐,刘景双,王其存,刘强,王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜,王磊,夏孟婧,苏月,李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲,乔宇祥,余宁,史荣华,王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏,纪莎莎,俞明峰,李晓东,严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹,田良,吕彬,杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅,邹兰,李晓倩,车飞,赵国华,李刚,张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌,王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律

宋立娜¹, 王磊², 夏孟婧², 苏月², 李振山^{1, 2*}

(1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 北京大学环境工程系, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 产甲烷菌是填埋场稳定化的关键微生物。以北京市北神树垃圾填埋场为采样地, 钻井采集了填埋深度 6~36.1 m, 填埋时间 2~15 a 的垃圾样品。采用 PCR 检验其中产甲烷菌的种类, 并基于 qPCR 技术获得的数据, 研究了各类产甲烷菌随时间和深度的数量变化, 及其与垃圾化学性质之间的关系。发现堆体内有机质含量基本稳定, pH 呈弱碱性, 符合产甲烷阶段的化学特性。检测出两类乙酸营养型产甲烷菌 (*Methanosaeta* 和 *Methanosarcina*), 一类氢营养型产甲烷菌 (*Methanobacterials*)。随着填埋时间的延长, 产甲烷菌呈现出先升高后下降的趋势, 填埋 9 a 以上的垃圾中产甲烷菌群落结构趋于稳定。乙酸营养型的 *Methanosarcina* 为优势类群。三类产甲烷菌的含量与挥发性脂肪酸含量显著相关, 与各类大分子有机质含量相关性很弱或不相关, 表明产甲烷菌的数量受底物含量的影响, 而在填埋 2 a 以上的垃圾中, 大分子水解、发酵等作用对产甲烷菌影响微弱。

关键词: 填埋场; 产甲烷菌; 群落结构; qPCR; 深度; 时间

中图分类号: X172; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3493-08 DOI: 10.13227/j.hjx.2015.09.047

Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing

SONG Li-na¹, WANG Lei², XIA Meng-jing², SU Yue², LI Zhen-shan^{1, 2*}

(1. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Methanogens are the key microorganisms for landfill stabilization. RT-PCR and qPCR detecting system were employed to determine the types and abundance of methanogens in 2-15 year-old solid wastes that sampled from Beishenshu Landfill, Beijing. The organic components were almost stable and the pH values were in alkaline range, which indicated that the landfill was in the methanogenic process. *Methanobacterials*, *Methanosaeta*, and *Methanosarcina* were detected, among which *Methanosaeta* and *Methanosarcina* are acetoclastic, and *Methanobacterials* are hydrogenotrophic. As landfill processing, within this time range, although the bacterial abundance was significantly decreased, the amount of methanogens was first increased and then decreased, and finally became stable after being landfilled for 9 years. *Methanosarcina* was the dominate taxa. Significant correlations were found between the methanogens and the volatile fatty acids, but the correlations between methanogens and larger molecular organic matters were relatively weak or even absent. Taken together, our study revealed that the amount of methanogens were affected by substrates, but hardly influenced by the conversion of large molecules in these wastes landfilled for more than 2 years.

Key words: solid waste landfill; methanogen; community structure; qPCR; depth; time

21 世纪以来,发达国家的垃圾产生量每年增长 3.2%~4.5%,发展中国家垃圾产量每年增长 2.0%~3.0%^[1]。中国已成为世界上最大城市生活垃圾产生者。1990~2004 年,我国生活垃圾处理设备和基础设施的投资增加了 21 倍,安全处理量提高逾 30 倍^[2]。填埋仍是我国最主要的城市生活垃圾处理方式,截至 2009 年底,我国城市生活垃圾填埋场 447 座,处理能力约为 27.3 万 t·d⁻¹^[3]。然而填埋场垃圾降解速率慢,可能耗费数十年时间才能达到稳定化^[4, 5],伴随着渗滤液、填埋气等污染^[6, 7]。

填埋垃圾的降解是一系列微生物作用的过程,

不同类群的微生物协同作用,并将二氧化碳和甲烷作为稳定的终产物^[8]。研究者根据垃圾降解的不同阶段将填埋堆体内的微生物分为水解菌、产酸菌、产乙酸菌和产甲烷菌四类^[9]。产甲烷是垃圾降解的限速步骤之一,了解填埋堆体内产甲烷菌,对提高垃圾降解效率,回收能源,减少污染物排放等方面都具有重要作用。

收稿日期: 2015-03-12; 修订日期: 2015-04-22

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAJ07B04)

作者简介: 宋立娜(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为固废处理与资源化, E-mail: songlina@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: Lizhenshan@iee.pku.edu.cn

