

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究

董慧峪¹, 季民²

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 以 AP、DH 两污水处理厂的剩余污泥为基质, 分别接种两厂的剩余污泥进行了厌氧消化甲烷(CH₄)生成势实验(BMP)。经改进的 Gompertz 模型和 Michaelis-Menten 模型回归分析可知, AP、DH 两厂厌氧污泥的最大比产气速率数值接近 [74.21 mL·(g·d)⁻¹ 和 51.99 mL·(g·d)⁻¹], 但对基质剩余污泥的半饱和常数 K_m 差异较大 (54 098 mg·L⁻¹ 和 19 005 mg·L⁻¹), DH 厌氧污泥对该厂剩余污泥的亲合力较好。两个批次实验结束时 TSS、COD_T 均有所下降, NH₄⁺-N 显著提高, 且高污泥负荷 F/M 条件下水质变化趋势更为显著。实验前后末端限制性片段多态性(T-RFLP)分析结果与 BMP 实验结果相一致, 实验结束后杂菌(Diverse)相对含量显著下降, 产甲烷髯毛菌 *Methanosaeta* spp. (280 bps)、产甲烷微菌 *Methanomicrobiaceae* (80 bps) 和 RC-I (389 bps) 的相对含量皆有所提高, 且 DH-BMP 样品产甲烷功能菌群相对含量提升程度高于 AP-BMP 实验前后变化。

关键词: 剩余污泥; 厌氧; 消化; 生化产 CH₄ 势; 末端限制性片段多态性

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1421-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.031

Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge

DONG Hui-yu¹, JI Min²

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: AP and DH excess sludge, sampled from AP and DH wastewater treatment plants respectively, were inoculated with their anaerobic sludge respectively and tested with biological methane potential (BMP) method. After the regression analysis with modified Gompertz and Michaelis-Menten model, it was found that although the maximum specific CH₄ production rates of AP and DH anaerobic sludge were similar [74.21 and 51.99 mL·(g·d)⁻¹], the half-saturation constants K_m differed obviously (54 098 and 19 005 mg·L⁻¹), indicating DH anaerobic sludge exhibited a higher affinity for its excess sludge. At the end of both BMP tests, the concentrations of TSS and COD_T decreased while the concentration of NH₄⁺-N increased obviously, which were more significant at higher ratios of F/M. The T-RFLP analysis results were in accordance with BMP tests. After both BMP tests, the relative amount of diverse bacteria decreased while the relative amounts of *Methanosaeta* spp. (280 bps), *Methanomicrobiaceae* (80 bps) and RC-I (389 bps) increased obviously, which were more significant in DH-BMP test compared with AP-BMP.

Key words: excess sludge; anaerobic; digestion; biological methane potential; T-RFLP

污水活性污泥处理过程中会产生大量的剩余污泥, 数量可达到污水处理量的 0.3% ~ 0.5% (以含水率 97% 计)^[1]。剩余污泥除了具有含水率高、易腐烂、恶臭等特征外, 还含有大量的病原菌、寄生虫、重金属和二噁英、苯并芘等难以降解的有毒、有害、致癌物质, 极易对土壤、地下水等造成二次污染^[2]。厌氧消化处理是对剩余污泥进行稳定化、减量化和资源化过程中被广泛采用的处理手段, 具有能耗低、污泥稳定性好、产生生物能源沼气等优点^[3]。影响剩余污泥厌氧消化过程的因子包括基础因素(厌氧污泥组成、浓度、污泥负荷等)和环境因素(pH、ORP、抑制性物质等)两大类, 其中厌氧污

泥的生物相组成和代谢活性对厌氧消化处理的过程进展发挥着重要的作用^[4]。在剩余污泥厌氧消化过程中, 由于微生物构成、对基质的适应性和接种量的不同, 采用不同的接种厌氧污泥会对剩余污泥产 CH₄ 生成势形成不同程度的影响^[5, 6]。深入探究剩余污泥厌氧消化过程中产 CH₄ 生成势与菌群动态变化的关系, 一方面可对厌氧消化过程中剩余污泥的生化降解过程和产 CH₄ 潜能进行评价^[7], 另一方

收稿日期: 2013-08-07; 修订日期: 2013-10-16

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303101); 西门子(中国)有限公司项目

作者简介: 董慧峪(1983~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: hydong@reeces.ac.cn

面也能为剩余污泥厌氧消化工艺的关键操作参数优化提供依据^[8, 9].

