

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

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

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希珑 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺和 Fe³⁺对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究

田颖, 王坤, 徐期勇*

(北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 聚硅酸盐复合环保材料工程实验室, 深圳 518055)

摘要: 通过实验室模拟填埋柱, 将厌氧生物反应器与上层曝气式生物反应器进行对比研究, 以探究好氧预处理-厌氧运行方式下生物反应器内固体垃圾、渗滤液性质以及填埋气回收率的变化特征。结果表明, 厌氧生物反应器 A1 受酸抑制影响, 实验过程中几乎无甲烷气体产生, 垃圾层沉降高度 5.4 cm, 且主要归结于垃圾自身重力下的压实作用, 渗滤液 COD、VFA 浓度高达 $70\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 尚未出现降低趋势。好氧预处理则有效缓解了填埋柱内酸抑制现象, 垃圾降解速度明显加快, 产甲烷环境于曝气 60 d 内建立。至反应器运行结束, 垃圾层沉降高度 11.5 cm, 渗滤液 COD、VFA 浓度分别降低至 $14\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8\,900\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 甲烷累积产量 $61\,976\text{ mL}$, 回收利用率高达 95% 以上。然而, 上层曝气式生物反应器操作模式相对比较复杂, 其反应器运行效果还受到回灌操作和曝气条件等多方面因素的影响和制约。因此, 需调节渗滤液回灌操作与曝气条件以实现反应器的高效运行。

关键词: 生物反应器; 城市生活垃圾; 上层曝气; 甲烷化; 渗滤液

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4365-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.045

Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer

TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong

(Shenzhen Engineering Laboratory for Eco-efficient Polysilicate Materials, School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to study the effects of upper-layer aerobic pretreatment in bioreactors on refuse degradation, leachate condition and methane production, two simulated columns were constructed, including traditional anaerobic bioreactor A1 and hybrid bioreactor C1 with aeration pretreatment in the upper layer. Results indicated that A1 was seriously inhibited by the accumulation of volatile fatty acids (VFA) with nearly no methane production and slower settlements. At the end of operations, refuse in A1 only deposited 5.4 cm which was less than half of that in C1. And up to $70\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD and $30\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ VFA could be monitored in the leachate. On the contrary, aerobic pretreatment effectively improved the removal of high VFA concentrations and remarkably accelerated the degradation rate. In bioreactor C1, COD and VFA concentrations were reduced to less than $14\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $8\,900\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at the end of the experiment, respectively. And about $61\,976\text{ mL}$ methane gases were produced since aeration ceased on day 60 with its methane recovery efficiency rising to over 95%. However, the performance of hybrid bioreactors was still closely related to its operation conditions, such as aeration supply and leachate recirculation. Therefore, in order to guarantee better performance, appropriate aeration and leachate operations need to be provided.

Key words: bioreactor; MSW; aeration in the upper layer; methanogenesis; leachate

生物反应器作为垃圾填埋新技术近年来得到人们的广泛关注,并在欧美等国迅速发展应用^[1]。然而,由于我国垃圾有机质含量丰富,直接采用厌氧生物反应器操作容易受到高浓度有机酸抑制,产甲烷过程严重滞后,垃圾处理效果并不明显^[2~4]。研究发现好氧预处理可降低易降解有机物含量,协调垃圾水解酸化和产甲烷过程的平衡,减少病原微生物,并削弱部分难降解有机物内部化学键,提高城市有机生活垃圾厌氧处理降解效率和能源回收率,实现垃圾快速降解和甲烷化^[5~7]。Cheunbarn 等^[8]通过对剩余污泥的研究发现,与单一厌氧消化相比,通过高温好氧预处理后的污泥,甲烷产量可增加 17%,气体中硫化氢的含量得到有效降低。Hasegawa 等^[9]

实验结果也显示,经过 24 h 高温好氧堆肥处理后的有机污泥厌氧消化效率提高,生物气产量可增加 150%。

然而目前好氧-厌氧联合反应器的应用大多集中在高浓度有机废水、城市污水处理厂污泥处理等方面,在生活垃圾处理方面研究与应用却比较少^[6, 10, 11]。因此,本实验结合生物反应器和好氧预处理技术,构建上层曝气式生物反应器,与厌氧生物

收稿日期: 2014-04-30; 修订日期: 2014-06-04

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201305022); 深圳市孔雀计划科技创新项目(KQCX20120807101833385)

作者简介: 田颖(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为固体废物处理与资源化, E-mail: yying_1989@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qiyongxu@pkusz.edu.cn

反应器进行对比研究,以探究上层曝气式生物反应器内渗滤液、填埋气和固体垃圾的变化规律,以期
为反应器实际运行调控提供理论依据和技术支持.

