

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

生活垃圾填埋过程含水率变化研究

李睿, 刘建国*, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰

(清华大学环境学院, 固体废物管理与环境安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为分析垃圾在好氧和厌氧条件下降解过程中含水率变化的规律, 采用时域反射测量(time domain reflectometry, TDR)技术监测了垃圾填埋过程中含水率的变化情况。结果表明, 填埋过程中垃圾体积含水率随时间逐渐增大, 垃圾持水性能不断提高。好氧初期垃圾内水量变化与含水率变化正相关, 好氧后期则为负相关; 厌氧填埋过程中, 垃圾沉降压缩是含水率变化的主要原因。垃圾 TDR 读数与基于物质衡算的垃圾体积含水率计算值之间有良好的相关性, 好氧填埋过程两者最大偏差约为 $\pm 5\%$, 厌氧填埋过程两者最大偏差约为 $\pm 2\%$, TDR 技术适用于实际填埋工程的含水率测量。

关键词: 生活垃圾; 好氧填埋; 厌氧填埋; 体积含水率; 时域反射

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)02-0804-06

Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill

LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, ZHANG Yuan-yuan, YUE Dong-bei, NIE Yong-feng

(Key Laboratory for Solid Waste Management and Environment Safety, Ministry of Education, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Using time domain reflectometry (TDR) technology, waste moisture content variation in aerobic and anaerobic landfill of MSW was monitored, in order to study its disciplinarian. The results showed that volume moisture content of waste increased with landfill time and water holding capacity of waste improved continuously. The correlation of water quantity and moisture content was positive in early aerobic landfill, but it became negative later. In anaerobic landfill, moisture content variation was caused by settlement and compression of MSW. TDR readings and waste material-based volume moisture content had a good correlation. The maximum error between them is about $\pm 5\%$ in aerobic landfill and $\pm 2\%$ in anaerobic landfill. TDR technology is applicable to measure moisture content in practical landfill engineering.

Key words: municipal solid waste (MSW); aerobic landfill; anaerobic landfill; volume moisture content; time domain reflectometry (TDR)

生物反应器填埋技术与传统填埋相比, 具有削减渗滤液污染, 提高填埋气产率, 延长填埋场使用年限, 减少填埋场长期运行管理费用, 降低填埋场长期环境风险, 陈腐垃圾资源化, 填埋空间循环利用等优点^[1-6]。由于垃圾含水率调控是生物反应器填埋技术的核心之一, 因此对垃圾含水率精确、简便、快速地监测提出了新的需求。传统的土钻取样测重法已无法满足这些条件, 将常用于土壤水文探测的自动监测技术^[7, 8]应用到填埋领域成为人们所关注的热点。

时域反射(time domain reflectometry, TDR)技术是自动监测技术之一, 其原理为电磁波的传播速度与传播介质的介电常数相关。传感器通过发射电磁波, 测定其在介质中传播并反射回发射源所需时间, 进而获得传播速度并计算出介电常数, 根据介电常数与含水率的相关性反映介质含水率大小^[9, 10]。TDR 具有简便、快速、精度高、适于长期定位观测等优点, 但监测结果受温度、介质特性、液体电导率等因素影响^[11-14]。

由于垃圾介质具有时空上的复杂性和多变性, 目前, 将 TDR 技术用于监测填埋场垃圾含水率变化的实践仍缺少系统性与长期性^[15-18]。本研究以 TDR 技术为手段, 全面分析了垃圾在好氧条件和厌氧条件下生物反应器填埋过程中含水率变化规律, 以为生物反应器填埋场运行管理提供指导, 并对 TDR 用于监测垃圾含水率的准确性进行了初步探讨。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用垃圾取自北京市北神树卫生填埋场的新鲜生活垃圾。垃圾从现场采集回实验场, 人工分拣出大块石头、塑料和玻璃等物质后进行混匀, 分批称重后填入反应器并压实。装填垃圾的物理组成为:

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-09-11

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC06B05)

作者简介: 李睿(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体废物可持续填埋, E-mail: li-r02@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: jgliu@tsinghua.edu.cn

厨余 59.1%、纸张 8.8%、树叶 5.8%、塑料 4.2%、石块 3.3%、玻璃 1.4%、陶瓷 0.9%、木块 0.7%、织物 0.6%、金属 0.3%、其他 15.2%。垃圾初始质量含水率 58.5%,挥发分 35.9%,生物可降解物 28.9%,纤维素 10.4%,木质素 6.9%。