产甲烷菌可根据其营养类型分为乙酸营养型、氢营养型和甲基营养型三类. 研究发现垃圾填埋场中产甲烷菌有一定的多样性, 包括 *Methanobacteriales*、*Methanomicrobiales* 和 *Methanosarcinales* 等^[10-16]. 其中 Cardinali-Rezende 等^[10] 在运行 44~90 d 的反应器填埋中发现了氢营养型的 *Methanomicrobiales* 和 *Methanobacteriales*. Li 等^[13] 和 Nayak 等^[16] 在各自的模拟填埋反应器中均发现 *Methanomicrobiales* 和 *Methanosarcinales* 为优势产甲烷菌. 然而实验室反应器运行时间短, 条件易于控制, 很难反映真实填埋场数年至数十年内复杂的微生物群落变化. 另一些研究者以填埋场渗滤液为对象, 发现优势类群为乙酸型的 *Methanosarcina* 和 *Methanosaeta*, 或氢营养型 *Methanobacteriales* 和 *Methanomicrobiales*^[11, 12]. 这些研究限于填埋场某一阶段或各阶段混合的产甲烷菌群落, 不易深入探究其随时间的演替规律. Uz 等^[15] 定性上明确了不同深度的产甲烷菌群落, 发现低龄垃圾中产甲烷菌多样性高于老龄垃圾, 未开展各类群含量的变化规律研究.

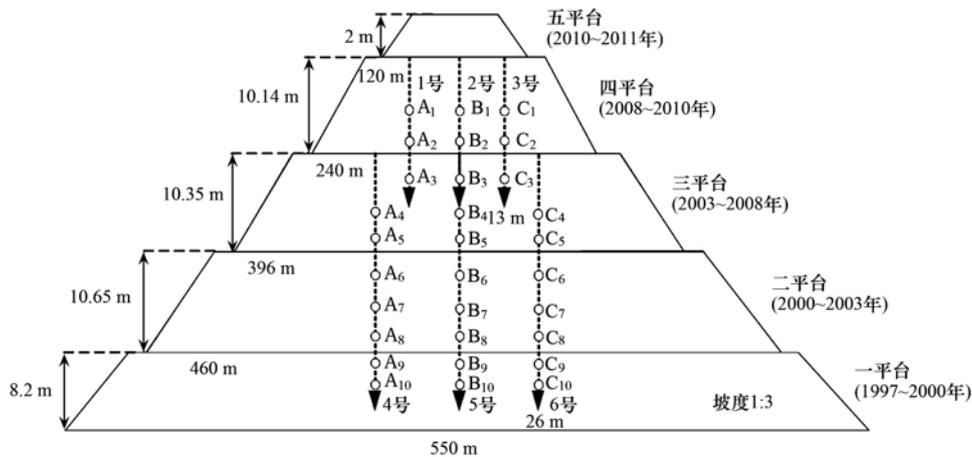
实际填埋场的垃圾空间异质性很强, 运行时间比反应器长很多, 产甲烷菌可能分布于很大的时间

和空间跨度内. 有必要深入地开展实际填埋场内产甲烷菌群落分布和随时间的演替规律的定量研究. 本文采用实时荧光定量核酸扩增 (real-time quantitative polymerase chain reaction, QPCR) 检测手段, 结合垃圾的化学组分和性质, 研究填埋时间跨度 2~15 a 的产甲烷菌的种类、数量及其随时间和深度的变化规律.

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品来自北京北神树垃圾填埋场, 采样时间 2012 年 11 月. 如图 1 所示, 填埋场总填埋高度 51 m, 自下而上分为 5 个平台, 其中填埋时间小于 2 a 的 5 平台已采用膜覆盖, 为避免毁坏覆盖膜导致气体泄漏, 采样点分布于 1~4 平台. 采用柴油机驱动的机械冲击钻, 其前端为 0.5 m 钢管, 在夯锤的作用下打入堆体内部, 上提后将堆体内部垃圾取出. 共钻井 6 眼, 得到 A, B, C 3 组各 10 个样品, 填埋时间 2~15 a, 深度 6~36.1 m, 由于同层次 3 个取样点的垃圾入场时间相近, 深度以平均值表示 (表 1). 样品在 -80℃ 保存.



1~6 号为所钻采样井的编号

图 1 垃圾填埋堆体及采样点信息

Fig. 1 Information of the landfill and sampling points

1.2 化学分析

总有机质测定参照中华人民共和国城镇建设行业标准 CJ/T 96-1999, 灼烧法; 淀粉含量测定参照食品标准, GB/T 5009.9-2008; 纤维素、半纤维素含量测定参照 GBT 23857-2009 生活垃圾填埋场降解治理的监测与检测; 蛋白质测定采用紫外吸收法测定蛋白质的含量; 脂肪测定参照 GB 5413.3-2010. 由于垃圾不均匀, 且部分方法并非针对垃圾样品设

计, 在取样前需将大块成分剪碎, 混合均匀再取样.

垃圾样品风干、碾碎并过 1 mm 筛, 取筛下物 5 g 加入 25 mL 无 CO₂ 水, 搅拌 30 min, 静置 30 min, 离心后用 PHSJ3F 型酸度计测定上清液 pH.