1 材料与方 法

1.1 实验材料及组成成分

填埋垃圾为人工配制垃圾,按照深圳市城市生活垃圾组成确定^[12]. 填埋前垃圾经破碎预处理,控制粒度在 5 cm 以下,具体成分和比例如表 1 所示. 反应柱内均装填垃圾 4 kg, 填埋密度约为 570 kg·m⁻³. 混合垃圾含水率 54%, 有机质质量分数为 64%.

表 1 填埋垃圾组成

Table 1 Composition of MSW

垃圾组成	质量分数/%	填埋质量/kg
金属	0.5	0.02
玻璃	4.5	0.18
纸板	10.0	0.40
塑料	10.0	0.40
沙土	20.0	0.80
餐厨垃圾	55.0	2.20
总计	100.0	4.00

1.2 反应器设计与运行操作

实验采用模拟生物反应器填埋柱进行. 反应器由有机玻璃制成,内径 150 mm,柱高 650 mm,可填充垃圾体积约 11.5 L,顶部设填埋气收集口和渗滤液回灌口,底部设有渗滤液排出口. 上层曝气式生物反应器填埋柱顶部还另设曝气口,用于上层垃圾的曝气通风. 模拟生物反应器填埋柱结构如图 1 所示.

反应柱顶部和底部分别铺设渗滤液分散与集水层,以保证渗滤液的均匀分布,防止出水口阻塞. 上层曝气式生物反应器在填埋垃圾层 1/3 高度处铺设 5 cm 厚砾石层,外界空气通过电磁性曝气泵输送至砾石层中,以实现对上层垃圾的均匀曝气处理. 另外, 竖直曝气管底端连接一防滑挡板,曝气管可随垃圾层的沉降而逐渐下移,确保曝气孔始终处于砾石层中.

实验共设置厌氧生物反应器 A1 和上层曝气式生物反应器 C1 2 个模拟填埋柱,反应器运行条件如表 2 所示. 实验过程中温度控制在 30℃, 渗滤液进行原液回灌每次 250 mL,回灌频率根据渗滤液具体指标的变化进行相应调整. 待 C1 反应器内渗滤液 pH 值大于 7.0 时,停止曝气处理,反应器转变为厌氧生物反应器运行.