1.2 实验装置

模拟垃圾填埋场的反应器主体结构由聚氯乙烯(PVC)圆柱体和圆锥体构成,柱壁厚 15 mm,内径 800 mm,总高 2.1 m(圆柱体 1.8 m,圆锥体 0.3 m),其中可填垃圾厚度约 1.5 m。柱壁分 3 层均匀布设 9 个垃圾取样口,底层配备渗滤液导排收集系统。实验设好氧柱和厌氧柱各 1 个。好氧柱模拟好氧生物反应器填埋场,布设渗滤液回灌和强制通风系统,柱顶加盖并留 1 圆孔,渗滤液排放管为开启状态;厌氧柱模拟厌氧生物反应器填埋场,仅布设渗滤液回灌系统,柱顶加盖并密封,渗滤液排放管为关闭状态,仅在渗滤液取样时开启。

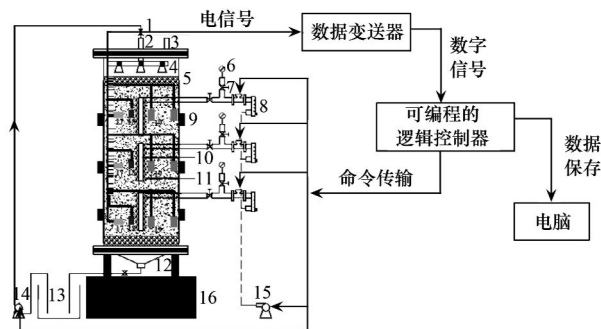
为均布水气,渗滤液回灌系统末端采用水平盘管滴灌,通风采用置于石笼中的垂直花管(管径 25 mm)分 3 层独立布气,每层布气管长度为 500 mm。渗滤液回灌所用计量泵流量为 $18.9 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,通风所用空气压缩泵额定流量为 $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

实验启动时,好氧柱垃圾装填高度为 152.0 cm,装填密度为 0.811 m^3 ;厌氧柱垃圾装填高度为 151.6 cm,装填密度为 0.853 m^3 。

1.3 运行方式

2 个模拟柱从 2008 年 12 月 1 日起开始运行。其中好氧柱运行至 2009 年 6 月 15 日,共 197 d;厌氧柱运行至 2010 年 4 月 12 日,共 497 d。实验期间室内温度维持在 $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 。反应器运行过程中,采用自主研发的“垃圾多参数反馈自动调控系统”对垃圾的含水率、氧浓度、温度指标进行在线监测与控制。在垃圾底层、中层和顶层分别埋设一组 TDR 含水率传感器(AQUA-TEL-TDR,北京渠道科学器材有限公司),氧传感器(I-01,深圳市蓝月进出口贸易有限公司)和温度传感器(STT-R,北京赛亿凌科技有限公司),在线监测堆体内含水率、氧浓度和温度。各层传感器初始位置分别距反应器圆柱体底面 0.25、0.75 和 1.25 m,并随着垃圾的沉降而改变位置。监测所得电信号经数据变送器转换为数字信号后即时输送至 PLC 自控柜。经 PLC 逻辑判断,若指标监测值低于或高于设定值,系统将自动开启或关闭水泵或风机,使垃圾含水率、氧浓度和温度指标始终保持在适于快速降解的范围内。根据文献调研

和前期研究结果^[19~25],设定温度控制阈值为 70°C ,氧浓度控制范围为 11%~14%。含水率控制阈值一开始设为初始垃圾的田间持水率,并视垃圾降解过程含水率变化情况进行调整。若含水率一直高于预设值,则此预设值保持不变;若含水率低于预设值后即使连续注水也无法使之达到或超过预设值,则须降低此预设值。自控系统监测所得数据,水泵及风机开启、关闭信息均记录并保存在电脑上。反应器结构及自控系统工作原理如图 1 所示。



1. 阀门; 2. 渗滤液管; 3. 气体采样口; 4. 渗滤液滴灌管; 5. 砾石层; 6. 压强表; 7. 电控阀; 8. 气体流量计; 9. 取样口; 10. 导气管; 11. 砾石层; 12. 渗滤液收集池; 13. 渗滤液储存池; 14. 潜污泵; 15. 气泵; 16. 底座; 17. TDR; 18. 温度传感器; 19. 氧浓度传感器