将垃圾和超纯水以 1:2 混合, 密闭振荡 30 min, 静置 30 min. 依次用滤纸和 0.45 μm 的水相膜过滤, 稀释. 取 1 mL, 加入 10 μL 磷酸, 混匀. 用安捷伦气质联用仪测定, 色谱柱 DB-FFAP, 测定乙酸、丙

表 1 A、B、C 三样品组采样位点信息

Table 1 Information of the samples in Group A, B, and C

取样所在平台及填埋时间	平均堆体深度/m	取样点及深度/m	编号	取样点及深度/m	编号	取样点及深度/m	编号
4 平台(2008 ~ 2010 年)	6.0	5.5 ~ 6.0(1 号)	A ₁	5.5 ~ 6.0(2 号)	B ₁	5.5 ~ 6.0(3 号)	C ₁
	9.0	8.5 ~ 9.0(1 号)	A ₂	8.5 ~ 9.0(2 号)	B ₂	8.5 ~ 9.0(3 号)	C ₂
	13.0	12.5 ~ 13.0(1 号)	A ₃	10.5 ~ 11.0(2 号)	B ₃	12.0 ~ 12.5(3 号)	C ₃
3 平台(2003 ~ 2008 年)	15.6	5.0 ~ 5.5(4 号)	A ₄	6.0 ~ 6.5(5 号)	B ₄	5.5 ~ 6.0(6 号)	C ₄
	19.1	8.5 ~ 9.0(4 号)	A ₅	8.5 ~ 9.0(5 号)	B ₅	7.5 ~ 8.0(6 号)	C ₅
	22.1	11.5 ~ 12.0(4 号)	A ₆	12.5 ~ 13.0(5 号)	B ₆	12.0 ~ 12.5(6 号)	C ₆
2 平台(2000 ~ 2003 年)	26.6	16.0 ~ 16.5(4 号)	A ₇	15.5 ~ 16.0(5 号)	B ₇	13.5 ~ 14.0(6 号)	C ₇
	29.1	18.5 ~ 19.0(4 号)	A ₈	18.5 ~ 19.0(5 号)	B ₈	18.5 ~ 19.0(6 号)	C ₈
1 平台(1997 ~ 2000 年)	33.1	22.5 ~ 23.0(4 号)	A ₉	22.5 ~ 23.0(5 号)	B ₉	22.5 ~ 23.0(6 号)	C ₉
	36.1	25.5 ~ 26.0(4 号)	A ₁₀	25.5 ~ 26.0(5 号)	B ₁₀	25.5 ~ 26.0(6 号)	C ₁₀

酸、丁酸。

1.3 分子生物学分析

1.3.1 样品预处理和 DNA 提取

Staley 等^[17]用 pH 6.73 的冷磷酸缓冲液对垃圾充分浸提,过筛,离心,冷冻干燥,用试剂盒成功提取出 DNA。为使本研究复杂的垃圾样品与 DNA 提取试剂盒兼容,适用于下游分子生物学分析,参照该文献进行样品预处理。然后用 MOBIO PowerSoil[®] DNA Isolation kit 提取 DNA。用 MOBIO 纯化试剂盒进行纯化,至样品 DNA $A_{260/280}$ 在 1.8 左右, $A_{260/230}$ 在 2.0 左右。

1.3.2 产甲烷菌种类分析

Methanococcales、

Methanobacteriales、

Methanomicrobiales 和 Methanosarcinales 这 4 个目, Methanosarcinaceae 和 Methanosaetaceae 这 2 个科是可能存在于人工厌氧环境内的产甲烷类群^[18],包括氢、乙酸和甲基这 3 种营养类型。Methanosaeta 和 Methanosarcina 是已知仅有的两个乙酸型产甲烷菌^[19]。针对以上类群,以表 2 所示引物依次对提取的 DNA 进行聚合酶链反应 (polymerase chain reaction, PCR)。反应体系为模板 (10 ~ 1 000 ng) 1 μ L, 正反引物 (10 μ mol·L⁻¹, 各 1 μ L, 2 \times Taq PCR Master Mix 10 μ L, ddH₂O 7 μ L), 升温程序参照表 2 中的文献。PCR 产物在 1.0% 的琼脂糖凝胶上进行电泳,检验扩增结果。

表 2 产甲烷菌 PCR 扩增所用引物及探针

Table 2 Primer and probe sets for methanogens PCR

引物名称	扩增类群	引物序列 (5'-3')	扩增尺寸/bp	文献
MCC495F MCC832R	Methanococcales	TAAGG GCTGG GCAAGT CACCTAGTYCGCARAGTTTA	337	
MBT857F MBT1196R	Methanobacteriales	CGWAG GGAAG CTGTAAAGT TACCG TCGTC CACTCCTT	343	
MMB282F MMB832R	Methanomicrobiales	ATCGR TACGG GTTGT GGG CACCTAACGCRCATHGTTTAC	506	
MSL812F MSL1159R	Methanosarcinales	GTAACGATRYTCGCTAGGT GGTCC CCACA GWGTACC	354	[18]
Msc380F Msc828R	Methanosarcinaceae	GAAAC CGYGA TAAGGGGA TAGCG ARCAT CGTTTACG	408	
Mst702F Mst862R	Methanosaetaceae	TAATCCTYGARGGACCACCA CCTAC GGCAC CRACM AC	164	
MS1b585F Sae 835R	Methanosaeta	CCGGCCGGATAAGTCTCTT GA GACAACGGTGGCACCGTGGCC	250	
Mb1b 586F Sar 835R	Methanosarcina	CGGTTTGTCAGTCCTCCGG AGACACGGTGGCGGCATGCCT	249	[19]

1.3.3 产甲烷菌数量分布特征分析

以提取的基因组 DNA 为模板,用引物 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAG-3') 和 518R(5'-ATT ACC