剩余污泥厌氧消化的效率在很大程度上取决于厌氧微生物种群多样性及优势种群的活性^[10, 11]. 不同条件下厌氧消化运行的稳定性及效率与系统群落结构的变迁会存在一定的关联. 厌氧污泥中主要存在水解发酵菌、产氢产乙酸菌、产甲烷菌及硫酸盐还原菌^[12]. 其中产甲烷菌属于典型的古细菌, 大致可以分为两类: 一类主要利用乙酸产生甲烷, 主要有产甲烷八叠球菌 (*Methanosarcina*) 和产甲烷髦毛菌 (*Methanothrix*); 另一类利用氢和二氧化碳合成甲烷. 由于传统微生物培养、鉴定的局限性, 近年来研究人员尝试应用基于 16S rRNA 的分子生物学技术 (变性梯度凝胶电泳、克隆文库技术、荧光原位杂交) 对厌氧污泥系统群落结构的变化进行分析. 其中末端限制性片段多态性 (terminal-restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 根据 PCR 扩增产物片断的大小不同以及标记片断种类和数量的不同来分析群落的结构及组成. Collins 等^[13] 利用 T-RFLP 技术对接种污泥和接种后的污泥中微生物菌群变化进行研究后发现接种污泥中占优势的产甲烷菌群是 *Methanosarcinales*、*Methanobacteria* 和 *Proteobacteria*, 而反应器运行稳定后占优势的菌群为 *Methanosarcina vacuolata* 和 *Methanobacterium palustre*. T-RFLP 技术可以很灵敏地检测微生物种类的微小变化, 能够提供微生物种群结构和数量动态变化的信息, 已成功应用于厌氧污泥产 CH₄ 菌的群落结构、动态变化的检测等方面^[14].

本研究采用剩余污泥厌氧消化产 CH₄ 生成势 (biological methane potential, BMP) 的测试方法^[15, 16], 对两厂的剩余污泥厌氧消化进行了批次实验, 在两厂剩余污泥的产的产 CH₄ 速率、基质浓度回归的基础上得出产 CH₄ 的关键参数, 评价不同剩余污泥在厌氧消化过程中的产 CH₄ 生成势; 同时对 BMP 实验前后的水质变化进行分析, 结合厌氧消化前后 T-RFLP 的变化, 对两种剩余污泥在厌氧消化过程中 CH₄ 生成势的差异进行解析^[17]. 一方面可对不同剩余污泥厌氧消化过程中的产 CH₄ 潜能进行评价, 同时也能厌氧消化工艺中微生物菌群动态变化跟踪及关键参数优化提供依据.

1 材料与方法

1.1 厌氧污泥来源与特征

本研究所用的剩余污泥、厌氧污泥分别来自于

AP 和 DH 污水处理厂, AP 污水处理厂采用合流制明渠排水沟进水, 进水水质易受降雨影响, 且泥沙等无机颗粒含量较高; DH 污水处理厂配套管网设施完善, 进水为完整的下水管网收集的城市生活污水. 污水厂长期的监测数据表明, AP 厌氧污泥的 VSS/TSS 值多在 0.5 以下, 而 DH 厌氧污泥的 VSS/TSS 值维持在 0.6 以上, 厌氧消化池代谢活性较好. AP 剩余污泥的 VSS 为 8 050 mg·L⁻¹, TSS 为 14 350 mg·L⁻¹. DH 剩余污泥的 VSS 为 9 250 mg·L⁻¹, TSS 为 13 230 mg·L⁻¹.

