

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

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

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靛, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响

张喻¹, 韩融¹, 陆文静¹, 王洪涛^{1*}, 明中远¹, 王强², 夏伟²

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 江苏田娘农业科技有限公司, 常熟 215532)

摘要: 将污泥与树皮按照一定比例混合, 利用自主研制的滚筒式污泥生物干化中试系统进行实验, 通过对温度、含水率、O₂和CO₂浓度、挥发性固体(VS)、pH等参数的检测, 研究了通风强度对市政污泥生物干化效果的影响。结果表明, 通风强度对污泥生物干化有较大影响, 通风强度(以VS计)为120 L·(h·kg)⁻¹时, 最高温度达到66℃, 55℃以上高温可以维持40 h以上, 111 h后污泥最终含水率可以降低至56%; 生物干化过程中pH始终保持在6.5~8.5之间, 不会影响微生物生命活动; 滚筒式污泥生物干化反应器能够使反应器内基质均一性良好, 对利用滚筒式反应器实现污泥连续流处理提供参考。

关键词: 通风强度; 污泥; 滚筒; 生物干化; 中试

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1727-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.05.030

Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test

ZHANG Yu¹, HAN Rong¹, LU Wen-jing¹, WANG Hong-tao^{1*}, MING Zhong-yuan¹, WANG Qiang², XIA Wei²

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Jiangsu Tianniang Agricultural Technology Co., Ltd., Changshu 215532, China)

Abstract: A drum-type biodrying pilot scale test system was made to treat the municipal sludge. Sludge was mixed with barks according to certain proportion, and was used to study the influence of air flux on municipal sludge biodrying through parameter detection, such as temperature, moisture content, pH and volatile solid (VS). Results showed that air flux had a great influence on the effect of biodrying. When the air flux was 120 L·(h·kg)⁻¹, the best result was obtained, the highest sludge temperature was 66℃ and the temperature could remain upon 55℃ for more than 40 h. After 111 h, the moisture content reduced to 56%. The pH remained at 6.5-8.5 through the whole biodrying process. As a result, the microorganism activities would not be affected. The sludge inside the drum-type biodrying system was homogeneous. This research provides a reference about sludge treatment using a continues flow process by drum-type biodrying system.

Key words: air flux; sludge; drum-type biodrying system; biodrying; pilot scale test

市政污泥是污水处理的副产物。随着我国经济的高速发展, 污水排放量和处理率逐年提高, 污泥产量急剧增加。据统计^[1], 2012年我国污水排放总量684亿t, 综合处理率按60%计, 污泥(含水率96%)产量达到20 431万m³·a⁻¹^[2]。

污泥成分复杂, 有机质含量高, 含有重金属、病原微生物, 并带有强烈臭味, 易造成二次污染。高效的污泥处理处置措施, 降低其含水率是关键, 而目前, 国内多数污水厂经过浓缩机械脱水后的污泥含水率为80%左右, 不可能达到60%^[3], 这对后续处理处置技术来说含水率过高^[4], 干化成为污泥处理的瓶颈问题。传统干化技术, 如间接热干化和直接热干化, 存在耗能高、热效率低、二次污染严重的问题^[5]。

生物干化即利用微生物降解污泥中有机质产生的能量使堆体升温, 实现水分快速蒸发, 使其臭气减少, 处理后污泥疏松、分散, 成粒状, 物理性状明显改善^[6], 同时热值升高^[7], 便于运输, 有利于焚烧、填埋等各种后续技术, 是一种经济节能的污泥干化

技术。

目前国内外学者在污泥生物干化领域已经开展了一些研究, 内容包括辅料种类^[8,9]及其与污泥的混合比例^[10,11], 以及温度^[12,13]、含水率^[14,15]、通风强度、通风方式^[16-18]等因素对生物干化的影响。