GCG GCT GCT GG -3') 扩增细菌,用表 2 中引物扩增产甲烷菌特定量区段,产物与 PMG-18T 载体连接后导入呈感受态的大肠杆菌细胞内克隆复制。提取

纯化大肠杆菌 T 载体,梯度稀释,获取标准系列。

QPCR 反应体系:模板(2 μL)、正反引物(10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,各 1 μL)、SYBR PCR Master Mix(10 μL)、ddH₂O(7 μL);反应条件为 50 $^{\circ}\text{C}$ 预热 2 min,初始变性温度为 95 $^{\circ}\text{C}$ 10 min. 细菌体系随后进行 40 循环 PCR 反应:95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 10 s, 60 $^{\circ}\text{C}$ 退火 10 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 46 s,每个循环结束时于 72 $^{\circ}\text{C}$ 530 nm 检测荧光信号. 溶解曲线分析为 72 ~ 95 $^{\circ}\text{C}$,每隔 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 检测一次荧光. 产甲烷菌 *Methanosaeta* 和 *Methanosarcina* 随后进行 40 个循环:95 $^{\circ}\text{C}$ 30 s, 60 $^{\circ}\text{C}$ 30 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 45 s. *Methanobacteriales* 随后 40 个循环:95 $^{\circ}\text{C}$ 15 s, 60 $^{\circ}\text{C}$ 60 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 45 s. 于 60 ~ 95 $^{\circ}\text{C}$,每升高 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 检测荧光信号,以确定反应特异性。

1.4 数据处理方法

采用 MS Office Excel 处理化学分析结果和 QPCR 测得的 DNA 含量,计算各深度 3 个样品的平均值和标准误. 对各样品产甲烷菌 DNA 含量取对数,与各类有机组分和挥发性脂肪酸含量进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 垃圾的化学组分和理化性质

垃圾样品中有机组分含量随深度的变化如图 2 所示. 淀粉、脂肪、蛋白质、纤维素、半纤维素等可生物降解有机质约占垃圾干重的 5%,且随深度增加没有明显变化. 总有机质含量在 15% ~ 30% 间波动且略有升高. 据报道,原生垃圾中脂肪、淀粉、半纤维素和纤维素等可生物降解组分含量在 40% 以上,总有机质含量高达 60% 以上^[20],而 14 a 以上的垃圾有机质含量为 1.3% ~ 50.6%^[9]. 本垃圾堆体可生物降解组分较原生垃圾大幅减少,并稳定在老龄垃圾的范围内,表明有机质的快速的降解基本发生在垃圾填埋初期的 2 a 内. 而总有机质的含量变化可能与不同年份入场的垃圾成分差异有关. 我国垃圾处理技术不断发展和规范,填埋场入场垃圾成分也随之变化. 例如,GB 16889-2008《生活垃圾填埋场污染控制标准》较之前的版本对餐饮废物、粪便和养殖废物等高有机质含量的废物入场做了严格限制。

图 3 中所示为垃圾样品中乙酸、丙酸、丁酸这 3 种挥发性有机酸及 pH 值随深度的变化. 3 种挥发性有机酸的含量随填埋深度的增加均有所降低,其中乙酸含量从约 90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降到 40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下. Staley 等^[17]认为空间异质性会导致垃圾中挥发酸的

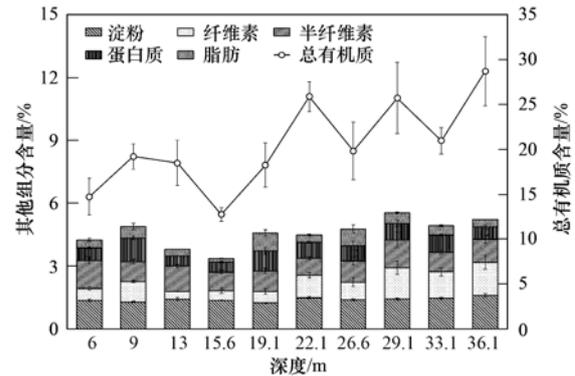


图 2 垃圾样品的化学组分随深度变化

Fig. 2 Chemical components of the waste samples along depth

初始含量随深度增加而升高,尤其是乙酸. 本堆体中乙酸含量的随深度而下降说明随填埋时间的延长,乙酸被消耗,堆体中可能存在乙酸营养型产甲烷菌. 各深度样品的 pH 值均大于 8,垃圾堆体呈弱碱性环境. 吕凡等^[22]发现 pH 由 7 升高到 8 会使垃圾水解速率大幅降低. 本堆体中可降解有机物含量的稳定,可能受碱性环境下水解速率下降的影响. 垃圾降解经历水解、产酸、产乙酸、产甲烷这 4 个阶段,水解后产酸、产乙酸过程会导致 pH 呈酸性,而在产甲烷阶段由于酸性底物降解,pH 趋于碱性^[21]. 进一步说明填埋 2 ~ 15 a 的垃圾可能处于产甲烷阶段。