1.2 BMP 实验设计

AP-BMP、DH-BMP 共设置 6 组不同的污泥负荷 F/M (0、0.1、0.25、0.4、0.6、1) 进行实验, 由于污泥浓缩的不均衡性, 实测 F/M 如表 1 所示. BMP 实验在 120 mL 的血清瓶中进行, 依据测试基质浓度加入定量剩余污泥. 采用 Owen 等^[15] 提出的厌氧微量元素溶液配方, 其中 CaCl₂·2H₂O、NH₄Cl、MgCl₂·6H₂O、KCl、MnCl₂·4H₂O、CoCl₂·6H₂O、H₃BO₃、CuCl₂·2H₂O、Na₂MoO₄·2H₂O、ZnCl₂ 的浓度分别为 16.7、26.6、120、86.7、1.33、2、0.38、0.18、0.17、0.14 g·L⁻¹. 每个血清瓶加入 27 mL 的微量元素液体和 5.4 mL 的 (NH₄)₂HPO₄ (26.7 g·L⁻¹), 之后依据不同的 F/M 比值接种厌氧污泥、剩余污泥后, 盖上胶盖并用铝箔封口. 在 35℃ 下旋转培养箱内进行实验, 实验过程中以玻璃注射筒 (50 mL) 测量总产气量, 并利用 GC-ECD 测定 CH₄、CO₂ 和 H₂ 的比例. 共设置两组平行实验, 取均值进行产气量、水质分析. AP-BMP、DH-BMP 分别设置两组平行实验, 产气量测量可精确到 0.1 mL.

表 1 BMP 实验实测 F/M 比

Table 1 Measured F/M in BMP test

项目	编号	基质(S) (以 COD) /mg·L ⁻¹	接种污泥(X) (以 VSS 计)/mg·L ⁻¹	F/M
AP-BMP	0	0	14 550	0
	1	2 820	14 550	0.19
	2	6 109	14 550	0.42
	3	12 220	14 550	0.84
	4	20 680	14 550	1.42
DH-BMP	5	31 570	14 550	2.17
	0	0	12 900	0
	1	3 092	12 900	0.24
	2	5 856	11 900	0.49
	3	11 802	11 450	1.03
	4	14 650	11 700	1.25
	5	28 450	12 900	2.21

1.3 分析方法

1.3.1 常规指标

常规水质指标, 包括 pH (Suntex Ion Analyzer 3000A)、TSS (Sartorius Analytic oven)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (Autotitrator AT-400KYOTO)、TKN (Autotitrator AT-400KYOTO)、COD (回流加热滴定) 等, 均依照美国 EPA 规定的 Standard Methods^[18] 规定进行. 实验过程中气体成分 (CH_4 、 CO_2 和 H_2) 的测量采用气相色谱 (China Chromatography GC8900T) 进行.