目前关于生物干化研究主要集中在实验室规模, 利用滚筒式装置进行污泥生物干化的中试规模研究鲜有报道。通风强度是影响污泥生物干化过程的重要参数, 通风强度过小, 则污泥中微生物得不到充足氧气影响好氧降解过程, 温度难以维持高温, 水分蒸发量减少, 水分排出困难, 最终影响含水率去除效果; 通风强度过大, 反应器中热量随通风流失严重, 温度降低, 污泥水分蒸发困难, 同样影响含水率去除效果。本实验利用自主研制的滚筒式反应器, 在中试规模条件下, 研究通风强度对污泥生物干化

收稿日期: 2014-09-29; 修订日期: 2014-12-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(201209022)

作者简介: 张喻(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处置及资源化, E-mail: y-z06@mails.tsinghua.edu.cn

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

的影响,同时结合实验效果,对利用滚筒式反应器实现污泥连续流处理的可行性提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

污泥样品为北京清河污水处理厂脱水污泥,并保证当天取泥当天实验,由于污泥没有经过消化,有机质含量较高,更利于生物干化. 所用辅料为樟松和落叶松树皮,由上海丘山环保科技有限公司提供. 本实验树皮为已经接种驯化过的回流树皮. 实验材料基本性质见表 1.

表 1 实验材料基本性质

Table 1 Basic property of experimental materials

原料	含水率/%	VS/%	pH
污泥	81.61 ~ 82.69	68.22 ~ 71.53	7.0 ~ 7.4
回流树皮	12.89 ~ 13.41	83.48 ~ 84.90	—

1.2 实验装置

实验装置采用滚筒式生物干化系统,由清华大学环境学院自主研发,其正面及剖面见图 1.

滚筒有效直径设计为 2 m,配置合适长度,便可保证小型污水厂污泥日处理要求. 本实验取反应器断面进行研究,长度设计为 1 m,滚筒外壁及气孔盖均以聚氨酯材料保温. 采用调频电机带动滚筒转动,实现转速调节. 滚筒内沿圆周均匀布设 6 根温度探头,气体出口处设置 O₂、CO₂ 检验装置,减少随意取点造成的误差. 滚筒内均匀布设 6 块布气板,每块布气板表面布满直径 3 mm,间距 5 cm 的布气孔. 滚筒转动过程中,时刻保持最下面两块布气板向反应器内充空气,最上面一块布气板与大气联通,其余布气板关闭. 每块布气板与一排水管相连,当布气板与大气相通时,排水管打开,排出布气板与反应器内壁间隙的冷凝水.