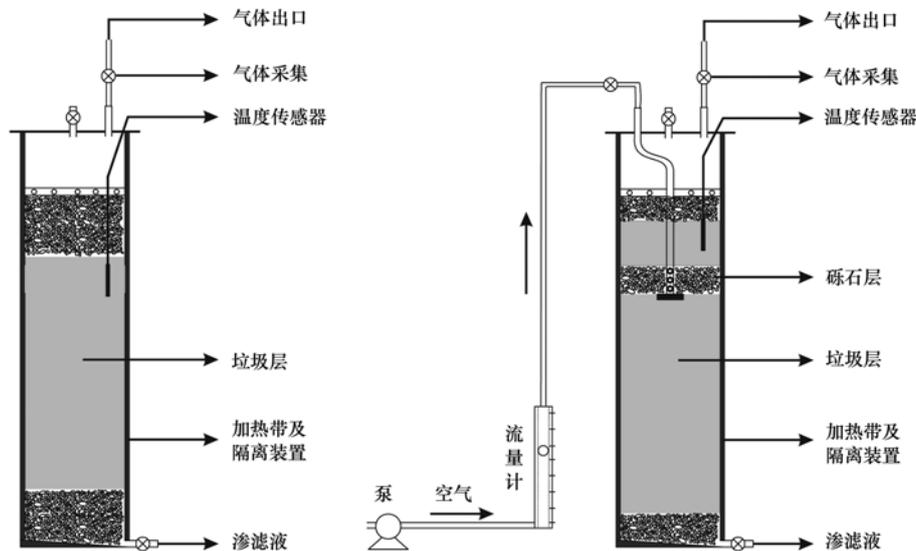


图 1 模拟生物反应器填埋柱结构示意图

Fig. 1 Schematics of landfill columns of simulated bioreactors

表 2 反应器运行条件

Table 2 Operation condition of each simulated column

反应器	曝气操作	渗滤液操作
A1	无	0 ~ 76 d, 回灌渗滤液, 每次 250 mL, 每天 1 ~ 3 次 77 ~ 115 d, 无渗滤液回灌 116 ~ 184 d, 回灌渗滤液, 每次 250 mL, 每天 3 次
C1	0 ~ 60 d, 每天曝气 4 次, 每次曝气 2 h, 间隔 4 h, 曝气速率为 250 mL·min ⁻¹ 61 ~ 184 d, 无曝气操作	0 ~ 76 d, 回灌渗滤液, 每次 250 mL, 每天 1 ~ 3 次 77 ~ 115 d, 无渗滤液回灌 116 ~ 184 d, 回灌渗滤液, 每次 250 mL, 每天 3 次

1.3 分析指标与分析方法

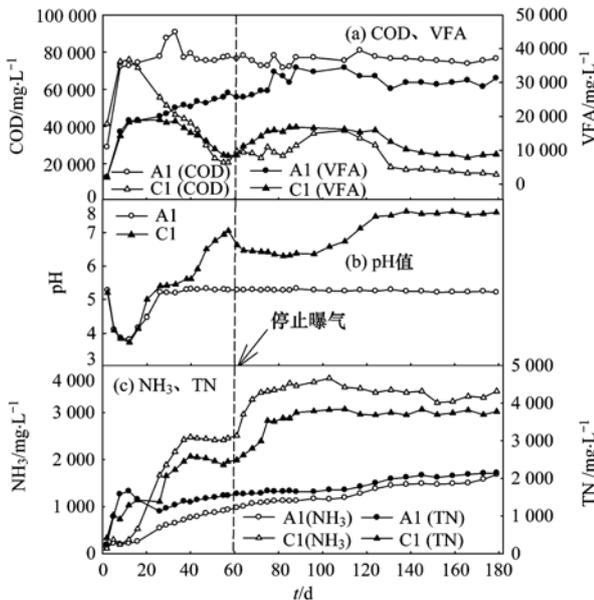
模拟埋埋柱共连续运行 6 个月, 定期采集气体与渗滤液样品进行 CH₄、CO₂ 等气体指标的监测(1 天 1 次~2 天 1 次)以及 COD、VFA、NH₃、pH 等水质指标的分析(1 周 2 次~2 周 1 次). 其中, 气体分析仪采用福利 GC-9790, 分析条件设定为: 进样口温度 50℃, 柱温 70℃, TCD 检测器温度 100℃, 桥流 110 mA; 水质指标中 pH 值的监测采用玻璃电极法, 其余指标均依据标准方法^[13]进行测定.

2 结果与分析

2.1 厌氧生物反应器

本实验中, 模拟埋埋柱 A1 始终保持厌氧环境, 垃圾降解速度缓慢, 渗滤液水质较差. 实验结果如图 2 所示, 反应器内 COD 浓度在埋埋初期迅速上升, 20 d 内达到 70 000~80 000 mg·L⁻¹ 的较高水平, 随后维持稳定, 至实验结束, 仍未呈现降低趋势, 且 BOD₅/COD 约为 0.69, 渗滤液可生化性较高. 同 COD 相似, VFA 浓度在快速增长阶段后保持缓慢增加趋势, 逐渐累积到 30 000 mg·L⁻¹ 以上维持相对稳定. 与之相对应, 埋埋柱后期渗滤液 pH 值滞留在 5.20~5.25 的酸性环境不能继续上升. 此外, 渗滤液内氨氮浓度增长缓慢, 最高累积至 1 700 mg·L⁻¹, 氨氮在总氮中所占比例为 78%, 远低于好氧处理埋埋柱.

由于反应器内高浓度有机酸的大量累积, 微生



(a) COD、VFA; (b) pH 值; (c) NH₃、TN

图 2 渗滤液水质变化曲线

Fig. 2 Variations of leachate parameters

物代谢活动受到抑制, 导致垃圾降解速度减慢, 甲烷化过程受到不利影响. 实验过程中埋埋柱 A1 共累积产气 35 985 mL, 其主要成分为 CO₂, 几乎无甲烷气体产生(图 3). 反应器连续运行 184 d, 垃圾层沉降高度为 5.4 cm(图 4), 且其沉降主要归结于前期垃圾自身重力下的压实作用, 后期沉降速率较为缓慢. 厌氧生物反应器减量化效果较差, 垃圾呈现“青贮”状态^[14].