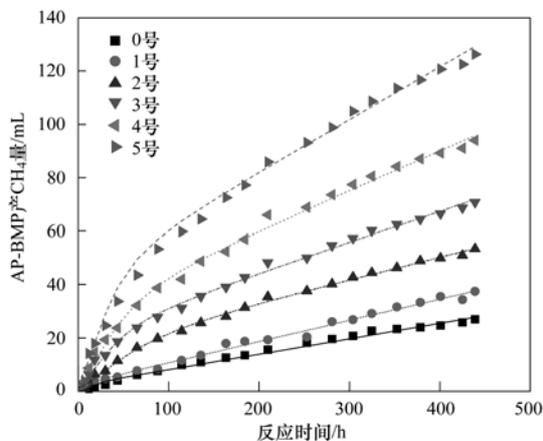
1.3.2 T-RFLP 分析

本研究参照了 Lueders 等^[19] 建立的 T-RFLP 方法对实验前后厌氧污泥的生物多样性进行分析, 实验步骤如下: ①通过 PCR 来复制 DNA 样品中的目标基因, 引物为在 5' 的尾端上带有荧光的 Ar 109f 和 Ar 912r*, 首先在 94℃ 预变性 5 min, 扩增循环阶段包括 94℃ 变性 1 min, 52℃ 退火 1 min, 72℃ 延伸 1.5 min, 共循环 28 cycles, 最后在 72℃ 条件下延伸 6 min. ②在 8.5 μL 的 PCR 产物中加入 0.5 μL Taq I 和 1.5 μL 的缓冲溶液, 在 65℃ 条件下消化切割 2 h; ③将切割后的片段利用电泳分离并以荧光侦测器 (全自动遗传分析仪, ABI PRISM 3100 Genetic Analyzer) 检测片段上所带的荧光强度. Lueders 等^[19] 成功分离、克隆出产 CH_4 髯毛菌 *Methanosaeta* spp.、产 CH_4 微菌 *Methanomicrobiaceae*、RC-1 和产 CH_4 杆菌 *Methanobacteriaceae*, 未能定性的菌种归入 Diverse 类.

1.3.3 数据分析

剩余污泥厌氧消化过程中累积 CH_4 产气量采用改进的 Gompertz 模型回归分析^[20].

$$y = (\delta \cdot t + A) \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{\max} \cdot e}{\delta \cdot t + A} \cdot (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$



式中, y 为累积产气量 (mL); δ 为产气末期校正斜率 ($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$); t 为反应时间 (h); A 为平衡产气量 (mL); R_{\max} : 最大产气速率 ($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$); λ : 迟滞期 (h).

底物的厌氧代谢过程实质上是一系列的酶促反应, 因此采用 Michaelis-Menten 模型描述剩余污泥浓度与比产气速率的关系:

$$V = V_{\max} \cdot \frac{S}{K_m + S} \quad (2)$$

式中, V_{\max} 为最大比产气速率 [$\text{mL} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$]; V 为比产气速率 [$\text{mL} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$]; K_m 为半饱和常数 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); S 为基质浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 BMP 产气结果分析

AP-BMP、DH-BMP 批次实验持续时间分别为 439 h、765 h, 6 组不同的投配比设计累积产气量存在着明显的差异. 实验初期累积产气量差异不明显 (图 1), 后期逐步增大. 两组实验气体成分均以 CH_4 (80%)、 CO_2 (20%) 为主, 同时存在少量的 H_2 (不足 1%). 实验产气均匀, 可分为两个阶段. 第一阶段产气速率大, 产甲烷菌利用溶解性 COD 或易水解性物质进行厌氧发酵; 之后产气速率逐渐降低至稳定水平, 该阶段的限速步骤为剩余污泥的水解过程, 产气随着水解的进程而稳定增加. 至该实验结束时, 每天仍有稳定体积的气体产生, 表明微生物的水解、厌氧产 CH_4 仍在进行中. 应用改进的 Gompertz 模型对 AP-BMP、DH-BMP 产气进行回归后的参数如表 2 所示. 两厂的厌氧污泥产气数据与改进的 Gompertz 模型拟合较好 ($R^2 > 0.99$). 通常厌氧消化过程中的限速步骤为水解破壁过程^[21, 22], 在无添加