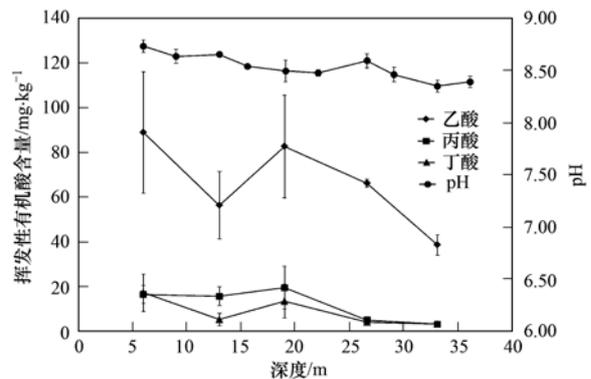


图 3 垃圾样品的 pH 值和挥发性脂肪酸含量随深度变化

Fig. 3 The pH values and VFA contents of the waste samples along depth

2.2 产甲烷菌种类

采用表 2 中引物扩增 A、B、C 三组样品中各类产甲烷菌 DNA,仅 Ms1b585F、Sae835R、Mb1b 586F、Sar835R 和 MB857F、MBT1196R 三对引物得到扩增结果,其琼脂糖电泳结果如图 4. 其余各对引物未得到明显扩增信号。

引物 Ms1b585F、Sae835R 的目标微生物为

Methanosaeta, 30 个样品中均扩增到了长度约 250bp 的目标片段. 引物 Mb1b 586F、Sar835R 的目标微生物为 *Methanosarcina*, 30 个样品中均扩增得到了长度约为 250bp 的目标片段. 这说明乙酸型产甲烷丝状菌属 (*Methanosaeta*) 和乙酸型甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina*) 两个类群普遍存在于填埋 2 ~ 15 a 的垃圾样品中. 引物 MBT857F、MBT1196R 的目标为 Methanobacteriales, 扩增得到的片段长度约 343bp. 其中 A、B 两组仅在相对浅层的样品中得到明显的目标条带, C 组条带的亮度也随填埋深度增加而减弱. 说明在该填埋时间段内, 甲烷杆菌目 (Methanobacteriales) 可能随时间减少.

已有研究表明垃圾降解过程主要的产甲烷类群是甲烷杆菌目 (Methanobacteriales)、甲烷微球菌目 (Methanomicrobiales)、甲烷八叠球菌目 (Methanosarcinales)^[12], 其中 Methanobacteriales 和 Methanomicrobiales 所包含的菌属主要是氢营养型, Methanosarcinales 的菌属有氢营养型、乙酸营养型以及甲基营养型, 其中 *Methanosarcina* 和 *Methanosaeta* 两个属主要为乙酸营养型, 个别可氧化甲醇, 甚至丁酸盐^[23]. 本研究检测到的 3 个类群在营养类型方面与文献报道吻合, 填埋 2 ~ 15 a 的垃圾中氢营养型和乙酸营养型产甲烷菌为优势类群, 甲基营养型比重可能很小.