图 1 好氧柱结构及自控系统原理

Fig. 1 Aerobic landfill column structure and automatic control system principle

2 结果与讨论

2.1 水分调节与水量平衡

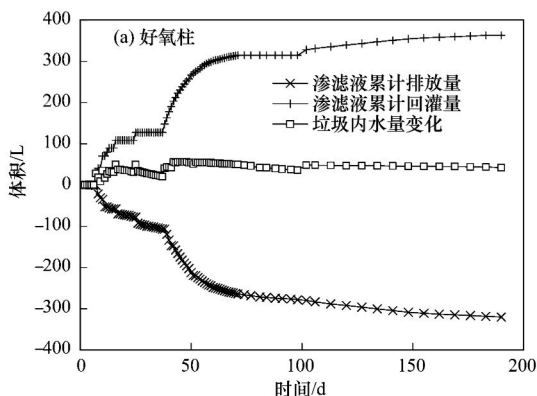
好氧柱实验期间含水率调控(注水)操作可分为 4 个阶段,如表 1 所示。根据温度传感器监测结果,好氧柱从第 6 d 开始温度急剧升高进入高温期,为避免因蒸发作用造成反应器内局部垃圾(主要为顶层垃圾)缺水,在第 7、8 d 分别注入 28.5 L 和 11.5 L 自来水。注入的水绝大部分在 1 d 之内从反应器底部流出形成渗滤液,小部分被滞留在反应器中。第 9 d 时,好氧柱 3 个 TDR 读数基本稳定在 86.3% (底层)、84.5% (中层)和 80.9% (顶层),可以认为此时垃圾达到了田间持水率,由于顶层垃圾含水率最低,故以其作为控制目标,设定含水率控制阈值为 80% (TDR 读数)。第 9~25 d,在多参数反馈系统的监测与调控下,分别于第 10、12、13、16 和 25 d 对好氧柱进行了自控回灌,累计注水量为 87.3 L。此后,顶层 TDR 读数从 80% 左右逐渐增大,渗滤液不再进行自动回灌。实验进行到第 38 d 时,好氧柱剩余渗滤液总产量为 35.8 L,此时出于削减渗滤

液产量和处理渗滤液污染角度考虑,对渗滤液进行了频繁的回灌(每天1次).之后到第71 d时,由于剩余渗滤液日产量过少而停止回灌,直到第102 d时剩余渗滤液又累积了15.7 L后才恢复回灌.此时由于垃圾中有机物已大量降解,渗滤液产量降低,因此将回灌周期延长为每周1次.

表1 好氧柱垃圾含水率调控工况

Table 1 MSW moisture control in the aerobic landfill column		
时间	注水来源	操作方式
第7~8 d	添加自来水	手控
第9~25 d	渗滤液回灌	自控,目标顶层 TDR 读数 80%
第38~71 d	渗滤液回灌	手控,每天回灌 1 h
第102~183 d	渗滤液回灌	手控,每周回灌 1 h

厌氧柱3个TDR读数在实验启动阶段基本稳定在81.1%(底层)、90.12%(中层)和95.9%



(顶层).参考好氧柱监测结果,也将顶层垃圾作为控制目标,设定含水率控制阈值为80%(TDR读数).实验期间,厌氧柱顶层垃圾读数均大于80%,因此自控系统没有对渗滤液进行自控回灌.到第101 d时,厌氧柱剩余渗滤液产量为13.4 L,开始进行1周1次,1次1 h的渗滤液回灌并持续到实验结束.

反应器内垃圾水量平衡图如图2所示.由于厌氧柱顶部密封,因此没有因蒸发损失的水分;而好氧柱顶部气体出口极小,蒸发的水分绝大部分以冷凝水的形式从柱顶内壁回流入垃圾中,损失的水分也可忽略.此外,垃圾有机物因生物降解反应而产生的水量也很小,仍可忽略不计.因此,渗滤液累计排放量和累计回灌量之差值,可近似认为是在垃圾内储存或排出的净水量.