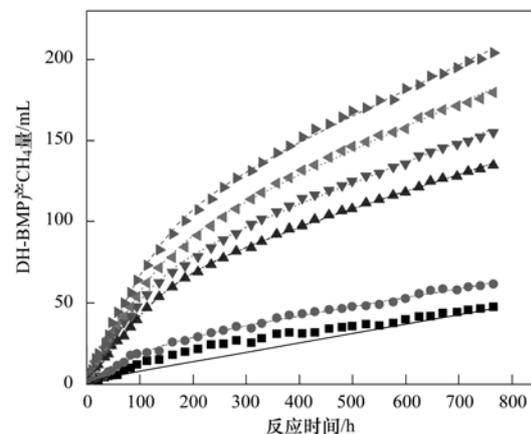


图 1 实测 CH_4 累积产气量与回归曲线

Fig. 1 Measured cumulative volume of CH_4 and regression curve

表 2 改进 Gompertz 模型回归 BMP 实验参数

Table 2 Regression results in BMP test with modified Gompertz model

项目	编号	λ /h	R_{max} /mL·h ⁻¹	δ /mL·h ⁻¹	A /mL	VSS /g	V_{max} /mL·(g·d) ⁻¹	R^2
AP-BMP	0	20.00	0.15	0.06	19.14	1.164	3.00	0.992
	1	7.58	0.23	0.08	23.05	1.164	4.70	0.993
	2	0.00	0.38	0.13	33.23	1.164	7.85	0.998
	3	0.00	0.65	0.18	41.74	1.164	13.46	0.996
	4	0.00	0.96	0.25	57.02	1.164	19.83	0.996
	5	0.00	1.35	0.34	77.53	1.164	27.75	0.996
DH-BMP	0	12.92	0.19	0.08	28.33	1.032	4.39	0.990
	1	3.93	0.29	0.09	42.20	1.032	6.69	0.997
	2	0.00	0.78	0.20	95.48	1.119	16.73	0.999
	3	0.00	0.96	0.23	109.09	1.076	21.35	0.998
	4	0.00	1.15	0.27	128.88	1.076	25.72	0.999
	5	0.00	1.31	0.30	155.11	1.032	30.57	0.999

外来基质的 0 号样品中, AP、DH 厌氧污泥的迟滞期分别为 20.00 h、12.93 h, 表明 DH 厌氧污泥的活性较高。

采样 Michaelis-Menten 模型对两个批次实验的基质浓度、比产气速率回归后的结果如图 2 所示 ($R^2 > 0.99$)。AP、DH 厌氧污泥的最大比产气速率差距不大, 分别为 74.21、51.99 mL·(g·d)⁻¹, 但两厂厌氧污泥的 K_m 存在着显著的差异, DH 厌氧污泥的 K_m 为 19 005 mg·L⁻¹ 而 AP 厌氧污泥的 K_m 高达 54 098 mg·L⁻¹。 K_m 是表征底物亲和力的常数, 表明 AP 厌氧污泥对该厂剩余污泥的适应性差, 需要在较高的基质浓度下才能表现出较好的产 CH₄ 性能。

2.2 水质变化分析

AP-BMP、DH-BMP 两个批次实验结束时不同 F/M 条件下的水质状况如下表 3 所示。两个批次实验中随着 F/M 增大, pH 由弱酸性渐变为弱碱性, 分别位于在 6.8 ~ 7.2、6.7 ~ 7.1 范围内。0 号呈弱酸性, 可能由未添加基质, 厌氧污泥自身的水解造成^[23]。DH-BMP 与 AP-BMP 实验结束时 ORP 值分别位于 -235 ~ -280 mV 与 -235 ~ -282 mV 范围内。随着 F/M 比的增大, 两个批次实验的 ORP 值都呈下降的趋势。厌氧环境的主要标志是发酵液具有低的 ORP, 不同的厌氧消化体系和不同的厌氧微生物对 ORP 的要求不同^[24]。

两批次实验中在高 F/M 条件下 COD_T 下降明显。与 AP-BMP 实验相比, DH-BMP 实验结束后 COD_T 下降更为显著, 5 号样品中由之前的 47 000 mg·L⁻¹ 下降至 32 480 mg·L⁻¹, 在高 F/M 条件下厌氧消化进行得更为完全。批次实验前后, NH₄⁺-N 浓度均有提高, 不同 F/M 条件下 NH₄⁺-N 变化差异较大, DH-BMP 实验中 5 号样品实验结束后 NH₄⁺-N 浓度达到了 755.5 mg·L⁻¹。污泥厌氧消化过程中, 污泥的水解是限速步骤。在高 F/M 条件下, 厌氧污泥代谢旺盛, 使得剩余污泥的破壁、氨化过程进行得较为完全, 从而使得 NH₄⁺-N 显著提升^[4]。两个批次实验前后 TSS 变化呈现出与 COD_T 类似的趋势, 高 F/M 条件下下降趋势明显, DH-BMP 实验中 5 号样品的 TSS 由实验前的 45 100 mg·L⁻¹ 下降至 38 050 mg·L⁻¹。综合比较 AP-BMP 与 DH-BMP 实验前后水质变化, DH-BMP 实验前后 COD_T、TSS 下降趋势更加明显, 表明 DH-BMP 过程中代谢活跃, 厌氧消化过程进行得较为完全。