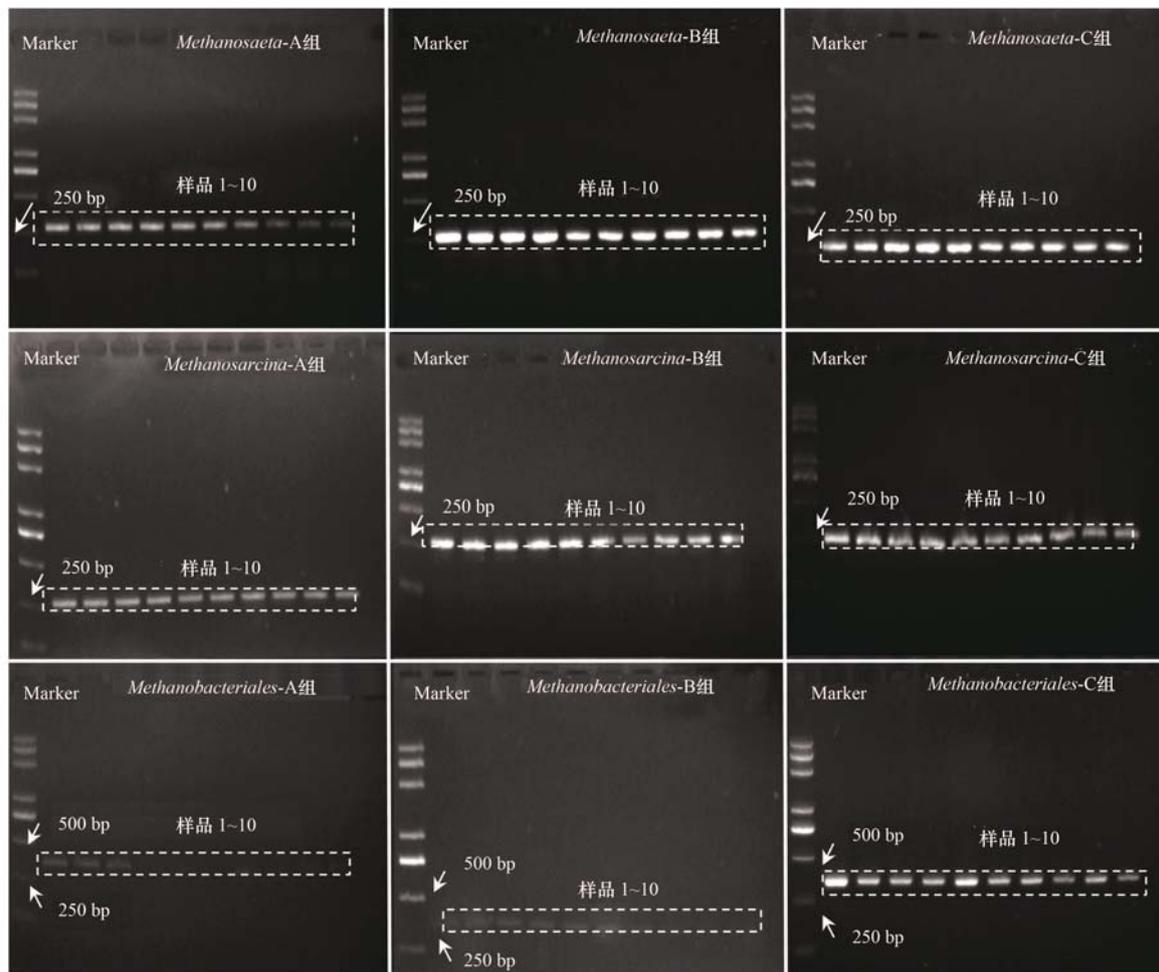


图 4 产甲烷菌 PCR 扩增结果

Fig. 4 PCR amplification results of the methanogens

2.3 产甲烷菌群落演替规律

图 5 显示了 QPCR 测得的填埋堆体中各产甲烷菌类群 DNA 含量及总细菌 DNA 含量. 垃圾中总细菌 DNA 含量在 $7.50E + 09$ copies·g⁻¹ 到 $1.11E + 12$ copies·g⁻¹ 之间. 随填时间的增加, 总细菌含量显著

降低.

Methanobacteriales 的 DNA 含量为 $4.18E + 04 \sim 1.10E + 06$ copies·g⁻¹, *Methanosaeta* DNA 的含量为 $1.74E + 04 \sim 2.55E + 06$ copies·g⁻¹, *Methanosarcina* DNA 的含量为 $4.0E + 06 \sim 5.82E + 07$ copies·g⁻¹.

A、B 这 2 组的深层样品中 *Methanobacteriales* 尽管在 PCR 结果中条带不明显,但在 QPCR 中均有检出,也表现出 QPCR 在定量检测中的优势.

填埋 2 ~ 15 a 堆体内部乙酸型的 *Methanosarcina* 最多,为垃圾堆体的代表性产甲烷菌.*Methanosarcina* 在深度 15.6 ~ 19.1 m,即填埋时间 4 ~ 9 a 达到最大,随后虽仍有波动,且整体趋于降低.乙酸营养型的 *Methanosaeta* 和氢营养型的 *Methanobacteriales* 相对较少,也呈先增多后减少的趋势,填埋后期 *Methanobacteriales* 的含量高于 *Methanosaeta*.

在以往研究中, Laloui-Carpentier 等^[24] 检测到填埋 5 a、11 a 的渗沥液中乙酸营养型 *Methanosaetaceae* 为优势类群,氢营养型的比例较小; Uz 等^[15] 发现低龄垃圾中产甲烷菌多样性高于老龄垃圾,随垃圾降解时间的推移,氢营养型产甲烷菌占据优势; Bareither 等^[25] 在实验室反应器研究中发现 *Methanomicrobiales*、*Methanobacteriales* 和 *Methanosarcinaceae* 这 3 个类群, *Methanomicrobiales* 含量最高,但因为实验室研究的时间跨度太短,仅观测到 3 类产甲烷菌随时间增多,未观测到下降阶段.根据反应器模拟,垃圾的产甲烷过程可分为 3 个阶段:第一阶段氢营养型主导,第二阶段乙酸营养型显著升高,成为主要营养类型,第三阶段乙酸营养型逐渐降低,最终氢营养型再次占优势^[14]. 各研究对象可能处于产甲烷过程的不同阶段,且同一阶段的垃圾堆体中尽管优势营养类型相同,其中的微生物种类和数量却存在差异.反应器与真实填埋场的运行时间、工程参数和环境差异很大,反应器的研究结果具有借鉴意义,但无法代表填埋场的情况.

本垃圾堆体符合产甲烷第二和第三阶段特征,但优势产甲烷菌类群和演替规律与前人研究差别较大.在填埋 2 a 以上的垃圾中,微生物总量逐渐减少,产甲烷菌呈先增多后减少的趋势,乙酸营养型的

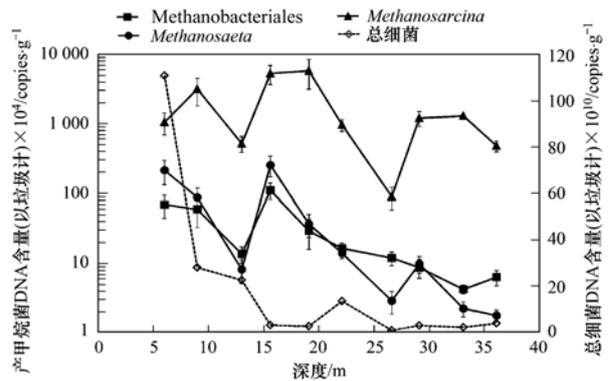


图 5 堆体内产甲烷菌和总细菌随深度的分布
Fig. 5 Distribution of methanogens and bacteria in the landfill along depth

Methanosarcina 是优势类群.