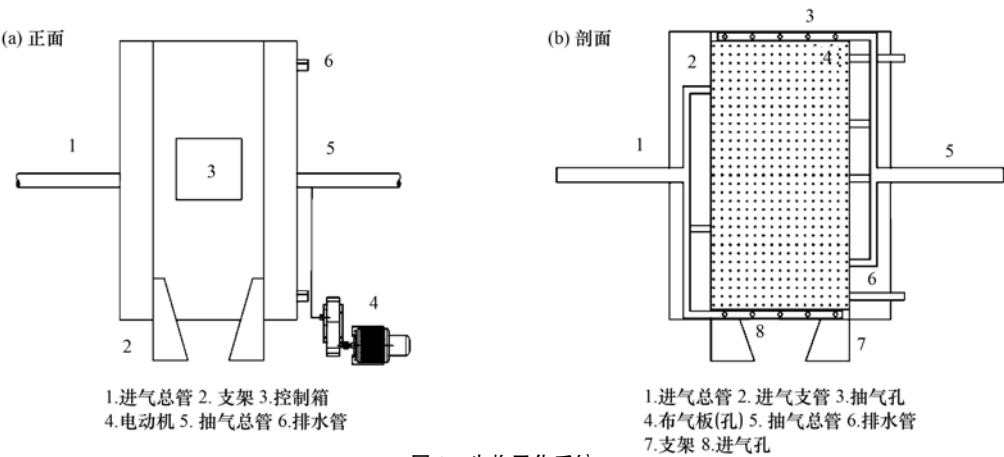


图 1 生物干化系统
Fig. 1 Biodrying system

1.3 实验方法

进行批式实验,将污泥与树皮按照质量比(湿基比)5:3进行混合,每批进料量在1 130 kg 左右,同时保证反应器容积率达到 75%. 小试试验结果表明,转速对干化效果影响较小,同时确定了合理的通风强度区间. 基于此,调节滚筒转动周期为 18 h·r⁻¹,调节空压机,使得不同批次进气强度(以 VS 计,下同)依次为 60、120、180 L·(h·kg)⁻¹. 每日早晚各取一次样,每个样做 2 个平行样. 反应器温度降至 50℃ 以下时,单批实验结束,出料放置在通风处晾晒,直至含水率下降至 15% 以下,经过筛分,得到回流树皮作为辅料进行下一批实验,筛分得到的干化污泥含水率低,方便用于后续处理.

1.4 测试项目

温度、O₂、CO₂ 浓度监测: 滚筒内均布深入基

质 15 cm 的 6 个温度传感器,出气口内侧装有 O₂、CO₂ 传感器,实现监测. 样品检测项目包括: 含水率、VS、pH.

含水率: 采用公式(1)计算.

$$\text{含水率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \tag{1}$$

式中, m_1 为样品新鲜质量,kg; m_2 为样品 105℃ 条件下烘干至恒重时的质量,kg.

VS: 采用公式(2)计算.

$$\text{VS} = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \tag{2}$$

式中, m_2 为样品 105℃ 条件下烘干至恒重时的质量,kg; m_3 为样品烘干后,550℃ 灼烧 2 h 后的质量.

pH 值: 污泥样品与去离子水按质量比 1: 10 混合,用玻璃棒剧烈搅动 1 ~ 2 min,静置 30 min,而后

用 pH 计测定。

2 结果与讨论

2.1 通风强度对污泥生物干化温度影响

不同通风强度条件下,温度随时间变化情况如图 2 所示。可以看出,反应过程大致分为升温期(0~40 h)、高温期(40~80 h)和降温期(80~111 h),随着通风强度的不同,3 个时期的长短不尽相同。不同通风强度对基质温度有较大影响。通风后,微生物开始进行好氧呼吸,放出大量热量,随着反应进行可供利用的有机物逐渐减少,微生物产生热量随之减少,故温度均呈现先升高后降低的趋势。当通风强度为 $60 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,基质升温速率介于 $120 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 和 $180 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 之间。这是由于过大的通风强度导致热量随着气体快速流失,升温速率最慢;通风强度过低,污泥升温所需氧气量得不到满足,升温速率较慢。通风强度为 $60 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时最高温度可以达到 66°C ,且在 60°C 以上可维持 40 h 以上,但降温速率较慢,111 h 后温度仍达到 51°C ,这会导致干化周期变长,VS 消耗大,干化污泥热值降低。通风强度为 $180 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,升温速率最慢,最高温度只能达到 56°C ,之后迅速降温,并没有起到高温强蒸发效果。通风强度为 $120 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,升温速率最快,因为此时通风强度适中,微生物不会因氧气过少而生命活动减缓,也不会因为通风强度过大而带出过多热量;最高温度达到 66°C ,可以达到高温调质及水分强蒸发的效果;之后温度迅速下降,111 h 后降至 36°C 。