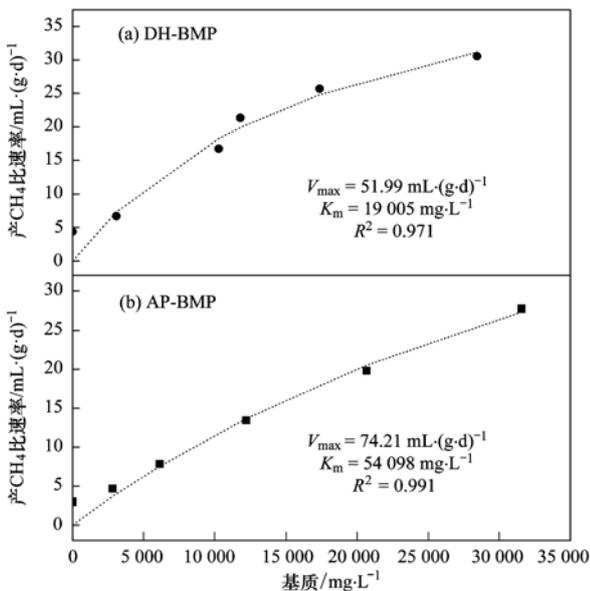


图 2 Michaelis-Menten 模型回归 BMP 产 CH₄ 速率参数

Fig. 2 Regression results of methane production rate curve in BMP test with Michaelis-Menten model

表 3 BMP 实验末期不同 F/M 条件下主要水质

项目	编号	pH	ORP /mV	COD _T /mg·L ⁻¹		NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹		TSS/mg·L ⁻¹	
				始	终	始	终	始	终
AP-BMP	0	6.8	-235	20 070	18 720	115.6	199.0	30 350	28 300
	1	6.9	-248	22 880	21 430	126.4	232.4	34 150	32 900
	2	7.0	-247	26 170	23 890	132.3	259.4	39 250	37 100
	3	7.0	-253	32 280	29 060	141.0	360.2	46 900	43 350
	4	7.1	-267	40 740	36 750	153.4	400.3	54 750	50 200
	5	7.2	-280	51 640	45 250	170.1	509.2	65 100	61 200
DH-BMP	0	6.7	-235	18 550	16 020	189.5	286.3	22 000	18 050
	1	6.8	-248	21 650	17 460	185.9	323.7	22 500	18 750
	2	6.9	-249	26 070	21 530	190.6	461.1	29 350	26 550
	3	6.9	-259	27 590	22 720	196.5	516.5	31 050	27 500
	4	7.0	-268	35 920	27 800	232.1	601.0	36 850	31 300
	5	7.1	-282	47 000	32 480	258.9	755.5	45 100	38 050

2.3 厌氧污泥生物多样性分析

图 3 表示了以 AP-BMP、DH-BMP 实验前后产甲烷功能菌组成的变化情况. 与 AP-BMP、DH-BMP 两个批次实验中产 CH₄、水质变化情况相一致, DH 接种厌氧污泥中产甲烷菌群的相对含量高于 AP 接种厌氧污泥, AP-BMP 中 0 号样品的杂菌 (Diverse) 相对含量超过 60%. DH 厌氧污泥中产甲烷功能菌群丰富且相对含量较高, 可能是 DH-BMP 实验中半饱和常数 K_m 显著低于 AP-BMP 中回归数值的重要原因.

AP-BMP 实验后, 未添加基质的 0 号实验结束后杂菌 (Diverse) 相对含量降至 14%, 这可能是由于基质的缺乏, 产甲烷菌将杂菌 (Diverse) 分解代谢造成. 4 号样品中的杂菌 (Diverse) 含量也有所降低但幅度不大. 同时实验结束后, 两组的产甲烷髯毛菌 *Methanosaeta* spp. (280 bps)、产甲烷微菌 *Methanomicrobiaceae* (80 bps) 和 RC-I (389 bps) 的