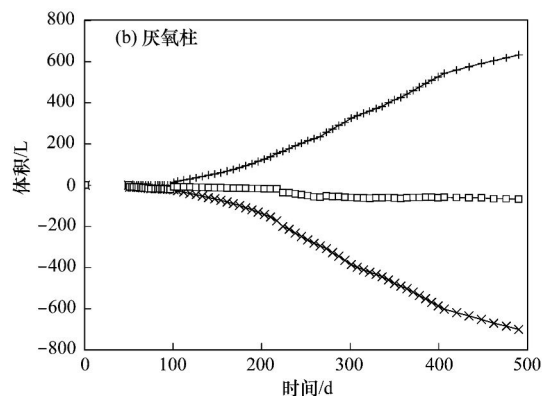


图2 好氧柱、厌氧柱垃圾水量平衡

Fig. 2 MSW moisture balance in aerobic & anaerobic landfill columns

可以看出,由于在实验初期有40 L外来水源的补充,因此在整个实验期间,好氧柱在渗滤液回灌和渗滤液排放的综合影响下,垃圾内所含水量与初始情况相比一直有所增加,到实验结束时,累积增加水量38.1 L.在自控回灌和高频率手控回灌(每天1次)期间,垃圾水量变化幅度较大;而到了实验后期,水量变化比较平缓.不同于好氧柱在实验初期注入自来水,厌氧柱注水来源完全是自身产渗滤液.整个实验期间,垃圾均处于失水状态,到实验结束时,垃圾累积失水量68.3 L.与好氧柱相反,厌氧柱垃圾水量变化幅度在初期较小,而从101 d起开始渗滤液回灌后,水量变化幅度有较大提高.

2.2 TDR 读数变化规律

反应器内垃圾TDR读数变化过程如图3所示.TDR读数变化是垃圾体积含水率变化的直接反映,可以看出,无论是好氧柱或是厌氧柱,顶层的垃圾含

水率均较小,且各层垃圾含水率差异随时间逐渐减小.影响垃圾含水率变化的因素主要有渗滤液排放及回灌造成的垃圾内水量变化,垃圾沉降、压缩造成的垃圾体积变化,以及垃圾在稳定化过程中因理化性质变化引起的持水性能变化等.垃圾内水量变化与含水率变化正相关,垃圾的沉降压缩过程使含水率持续增加,而持水性能则决定了含水率的阈值.比较好氧柱垃圾TDR读数与水量平衡曲线发现,在实验初期的自控阶段(0~25 d),两者曲线形状十分吻合,说明在这一时期内,垃圾内水量变化是造成垃圾含水率变化的主要原因;接下来的时期内,垃圾内水量大致上处于不断减少状态,而TDR读数仍不断升高,说明这一时期影响垃圾含水率变化的主要因素是垃圾的沉降压缩.大约在第50 d后,TDR读数逐步趋于稳定,除顶部的垃圾含水率变化仍在一定程度上受回灌操