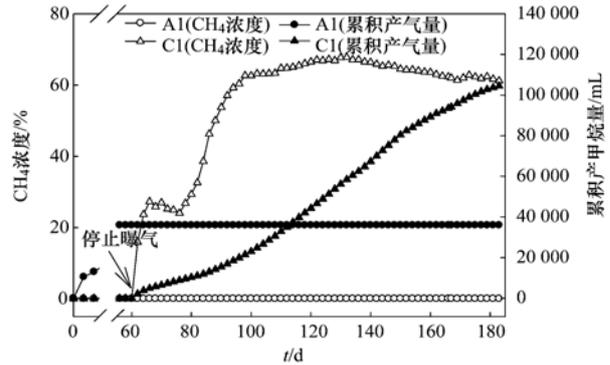


图 3 甲烷浓度随埋埋时间变化曲线

Fig. 3 Variations of methane concentrations

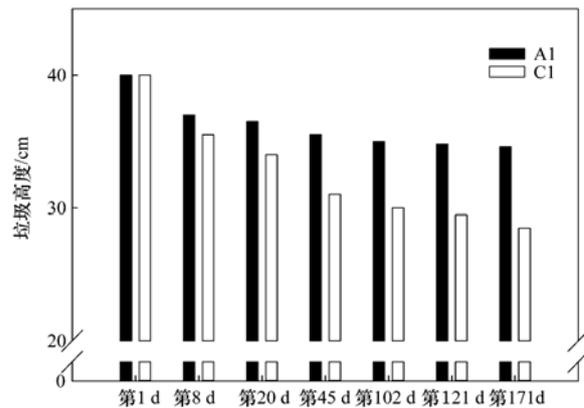


图 4 垃圾层高度随埋埋时间变化曲线

Fig. 4 Variations of refuse height

2.2 上层曝气式生物反应器

与厌氧生物反应器不同, 上层曝气式生物反应器 C1 经过 60 d 好氧预处理, 有机酸累积现象得到有效缓解, 垃圾降解速度明显加快^[15]. 如图 2 所示, 在好氧预处理结束时, 渗滤液内 COD、VFA 浓度分别下降至 20 000 mg·L⁻¹ 和 8 600 mg·L⁻¹, 相比最高浓度降低幅度达到 60% 以上. 与此同时, 渗滤液 pH 值在埋埋初期快速下降至 3.73 后逐渐升高, 曝气 60 d 时达到 7.0 的预处理要求, 埋埋柱转为厌氧生物反应器运行. 至实验结束, 上层曝气式生物反应器内渗滤液 COD、VFA 浓度分别为 14 000 mg·L⁻¹ 和 8 900 mg·L⁻¹, BOD₅/COD 约为 0.49, 可生

化性较厌氧生物反应器有所降低. 并且, 模拟填埋柱 C1 内渗滤液氨氮浓度增长迅速, 72 d 时达到 $3\ 400\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的较高浓度并保持稳定, 氨氮在总氮中所占比例由初始 26% 逐渐增加到 92%. 反应器 C1 原位脱氮能力远小于垃圾降解产生氨氮的能力, 这可能与渗滤液回灌操作和曝气条件等因素的设置有关, 相同结果在马泽宇等^[14] 实验中也出现. 整体来看, 上层曝气式生物反应器中的垃圾降解程度大于厌氧生物反应器.

好氧处理还可调节有机垃圾内异养菌、产氢产乙酸菌与产甲烷菌之间的平衡, 促进产甲烷环境的迅速建立^[16]. 上层曝气式生物反应器停止曝气后, 甲烷浓度迅速升高, 最大增长速率达到每天 8%, 25 d 内即达到 40% 的较高浓度. 至反应器运行 184 d 时, 填埋柱 C1 共累积产气 104 475 mL, 其中甲烷含量 61 976 mL, 浓度维持在 60% 左右 (图 3). 一般认为, 甲烷浓度 40% 以上的填埋气具有较高利用价值^[17]. 按照此要求推算可知, 上层曝气式生物反应器 C1 内可回收甲烷量达到 95% 以上, 具有较好的垃圾资源化效果. 此外, 上层曝气式生物反应器也加速了垃圾的沉降. 如图 4 所示, 实验过程中垃圾层总沉降高度 11.5 cm, 沉降度高达 28.75%, 是厌氧生物反应器的 2 倍以上.