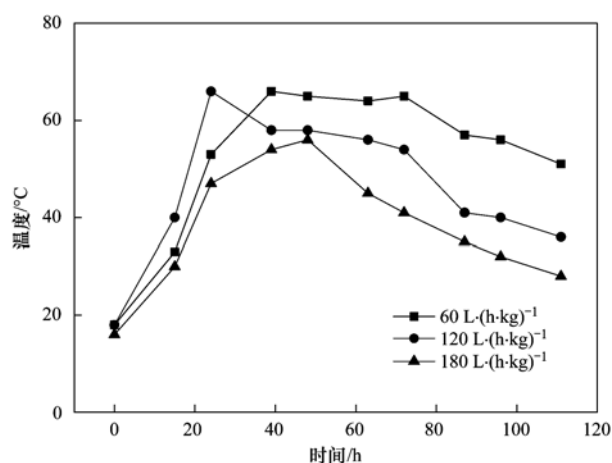


图 2 不同通风强度条件下温度随时间变化

Fig. 2 Changes of temperature with time under different air fluxes

2.2 通风强度对污泥含水率的影响

通风强度对污泥含水率影响见图 3。高温使得

污泥中的束缚水活化^[19],同时极大地促进水分蒸发,而进气造成污泥表面空气流动速率加快,气体将自身所含水分带出,故反应过程中污泥含水率逐渐降低。通风强度为 $60 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,含水率在反应初期下降幅度相对较小,24 h 仅下降 5.66%,进入高温期后,虽然基质可以在高温下持续较长时间,但较小的通风强度限制了水分带出速率,导致基质周围空气含水率较高,基质水分蒸发强度下降,由于没有及时排出水分,部分水分也会冷凝,回流入基质,最终污泥含水率下降了 23.84%,达到 59.07%。通风强度为 $180 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,虽然升温速率较慢,温度较低造成水分蒸发速率下降,但强劲的通风对流作用依然使污泥快速达到较好的脱水效果,污泥含水率下降 26.26%,含水率降至 56.79%,然而高通风强度对设备要求更高,污泥处理成本提升。通风强度为 $120 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,通入空气即保证了微生物活动放热所需,也可及时带出水分,基质含水率最低降到 55.66%,污泥含水率降低 26.41%,污泥含水率下降至最低同时能耗相对较低。

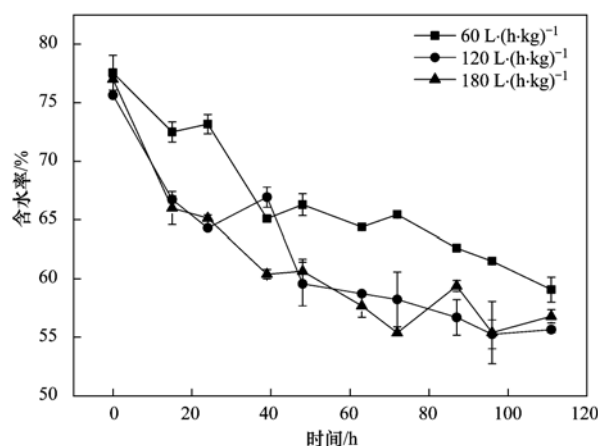


图 3 不同通风强度条件下含水率随时间变化

Fig. 3 Changes of water content with time under different air fluxes

2.3 通风强度对污泥降解情况的影响

污泥降解情况用出气口 O_2 和 CO_2 浓度表征,他们在不同通风强度条件下随时间变化趋势见图 4 和 5。

污泥中微生物降解有机物同时消耗 O_2 ,放出 CO_2 。实验初期随着微生物对环境的适应,且温度适中,降解速率逐渐增加;随着实验进行,温度升高及有机质的消耗,微生物的活动受到抑制,降解速率逐渐下降。故总的来看出气口 O_2 浓度先降后升, CO_2 浓度先升后降。通气强度为 $60 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,出口 O_2 浓度在 15 h 时达到最低,但仍有 9.35%,说明较

低通气强度对微生物活动抑制作用较弱,微生物依然可以在较为充足的氧气环境中进行好氧呼吸; CO_2 浓度在 24 h 时达到最大的 8.83%,说明反应器中产生的 CO_2 没有被及时排出,继而可推断出空气中水分没有被及时排出,这也正是反应器内温度较高但含水率下降速率有限的原因. 通风强度为 $180 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,过大的通风使得 O_2 利用效率下降,同时稀释了 CO_2 ,24 h O_2 浓度最低时依然达到 15.19%, CO_2 浓度最高时仅为 3.18%. 通风强度为 $120 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,出气口 O_2 和 CO_2 浓度介于另外两种通风强度之间,分别达到 12.97%、5.07%,此时反应器内 O_2 浓度充足,通风量适中,保证了有充足的通风带出水分而不使温度下降过快.