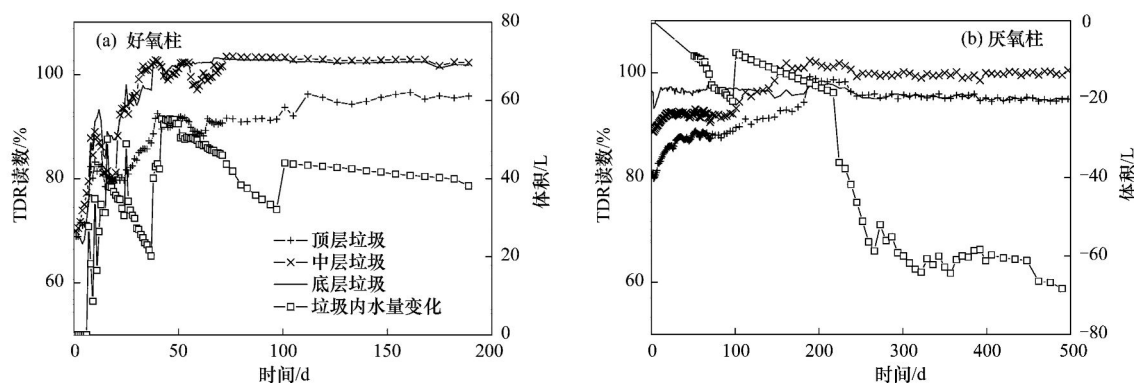


图3 好氧柱、厌氧柱垃圾 TDR 读数变化过程

Fig. 3 MSW TDR reading variation in aerobic & anaerobic landfill columns

作引发水量波动的影响,底部和中部的 TDR 读数基本不变,说明垃圾整体含水率已趋于饱和. 与好氧柱相比,厌氧柱垃圾 TDR 读数变化较为单调. 顶层和中部垃圾含水率缓慢升高至一定程度后保持稳定,而底部垃圾含水率基本保持不变,这是由于厌氧柱渗滤液排放管关闭,大量渗滤液积聚在垃圾底部而使其处于饱和状态的原因. 比较厌氧柱垃圾 TDR 读数与水量平衡曲线发现,整个实验过程中垃圾均处于不断失水状态,而 TDR 读数仍不断升高,说明影响垃圾含水率变化的主要因素是垃圾的沉降压缩. 大约在第 200 d 后,各层垃圾 TDR 读数均逐步趋于稳定,说明垃圾整体含水率已趋于饱和. 在好氧和厌氧条件下,垃圾体积含水率随填埋过程不断增加,表明了垃圾持水性能的提高.

由于好氧柱垃圾 TDR 读数变化较为复杂,为进一步对比自控回灌(实验前期)与手控回灌(实验后期)对 TDR 读数的不同影响,分别选取第 25 d 和第 102 d 时回灌过程中 TDR 读数变化情况进行研究,如图 4 所示. 由于回灌时间短,因此回灌期间内

注入的水量可近似认为等同于垃圾内变化的水量. 第 25 d 自控回灌启动时,顶层 TDR 读数为 79.6%,回灌结束时读数为 80.0%,回灌持续时间 48 min. 可以看出,在回灌过程中,顶层 TDR 读数几乎没有上升,说明顶层垃圾透水性能好,水分在顶层没有滞留. 而中层和底层 TDR 读数则在回灌开始一段时间后先后开始上升,说明中层和底层垃圾渗透性较差,水分有滞留现象;而水分渗透由上至下的原因导致中层垃圾 TDR 读数上升较底层垃圾早. 第 102 d 的手控回灌持续 44 min,各层 TDR 的读数变化情况与 25 d 时正好相反:顶层垃圾 TDR 读数由 91.5% 升至 93.9%,而中层和底层读数基本不变,这是顶层垃圾透水性有所降低,而中层和底层垃圾含水基本处于饱和状态的原因.

2.3 垃圾 TDR 读数与体积含水率相关性分析

如前所述,TDR 读数除反映目标体积含水率变化之外,还受温度、液体电导率、特定介质等多种因素影响. 而垃圾在降解过程中,固液两相性质均发生了较大变化,因此有必要对 TDR 读数指示垃圾体积含水率的准确性进行进一步探讨. 根据垃圾初始

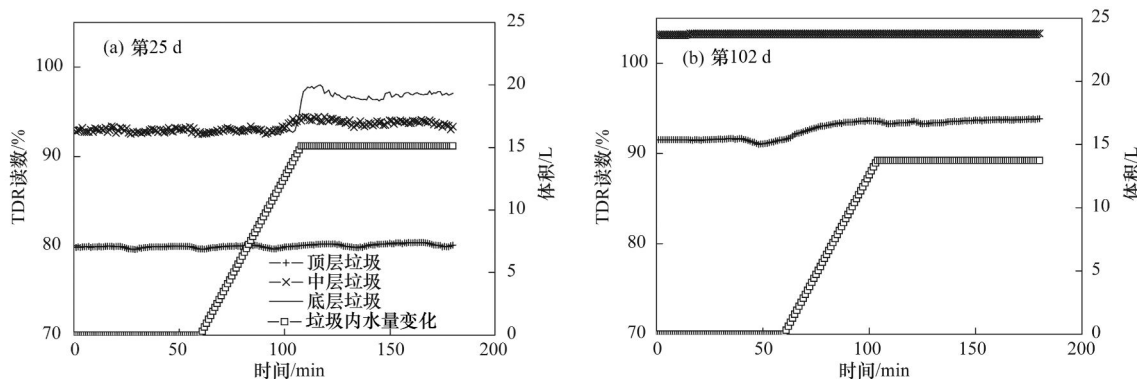


图4 好氧柱第 25 d、第 102 d 渗滤液回灌过程中垃圾 TDR 读数变化

Fig. 4 MSW TDR reading variation of leachate recirculation process in the aerobic landfill column at 25th d, 102nd d