3 讨论

从实验结果可以看出, 上层曝气式生物反应器将垃圾好氧预处理与厌氧生物反应器两种技术结合起来, 有效改善了厌氧填埋环境下的酸抑制现象, 促进反应器后期产甲烷过程快速启动和稳定甲烷化.

曝气预处理和渗滤液回灌是上层曝气式生物反应器运行过程中的主要影响因素, 对垃圾最终处理效果和实际应用价值产生重要影响. 根据实验过程中这两个主要参数的运行条件, 可将上层曝气式生物反应器运行过程划分为 4 个阶段: 第一阶段 (曝气预处理, 0 ~ 60 d); 第二阶段 (产甲烷抑制, 61 ~ 76 d); 第三阶段 (停止回灌渗滤液, 77 ~ 115 d) 和第四阶段 (恢复回灌渗滤液, 116 ~ 184 d), 如图 5 所示.

3.1 曝气条件

研究表明, 上层曝气处理可加速有机酸降解, 调节垃圾水解酸化与甲烷化过程之间的不平衡, 促进甲烷化环境的迅速建立^[18, 19]. 在本研究开始 60 d 内, 反应器 C1 处于曝气预处理阶段, 高浓度 VFA 在上层垃圾好氧处理条件下逐渐消耗, 由最高浓度

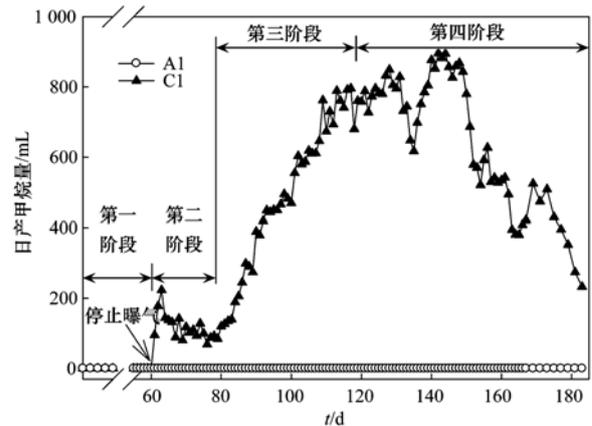


图 5 日产甲烷量随填埋时间变化曲线

Fig. 5 Variations of daily methane productions

$24\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐降低至 $8\ 600\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与此同时, 渗滤液 pH 值迅速上升至 7.0 以上, 反应器随曝气停止快速进入产甲烷阶段; 厌氧生物反应器内渗滤液 pH 值则滞留在 5.20 ~ 5.25 之间, 高浓度有机酸的累积抑制了产甲烷过程的进行, 实验过程中几乎无甲烷气体产生.

然而, 曝气处理在缓解酸抑制的同时也消耗了大量有机质, 对后续甲烷化过程的稳定性产生重要影响. 张记市等^[20] 研究发现短程好氧发酵可增大 VS 降解率与 SCOD 浓度, 提高厌氧消耗效率和累积产气量, 但过度好氧发酵则会消耗底物、减低产气量, 过短发酵也达不到降解 VS 和增加 SCOD 的效果. 相关实验^[15, 21] 也证明, 预处理阶段, 较大曝气量可加速垃圾降解速度, 缩短预处理时间, 但有机质损耗较大, 垃圾后期氧气利用率降低, 资源化效果和经济性能均较差.

研究者认为填埋层稳定产甲烷阶段, 由于垃圾中脂肪含量不高, 纤维素为主要碳源, 其水解过程则成为限速步骤^[22]. 按此推测, 预处理阶段, 过多曝气量除消耗大量糖分和蛋白质外, 还会对纤维素起到一定降解作用. 待反应器停止曝气转为厌氧阶段继续运行时, 垃圾中纤维素无法提供足量 C 源供应. 因此, 相比较曝气条件较小的反应器, 高浓度集中产甲烷阶段难以维持, 累积产甲烷量减少, 需适当调节曝气条件以平衡降解速率与甲烷产量.