相对含量皆有提高. DH-BMP 实验前后产甲烷功能菌的组成变化情况与 AP-BMP 变化类似. DH-BMP 实验结束时杂菌 (Diverse) 含量降低, 0 号、5 号样品中杂菌 (Diverse) 相对含量不足 17%. 产甲烷髯毛菌 *Methanosaeta* spp. (280 bps)、产甲烷微菌 *Methanomicrobiaceae* (80 bps) 和 RC-I (389 bps) 的相对含量皆有所提高, 表明产甲烷菌的活性和相对丰度在实验过程中得以提高. 已有研究发现产甲烷髯毛菌 *Methanosaeta* spp. 主要以乙酸为基质生成甲烷^[25], 实验结束后产甲烷髯毛菌 *Methanosaeta* spp. 相对含量提高, 而其它两种产甲烷菌以 H₂ 和 CO₂ 为基质生成甲烷, 由于两组 BMP 实验中 H₂ 的生成量较低 (不足 1%), 因此产甲烷杆菌 *Methanobacteriacea* (88 bps)、产甲烷微菌 *Methanomicrobiaceae* (80 bps) 相对含量变化不如产甲烷髯毛菌 *Methanosaeta* spp. (280 bps) 增加显著^[4].

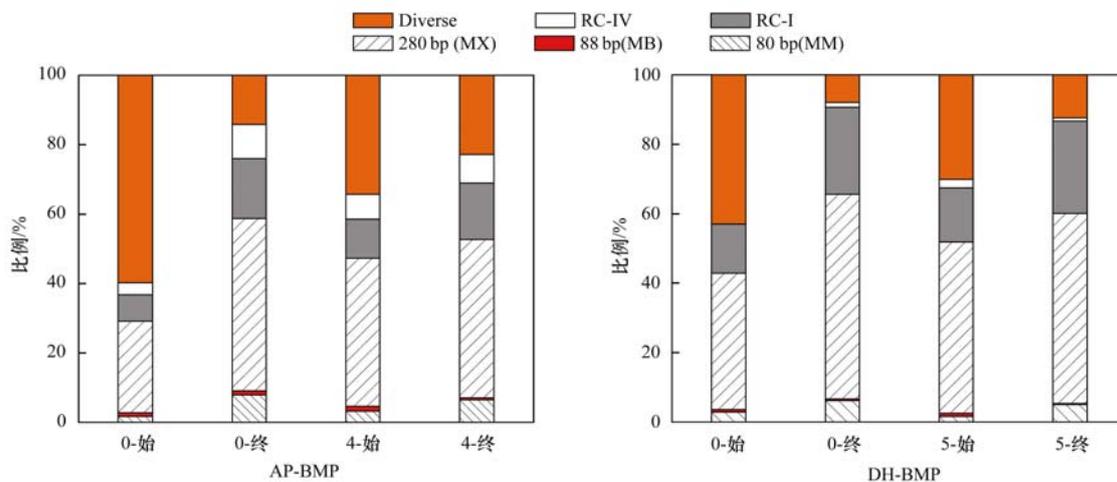


图 3 AP、DH 剩余污泥厌氧消化前后主要 T-RFs 丰度变化

Fig. 3 Variations of relative abundance of major T-RFs in the anaerobic digestion of AP and DH excess sludge

3 结论

(1) AP、DH 剩余污泥厌氧消化产 CH_4 采用改进 Gompertz 模型回归的最大比产气速率数值接近, 分别达到了 $74.21 \text{ mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $51.99 \text{ mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 但对基质剩余污泥的半饱和和常数 K_m 差异较大, 分别为 $54\ 098 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $19\ 005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明 AP 剩余污泥亲和性差、难于厌氧消化。

(2) BMP 实验结束后, TSS、 COD_T 有所下降, NH_4^+-N 显著提高, 且高污泥负荷 F/M 条件下水质变化趋势更为显著。与 AP-BMP 实验相比, DH-BMP 水质变化显著。

(3) 两批次实验前后 T-RFLP 分析结果与其生化产 CH_4 势相一致, 实验结束后杂菌 (Diverse) 相对含量显著下降, 产甲烷髦毛菌 *Methanosaeta* spp. (280 bps)、产甲烷微菌 *Methanomicrobiaceae* (80 bps) 和 RC-I (389 bps) 的相对含量皆有所提高, 且 DH-BMP 样品中产甲烷功能菌群相对含量提升程度高于 AP-BMP。