2.4 产甲烷菌丰度的影响因素

产甲烷菌 DNA 含量的对数与各有机化学组分含量的相关性分析结果如表 3 所示. 3 类产甲烷菌与乙酸、丙酸、丁酸这 3 种挥发性脂肪酸含量均为正相关. 其中 *Methanosaeta* 与 3 种挥发酸均在 0.05 的显著性水平呈中度相关, *Methanobacteriales* 和 *Methanosarcina* 与挥发酸的相关性相对较弱. 以往研究认为有效产甲烷菌底物含量的差异决定产甲烷菌群种类和数量分布^[26, 27]. 尽管 *Methanosaeta* 与 *Methanosarcina* 均为乙酸营养型产甲烷菌,但在堆体中受到乙酸含量的影响并不相同. *Methanosaeta* 和 *Methanosarcina* 是一对能够在相同底物环境下共生的微生物. 在动力学参数方面, *Methanosarcina* 具有更高的乙酸利用上限和生长速率上限,当底物充足时, *Methanosarcina* 会成为优势类群,但随着乙酸浓度的降低, *Methanosaeta* 可能会得到优势^[19]. 本堆体 *Methanosarcina* 含量始终高于 *Methanosaeta*,反映出乙酸底物充足. 对优势菌 *Methanosarcina* 来说,存在其它更强的限制性环境因子.

各类大分子有机组分和总有机质含量与 3 类产

表 3 产甲烷菌丰度对数与各有机化学指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between logarithmic Methanogen abundance and chemical parameters

成分	<i>Methanobacteriales</i>		<i>Methanosaeta</i>		<i>Methanosarcina</i>	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值	相关系数	P 值
乙酸	0.32	0.06	0.40	0.04	0.16	0.12
丙酸	0.12	0.43	0.32	0.02	0.20	0.04
丁酸	0.26	0.37	0.45	0.05	0.23	0.05
蛋白质	0.09	0.73	0.07	0.88	-0.01	0.50
淀粉	-0.19	0.42	-0.48	0.14	-0.07	0.75
半纤维素	-0.14	0.64	-0.16	0.96	0.26	0.28
纤维素	0.04	0.99	-0.19	0.30	0.15	0.60
脂肪	-0.20	0.91	-0.36	0.26	-0.38	0.13
总有机质	0.00	0.98	-0.23	0.18	0.01	0.23

甲烷菌丰度基本相关性较弱或不相关。这些有机质均不是产甲烷的底物,但它们可通过水解、发酵、产乙酸等微生物过程转化为产甲烷底物。堆体进入产甲烷阶段后,水解、发酵等微生物过程减弱。因此各类大分子组分的含量趋于稳定,对产甲烷菌群落结构的影响微弱。

此外,本研究中仍存在一定不足:受采样方法的限制,未能监测到各采样点温度和产气情况;对可能影响产甲烷菌群落的理化参数分析不全面。希望在进一步的研究中可改良采样方法,扩大理化性质分析范围,深入探寻产甲烷菌的群落演替规律。

3 结论

(1) 填埋 2 ~ 15 a 的垃圾堆体中大分子有机化学组分含量基本稳定,pH 呈弱碱性,挥发性脂肪酸含量随填埋时间延长略有下降,暗示堆体已经历过水解、产酸、产氢产乙酸阶段,以产甲烷阶段为主。

(2) 在堆体内检出了 3 类产甲烷菌,分别是 *Methanobacteriales*、*Methanosaeta* 和 *Methanosarcina*, 营养类型主要为乙酸营养型和氢营养型。

(3) 在 2 ~ 15 a 之间,随着填埋时间的延长,堆体内总细菌含量显著下降,但产甲烷菌含量先迅速上升,在填埋 4 ~ 9 a 年时达到最大,随后下降。其中乙酸营养型的 *Methanosarcina* 为优势类群。