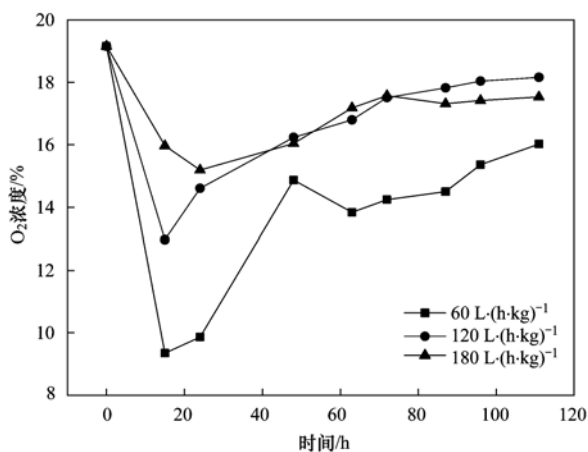


图 4 不同通风强度条件下氧气浓度随时间变化

Fig. 4 Changes of oxygen percent with time under different air fluxes

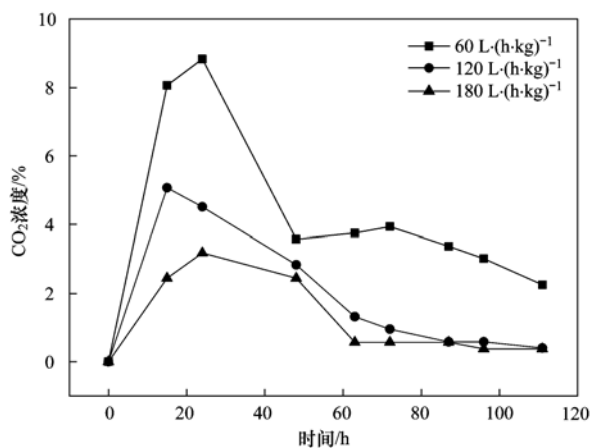


图 5 不同通风强度条件下二氧化碳浓度随时间变化

Fig. 5 Changes of carbon Dioxide percent with time under different air fluxes

2.4 通风强度对污泥 pH 的影响

污泥的 pH 对污泥中微生物生命活动有重要影响,它可引起细胞膜及细胞内的蛋白质、核酸等物

质所带电荷发生变化,改变环境中营养物质的可给性及有害物质的毒性^[20]. 微生物适宜生长的 pH 值范围大约为 6.5 ~ 8.5. 生物干化过程中会产生大量的氨气,随着温度的升高挥发出来并溶解于污泥中,这是导致污泥 pH 值升高的主要原因.

通风强度对污泥 pH 影响见图 6. 不同通风强度条件下,污泥 pH 随时间变化不大,维持在 6.5 ~ 8.5 之间,不会影响微生物活性,整个生物干化过程中无需对 pH 进行调节. 当通风强度为 $60 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,污泥温度维持高温时间长,大量可溶性蛋白转化成氨气挥发,同时碳水化合物转化成 CO_2 进行碱中和,系统的 pH 处于动态平衡,固相中的 pH 升高幅度较小,最高 pH 为 7.6. 随着通风强度的增大,系统维持高温时间变短,生物转化速率降低,挥发性的 NH_3 则随过量气体(空气)持续逸散,使得污泥固相的 pH 值升高幅度变大.