参考文献:

- [1] 陈伟, 贾原媛, 郑伟, 等. 胞外多聚物对酶催化污泥厌氧水解的影响研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2334-2339.
- [2] Zhang D, Chen Y G, Zhao Y X, *et al.* New sludge pretreatment method to improve methane production in waste activated sludge digestion[J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(12): 4802-4808.
- [3] Yan Y Y, Chen H L, Xu W Y, *et al.* Enhancement of biochemical methane potential from excess sludge with low organic content by mild thermal pretreatment[J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, **70**: 127-134.
- [4] Baserba M G, Angelidaki I, Karakashev D. Effect of continuous oleate addition on microbial communities involved in anaerobic digestion process[J]. Bioresource Technology, 2012, **106**: 74-81.
- [5] Raposo F, Fernández-Cegri V, De La Rubia M A, *et al.* Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011, **86**(8): 1088-1098.
- [6] Labatut R A, Angenent L T, Scott N R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2255-2264.
- [7] Elbeshbishy E, Nakhla G, Hafez H. Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: Influence of inoculum pre-incubation and inoculum source [J]. Bioresource Technology, 2012, **110**: 18-25.
- [8] Zhang J B, Wu J, Poncin S, *et al.* Microscale investigation of anaerobic biogas production under various hydrodynamic conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **46**(16): 8698-8704.
- [9] Lesteur M, Bellon-Maurel V, Gonzalez C, *et al.* Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review [J]. Process Biochemistry, 2010, **45**(4): 431-440.
- [10] Entürk E S, Ince M, Engin G O. Treatment efficiency and VFA composition of a thermophilic anaerobic contact reactor treating food industry wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 843-848.
- [11] 吴静, 赵鹏娟, 田磊, 等. 高温污泥厌氧消化器的启动[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 520-523.
- [12] 史宏伟, 邹德勋, 左剑恶, 等. 原料差异对厌氧消化微生物群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1675-1682.
- [13] Collins G, Woods A, McHugh S, *et al.* Microbial community structure and methanogenic activity during start-up of psychrophilic anaerobic digesters treating synthetic industrial wastewaters[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2003, **46**(2): 159-170.
- [14] Nikolausz M, Walter R F H, Sträuber H, *et al.* Evaluation of stable isotope fingerprinting techniques for the assessment of the predominant methanogenic pathways in anaerobic digesters[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(5): 2251-2262.
- [15] Owen W F, Stuckey D C, Healy J B Jr, *et al.* Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity [J]. Water Research, 1979, **13**(6): 485-492.
- [16] Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays[J]. Water Science and Technology, 2009, **59**(5): 927-934.
- [17] Gunaseelan V N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, **26**(4): 389-399.
- [18] APHA. Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater [M]. (19th ed.). Washington DC: American Public Health Association, 1999.
- [19] Lueders T, Friedrich M. Archaeal population dynamics during sequential reduction processes in rice field soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(7): 2732-2742.
- [20] Zwietering M H, Jongenburger I, Rombouts F M, *et al.* Modeling of the bacterial growth curve [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, **56**(6): 1875-1881.
- [21] Noike T, Endo G, Chang J E, *et al.* Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1985, **27**(10): 1482-1489.
- [22] 王静, 杨殿海. 剩余污泥与废弃油脂混合厌氧消化产气缓滞因素研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(5): 1088-1094.
- [23] 张波, 史红钻, 张丽丽, 等. pH 对厨余废物两相厌氧消化中水解和酸化过程的影响[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(5):

665-669.

[24] 段妮娜, 董滨, 李江华, 等. 污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 321-327.

[25] Panichnumsin P, Ahring B, Nopharatana A, *et al.* Microbial community structure and performance of an anaerobic reactor digesting cassava pulp and pig manure[J]. Water Science and Technology, 2012, 66(7): 1590-1600.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjcx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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