含水率及堆积密度,以及降解过程中的水量平衡曲线和沉降曲线,可计算出基于物质衡算的垃圾体积含水率变化值.将其与 TDR 读数(3 层平均值)进行相关性分析,如图 5 所示.可以看出,两者具有较好的线性相关性,这在一定程度上说明了垃圾在降解过程中,尽管固液两相的性质都发生了较大变化(温度波动、垃圾沉降,有机物降解,渗滤液电导率变化),但 TDR 读数的变化仍较好地指示了体积含水率的变化.

当垃圾体积含水率逐渐增大至饱和时,TDR 读

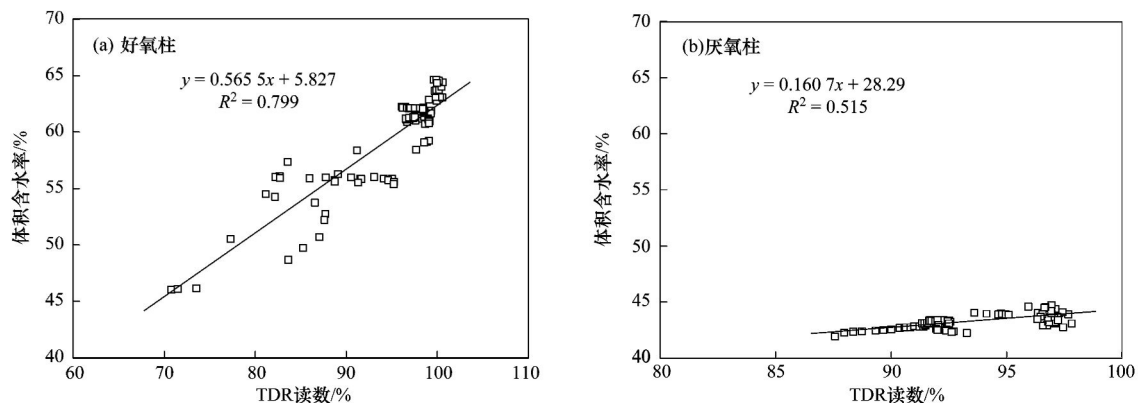


图 5 好氧柱、厌氧柱垃圾 TDR 读数-体积含水率相关性

Fig. 5 MSW TDR reading and volume moisture content correlation in aerobic & anaerobic landfill columns

3 结论

(1)在有外来水源补充的情况下,垃圾好氧填埋过程所含水量始终大于初始状态,降解前期垃圾水量变化幅度较大,降解后期水量变化比较平缓.在没有外来水源补充的情况下,垃圾厌氧填埋过程均处于失水状态,降解前期垃圾水量变化幅度较小,降解后期水量变化幅度有较大提高.

(2)垃圾 TDR 读数变化规律表明,顶层垃圾含水率较小,且各层垃圾含水率差异随时间逐渐减小,并逐渐趋于稳定值.填埋过程中垃圾体积含水率随时间逐渐增大,垃圾持水性能不断提高.垃圾好氧填埋初期,水量变化是造成垃圾含水率变化的主要原因,之后影响垃圾含水率变化的主要因素是垃圾的沉降压缩.垃圾厌氧填埋过程中,影响垃圾含水率变化的主要因素始终是垃圾的沉降压缩.

(3)垃圾 TDR 读数与基于物质衡算的垃圾体积含水率计算值之间有良好的相关性,当垃圾含水率趋于饱和甚至过量时,两者具有较大偏差.实验中好氧填埋过程两者最大偏差约为 $\pm 5\%$,厌氧填埋过程两者最大偏差约为 $\pm 2\%$,具有工程上的可行性.

数与体积含水率计算值的偏差有所增大,这是由于此时 TDR 读数显示为稳定值,无法反映“过量”水分变化的原因.而当渗滤液回灌造成垃圾内水量大幅波动时,TDR 读数与体积含水率计算值也会出现较大偏差,也是由于同样的原因.好氧柱由于渗滤液回灌频率较高,且垃圾性质变化较大,因此 TDR 读数与体积含水率计算值的偏差较厌氧柱大,最大约为 $\pm 5\%$,而厌氧柱两者最大偏差约为 $\pm 2\%$.相对于工程实践,这种尺度的偏差是可以接受的,因此通过 TDR 读数作为含水率的指示具有工程上的可行性.