3.2 渗滤液回灌条件

回灌渗滤液是调节生物反应器运行效果的另一个重要参数^[23]. 回流操作可提高垃圾层湿度, 携带有机物和微生物进入垃圾层中, 促进垃圾快速降解, 降低渗滤液自身污染强度^[24].

停止曝气初期 61 ~ 76 d, 填埋柱渗滤液 pH 值

不断降低,回灌操作使得系统酸化,导致反应器进入产甲烷平台期,日产甲烷量逐渐降低至 68 mL(图 5),甲烷浓度也停滞于 24% 左右无法继续上升. 此阶段,渗滤液 COD、VFA 浓度出现小幅提高,如图 2 所示,从 60 d 时的 20 778 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 8 574 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 相应增加至 75 d 时的 28 980 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 15 958 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 分析其原因,可能是由于渗滤液携带降解滞后垃圾水解发酵产生的高浓度 VFA 进入上层垃圾层中,初步建立的甲烷化环境尚且比较脆弱,VFA 无法完全利用不断累积对反应器产甲烷阶段产生严重抑制,又反过来减少对 VFA 的消耗能力,加剧抑制作用.

鉴于此原因,渗滤液于 77 ~ 115 d 时停止回灌,如图 5 中的第三阶段. 停止回灌后,填埋柱甲烷浓度迅速上升,12 d 内由抑制期的 24% 逐渐提高至 50% (图 3),日产甲烷量也增加到 4 倍以上(图 4),反应器产甲烷能力逐渐恢复. 此阶段,渗滤液 COD、VFA 浓度维持稳定在 30 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 15 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,pH 值开始缓慢上升(图 2).

研究者认为产甲烷菌的最适 pH 范围在 6.4 ~ 7.2 之间^[25]. 因此,为消除低 pH 值渗滤液对产甲烷菌的抑制作用,模拟填埋柱 C1 待 pH 值恢复到 7.0 后开始渗滤液的重新回灌,反应器进入第四阶段,渗滤液恢复回灌阶段. 此时期内,填埋柱渗滤液 pH 维持稳定在 7.0 以上,COD、VFA 浓度开始下降,填埋柱产气能力继续上升,至 144 d 达到最大日产甲烷量 896 mL,随后填埋柱产气能力开始逐渐下降,有机质表现出明显不足. 欧阳峰等^[26] 研究认为,在稳定产甲烷阶段,提高渗滤液回灌频率可增加微生物、垃圾与渗滤液之间的接触机会,加速固体有机物水解过程,促进垃圾甲烷化. 本实验中,渗滤液恢复回灌后,回灌频率提高至每天 3 次,但反应器日产甲烷量仅提升了 106 mL,增长幅度较小,其原因可能是填埋时间过久导致反应器自身老化,减小了渗滤液回灌的有利作用. 因此,可以考虑将恢复回灌的时间提前,以促进垃圾甲烷化^[22, 27, 28].

4 结论

(1) 单一厌氧环境条件下,高浓度 VFA 不断累积,厌氧生物反应器长期处于产甲烷抑制阶段;上层垃圾曝气预处理可有效缓解有机酸抑制现象,加速有机物水解酸化,促进产甲烷过程的快速启动和稳定甲烷化,是一种较优的填埋工艺.

(2) 相比厌氧生物反应器,上层曝气式生物反

应器运行比较复杂,操作效果受到多方面因素的影响和制约. 为获得较优运行效果,上层曝气式生物反应器需进行曝气条件、渗滤液回灌操作等影响因素的优化,以实现垃圾的快速降解、能源的高效回收以及经济成本的降低.

(3) 停止曝气初期,渗滤液回灌可能导致 pH 的再次下降对甲烷化过程产生一定抑制作用,反应器运行时可有选择地避免此过程的发生. 具体抑制机理和恢复回灌标准则可作为进一步研究的重点.

致谢: 本研究得到了 Ko Jaehac 老师的指导和帮助,特此表示感谢.