(4) 在堆体产甲烷阶段,挥发性脂肪酸可能影响产甲烷菌群落结构,但有机大分子的水解、发酵、产乙酸等作用对产甲烷菌的影响很小。

致谢:北京市环卫集团陈鹏、刘志辉、李滕、张雪地,北神树生活垃圾填埋场各级领导与员工在样品采集中给予了极大帮助;研究组的焦安英、王溪曦、郭雪、夏树林和宾银平参加了样品采集和理化性质分析工作,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] Xu Y, Wu S Z, Zang H K, *et al.* An interval joint-probabilistic programming method for solid waste management: a case study for the city of Tianjin, China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, **8**(2): 239-255.
- [2] Chen X D, Geng Y, Fujita T. An overview of municipal solid waste management in China [J]. *Waste Management*, 2010, **30**(4): 716-724.
- [3] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策 [J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(2): 389-396.
- [4] Xu Q Y, Ge J J. Reduction of CO₂ emission using bioreactor technology for waste management in China [J]. *Energy Procedia*, 2011, **5**: 1026-1031.
- [5] Kjeldsen P, Barlaz M A, Rooker A P, *et al.* Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2002, **32**(4): 297-336.
- [6] 李春萍, 李国学, 罗一鸣, 等. 北京市 6 座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2729-2735.
- [7] Yang N, Zhang H, Shao L M, *et al.* Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: Influence of waste characteristics and LFG treatment measures [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **129**: 510-521.
- [8] Semrau J D. Current knowledge of microbial community structures in landfills and its cover soils [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **89**(4): 961-969.
- [9] Sawamura H, Yamada M, Endo K, *et al.* Characterization of microorganisms at different landfill depths using carbon-utilization patterns and 16S rRNA gene based T-RFLP [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, **109**(2): 130-137.
- [10] Cardinali-Rezende J, Debarry R B, Colturato L F D B, *et al.* Molecular identification and dynamics of microbial communities in reactor treating organic household waste [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **84**(4): 777-789.
- [11] Calli B, Durmaz S, Mertoglu B. Identification of prevalent microbial communities in a municipal solid waste landfill [J]. *Water Science & Technology*, 2006, **53**(8): 139-147.
- [12] Huang L N, Chen Y Q, Zhou H, *et al.* Characterization of methanogenic Archaea in the leachate of a closed municipal solid waste landfill [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **46**(2): 171-177.
- [13] Li T L, Mazéas L, Sghir A, *et al.* Insights into networks of functional microbes catalysing methanization of cellulose under mesophilic conditions [J]. *Environmental Microbiology*, 2009, **11**(4): 889-904.
- [14] Qu X, Mazéas L, Vavilin V A, *et al.* Combined monitoring of changes in $\delta^{13}\text{C}$ H₄ and archaeal community structure during mesophilic methanization of municipal solid waste [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, **68**(2): 236-245.
- [15] Uz I, Rasche M E, Townsend T, *et al.* Characterization of methanogenic and methanotrophic assemblages in landfill samples [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 2003, **270**(Suppl 2): S202-S205.
- [16] Nayak B S, Levine A D, Cardoso A, *et al.* Microbial population dynamics in laboratory-scale solid waste bioreactors in the presence or absence of biosolids [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, **107**(4): 1330-1339.
- [17] Staley B F, de los Reyes F L, Barlaz M A. Effect of spatial differences in microbial activity, pH, and substrate levels on methanogenesis initiation in refuse [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(7): 2381-2391.
- [18] Yu Y, Lee C, Kim J, *et al.* Group-specific primer and probe sets to detect methanogenic communities using quantitative real-time polymerase chain reaction [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **89**(6): 670-679.

- [19] Conklin A, Stensel H D, Ferguson J. Growth kinetics and competition between *Methanosarcina* and *Methanosaeta* in mesophilic anaerobic digestion [J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(5): 486-496.
- [20] 周效志, 桑树勋, 程云环, 等. 城市生活垃圾可生物降解有机质成分的测定[J]. *环境监测管理与技术*, 2007, **19**(2): 30-33.
- [21] 龙焰, 沈东升, 劳慧敏, 等. 填埋场中垃圾降解微生物机理研究进展[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2006, **32**(1): 9-13.
- [22] 吕凡, 何晶晶, 邵立明, 等. pH 值对易腐有机垃圾厌氧发酵产物分布的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 991-997.
- [23] 布坎南, 吉本斯著. 中国科学院微生物研究所《伯杰细菌鉴定手册》翻译组译. 伯杰细菌鉴定手册 [M]. (第八版). 北京: 科学出版社, 1984. 652-658.
- [24] Laloui-Carpentier W, Li T L, Vigneron V, *et al.* Methanogenic diversity and activity in municipal solid waste landfill leachates [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2006, **89**(3-4): 423-434.
- [25] Bareither C A, Wolfe G L, McMahon K D, *et al.* Microbial diversity and dynamics during methane production from municipal solid waste [J]. *Waste Management*, 2013, **33**(10): 1982-1992.
- [26] 沈东升, 何若, 刘宏远. 生活垃圾填埋处理生物技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 17-50.
- [27] 丁维新, 蔡祖聪. 沼泽产甲烷能力和途径差异的机制 [J]. *农村生态环境*, 2002, **18**(2): 53-57.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong	(3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, et al.	(3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, et al.	(3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, et al.	(3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, et al.	(3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li	(3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, et al.	(3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, et al.	(3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, et al.	(3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al.	(3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, et al.	(3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, et al.	(3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, et al.	(3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, et al.	(3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, et al.	(3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, et al.	(3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, et al.	(3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, et al.	(3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, et al.	(3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, et al.	(3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, et al.	(3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, et al.	(3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, et al.	(3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, et al.	(3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, et al.	(3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggyery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, et al.	(3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, et al.	(3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, et al.	(3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, et al.	(3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, et al.	(3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, et al.	(3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, et al.	(3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, et al.	(3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, et al.	(3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, et al.	(3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, et al.	(3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, et al.	(3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, et al.	(3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju	(3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, et al.	(3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, et al.	(3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, et al.	(3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, et al.	(3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, et al.	(3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, et al.	(3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, et al.	(3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, et al.	(3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, et al.	(3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, et al.	(3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, et al.	(3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, et al.	(3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan	(3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行