参考文献:

- [1] Reinhart D R, McCreanor P T, Townsend T. The bioreactor landfill: its status and future [J]. Waste Management & Research, 2002, 20(2): 172-186.
- [2] Warith M. Bioreactor landfills: experimental and field results [J]. Waste Management, 2002, 22(1): 7-17.
- [3] Mertoglu B, Calli B, Guler N, et al. Effects of insufficient air injection on methanogenic *Archaea* in landfill bioreactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142(1-2): 258-265.
- [4] Rich C, Gronow J, Voulvoulis N. The potential for aeration of MSW landfills to accelerate completion [J]. Waste Management, 2008, 28(6): 1039-1048.
- [5] Erses A S, Onay T T, Yenigun O. Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(13): 5418-5426.
- [6] Berge N D, Reinhart D R, Batarseh E S. An assessment of bioreactor landfill costs and benefits [J]. Waste Management, 2009, 29(5): 1558-1567.
- [7] 龚元石, 李春友, 李子忠. 农田土壤水分测定三种方法的比较 [J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(3): 53-58.
- [8] 王贵彦, 史秀捧, 张建恒, 等. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究 [J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 23-26.
- [9] 龚元石, 李子忠, 廖超子, 等. 应用时域反射仪测定农田土壤水分 [J]. 水科学进展, 1997, 8(4): 329-334.

- [10] 柴世伟, 刘文兆, 张聚庭. TDR 研制与应用方面的若干进展[J]. 中国生态农业学报, 2001, **9**(2): 97-99.
- [11] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003, **40**(1): 59-64.
- [12] 都洋, 陈晓飞, 张玉龙, 等. 用 NMR 法验证在冻土中 TDR 标定曲线的可靠性[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(6): 788-794.
- [13] 席琳乔, 余建勇, 张利莉. TDR 技术测定盐碱地土壤盐分和水分及标定研究[J]. 塔里木大学学报, 2007, **19**(3): 6-10.
- [14] 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 等. 土壤水分时域反射仪 (TDR) 自制探头的校正与应用[J]. 山西农业科学, 2007, **35**(2): 52-54.
- [15] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): a field evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, **49**(1): 19-24.
- [16] Yuen S T S, McMahon T A, Styles J R. Monitoring in situ moisture content of municipal solid waste landfills[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, **126**(12): 1088-1095.
- [17] Li R S, Zeiss C. *In situ* moisture content measurement in MSW landfills with TDR [J]. Environmental Engineering Science, 2001, **18**(1): 53-66.
- [18] Suits I D, Sheahan T C, Jonnalagadda S, *et al.* Comparison of resistivity and time domain reflectometry sensors for assessing moisture content in bioreactor landfills[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(3): 183-191.
- [19] Borglin S E, Hazen T C, Oldenburg C M, *et al.* Comparison of aerobic and anaerobic biotreatment of municipal solid waste[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, **54**(7): 815-822.
- [20] Ritzkowski M, Heyer K U, Stegmann R. Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills [J]. Waste Management, 2006, **26**(4): 356-372.
- [21] Ritzkowski M, Stegmann R. Controlling greenhouse gas emissions through landfill in situ aeration [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, **1**(3): 281-288.
- [22] Bilgili M S, Demir A, Ince M, *et al.* Metal concentration of simulated aerobic and anaerobic pilot scale landfill reactors[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **145**(1-2): 186-194.
- [23] Shao L M, He P J, Li G J. *In situ* nitrogen removal from leachate by bioreactor landfill with limited aeration [J]. Waste Management, 2008, **28**(6): 1000-1007.
- [24] Swati M, Joseph K. Settlement analysis of fresh and partially stabilized municipal solid waste in simulated controlled dumps and bioreactor landfills[J]. Waste Management, 2008, **28**(8): 1355-1363.
- [25] Ritzkowski M, Stegmann R. Landfill aeration worldwide: concepts, indications and findings [J]. Waste Management, 2012, **32**(7): 1411-1419.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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