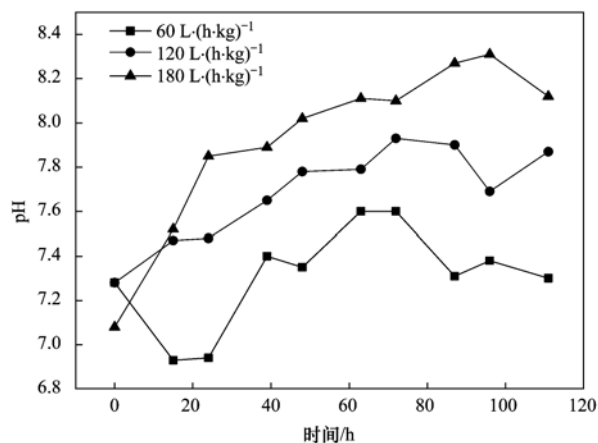


图 6 不同通风强度条件下 pH 随时间变化

Fig. 6 Changes of pH with time under different air fluxes

2.5 通风强度对污泥 VS 的影响

所有的有机质都是 VS,通过测定污泥中的 VS 可大致得知其中有机质含量的变化情况. 生物干化过程中微生物通过降解污泥中的 VS 释放出热量,达到升温调质降低污泥含水率的目的,故在生物干化过程中 VS 均有逐渐降低的趋势,且升温阶段有机质含量高,微生物活性高,VS 迅速降低,高温期和降温期 VS 下降缓慢.

图 7 可以看出,通风强度为 $180 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,VS 下降幅度最小,111 h 内从 66.70% 下降至 60.76%,下降了 8.91%. 通风强度变为 $60 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 、 $120 \text{ L} \cdot (\text{h} \cdot \text{kg})^{-1}$ 时,基质 VS 分别下降了 10.21% 和 13.50%. 总体看来,VS 下降幅度都较小,说明生物干化过程可以较大程度地保留污泥

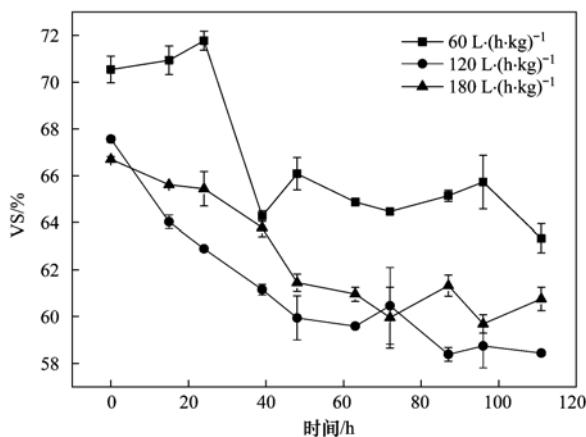


图7 不同通风强度条件下 VS 随时间变化

Fig. 7 Changes of VS with time under different air fluxes

中的有机物,方便污泥后续处理.

综合上述讨论,将各主要监测参数与通风强度的关系进行总结,如图8.

可以看出,随着通风量的增加,反应器出口 O_2 浓度的上升趋势和 CO_2 浓度的下降趋势均较为明显,经过生物干化过程,污泥中的 VS 下降比例均较小. 当通风强度为 $60 L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$ 、 $120 L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$ 时,污泥可以上升至高温 $66^\circ C$,通风强度升至 $180 L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$ 时,最高温度大幅下降至 $56^\circ C$. 通风强度为 $60 L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$ 时,虽然可达高温,但通风量过小,水分不能及时带出导致含水率下降比例有限,通风强度为 $180 L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$ 时通风量过大,热量散失过快,高温难以达到,虽可较快去除水分,但耗能过大. 可见, $120 L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$ 是本实验条件下最优通风强度.