参考文献:

- [1] Carson D A. The municipal solid waste landfill operation as a bioreactor [A]. In: Seminar Publication: Landfill bioreactor design and operation [C]. Washington: US Environment Protection Agency, 1995. 1-8.
- [2] 邵立明,何晶晶,瞿贤. 回灌渗滤液 pH 和 VFA 浓度对填埋层初期甲烷化的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(9): 1451-1457.
- [3] Lim J W, Wang J Y. Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste[J]. Waste Management, 2013, 33(4): 813-819.
- [4] Zhang D Q, Tan S K, Gersberg R M. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(8): 1623-1633.
- [5] Brummeler E T, Koster I W. Enhancement of dry anaerobic batch digestion of the organic fraction of municipal solid waste by an aerobic pretreatment step[J]. Biological Wastes, 1990, 31(3): 199-210.
- [6] Pagilla K R, Kim H, Cheunbarn T. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste [J]. Water Research, 2000, 34(10): 2747-2753.
- [7] Charles W, Walker L, Cord-Ruwisch R. Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(8): 2329-2335.
- [8] Cheunbarn T, Pagilla K R. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of sludge [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126(9): 790-795.
- [9] Hasegawa S, Shiota N, Katsura K, et al. Solubilization of organic sludge by thermophilic aerobic bacteria as a pretreatment for anaerobic digestion [J]. Water Science and Technology, 2000, 41(3): 163-169.
- [10] Shao L M, He P J, Zhang H, et al. Methanogenesis acceleration of fresh landfilled waste by micro-aeration [J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(3): 371-374.
- [11] Jang H M, Cho H U, Park S K, et al. Influence of thermophilic aerobic digestion as a sludge pre-treatment and solids retention

- time of mesophilic anaerobic digestion on the methane production, sludge digestion and microbial communities in a sequential digestion process[J]. *Water Research*, 2014, **48**: 1-14.
- [12] 梁顺文, 乔玮, 吴学龙. 深圳市城市有机垃圾处置现状与资源化利用研究[J]. *环境卫生工程*, 2009, **17**(6): 39-40.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 102-280.
- [14] 马泽宇, 金潇, Ko J H, 等. 模拟生物反应器加速产甲烷过程研究[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(4): 1647-1652.
- [15] 马泽宇, 金潇, Ko J H, 等. 好氧生物反应器加速渗滤液及垃圾稳定进程研究[J]. *环境科学与技术*, 2013. **36**(10): 90-94.
- [16] 廖银章, 刘晓风. 城市有机垃圾发酵工艺研究[J]. *太阳能学报*, 1993, **14**(4): 337-343.
- [17] 陈晓梅. 城市生活垃圾卫生填埋场甲烷利用研究[D]. 广东: 暨南大学, 2011. 30-31.
- [18] Zhu M, Lü F, Hao L P, *et al.* Regulating the hydrolysis of organic wastes by micro-aeration and effluent recirculation[J]. *Waste Management*, 2009, **29**(7): 2042-2050.
- [19] Xu Q Y, Jin X, Ma Z Y, *et al.* Methane production in simulated hybrid bioreactor landfill[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **168**: 92-96.
- [20] 张记市, 吕培茹, 王钦庆. 短程好氧发酵强化餐厨废物厌氧消化性能[J]. *化学与生物工程*, 2013, **30**(7): 74-78.
- [21] Xu Q Y, Ma Z Y, Jin X, *et al.* Effects of bioreactor landfill operations on landfill leachate and biogas[A]. In: *Proceedings Sardinia 2013, Fourteenth International Waste Management and Landfill Symposium*[C]. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy: CISA Publisher, 2013.
- [22] 瞿贤, 何晶晶, 邵立明, 等. 生物反应器填埋条件下垃圾生物质组分的初期降解规律[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(9): 1219-1225.
- [23] 杨国栋, 蒋建国, 黄云峰, 等. 渗滤液回灌负荷对填埋场垃圾产气效能的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 2129-2134.
- [24] 王罗春, 刘疆鹰, 赵由才, 等. 垃圾填埋场渗滤液回灌综述[J]. *重庆环境科学*, 1999, **21**(2): 48-50.
- [25] 李东, 孙永明, 袁振宏, 等. 食物垃圾和废纸联合厌氧消化产甲烷[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 577-583.
- [26] 欧阳峰, 李启彬, 刘丹. 生物反应器填埋场渗滤液回灌影响特性研究[J]. *环境科学研究*, 2003, **16**(5): 52-54.
- [27] 张晓星, 何晶晶, 邵立明, 等. 不同渗滤液循环方式对填埋层甲烷产生的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(2): 304-308.
- [28] 邵立明, 何晶晶, 瞿贤. 回灌渗滤液 VFA 浓度对填埋层甲烷化代谢的影响[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(5): 65-69.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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