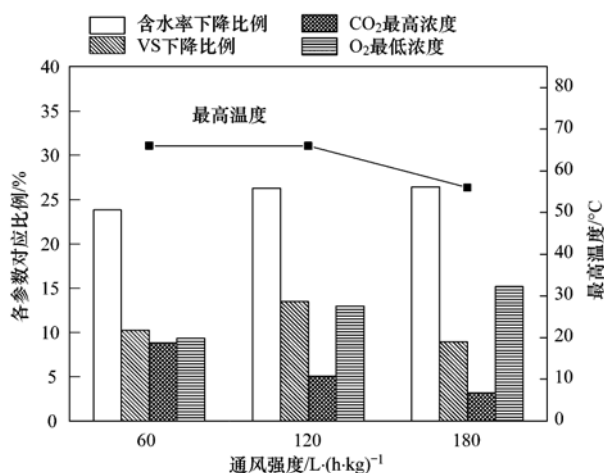


图8 各主要监测参数随通风强度变化

Fig. 8 Changes of main parameters during biodrying process under different air fluxes

3 结论

(1) 通风强度对污泥生物干化有较大影响,适宜通风强度可以保证充足的氧气供应前提下及时把水分从反应器带出,同时可以维持一段时间高温. 通风强度为 $120 L \cdot (h \cdot kg)^{-1}$ 时,最高温度达到 $66^\circ C$, $55^\circ C$ 以上高温可以维持 40 h 以上,水分蒸发迅速,111 h 后污泥最终含水率可以降低至最好效果 55.66%,耗能相对较小.

(2) 通风强度对 pH 影响较小, pH 始终保持在 6.5 ~ 8.5 之间,不会影响微生物生命活动,实验过程无需对 pH 进行调节. 控制污泥生物干化条件,可以达到较短周期内污泥含水率迅速降低至 60% 以下,同时较大程度保持污泥中有机质的效果,方便后续处理.

(3) 滚筒式污泥生物干化反应器能够使反应过程中反应器内基质保持良好的均一性,利用滚筒式反应器实现污泥连续流生物干化过程可行性较大.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [2] 邵立明, 顾伟妹, 徐华成, 等. 脱水污泥生物干化及产物农用性质评价 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2379-2383.
- [3] 邵立明, 何晶晶. 城市污水厂污泥热干燥处理与利用的可行性分析 [A]. 见: 赵宪忠. 枫林学苑 [M]. 上海: 上海科技文献出版社, 2000. 268.
- [4] Tsang K R, Vesilind P A. Moisture distribution in sludges [J]. Water Science & Technology, 1990, 22(12): 135-142.
- [5] 易浩勇. 污泥干燥特性及干燥过程研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006. 8-16.
- [6] Hall J E. Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union [J]. Water and Environment Journal, 1995, 9(4): 335-343.
- [7] Kraft D L, Orender H C. Considerations for using sludge as a fuel [J]. Tappi Journal, 1993, 76(3): 175-183.
- [8] 刘卫, 袁兴中, 欧阳建新, 等. 利用污泥熟肥作为高含水率污泥堆肥调理剂 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2349-2354.
- [9] 马娜, 陈玲, 熊飞. 我国城市污泥的处置与利用 [J]. 生态环境, 2003, 12(1): 92-95.
- [10] 阳金龙, 杜琼, 李东, 等. 辅料配比对污泥生物-物理联合干燥的影响 [J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2365-2370.
- [11] Frei K M, Cameron D, Stuart P R. Novel drying process using forced aeration through a porous biomass matrix [J]. Drying Technology, 2004, 22(5): 1191-1215.
- [12] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic

- microbial activity of a biosolids composting blend [J]. *Bioresource Technology*, 2003, **86**(2): 131-137.
- [13] Léonard A, Blacher S, Marchot P, *et al.* Convective drying of wastewater sludges: Influence of air temperature, superficial velocity, and humidity on the kinetics [J]. *Drying Technology: An International Journal*, 2005, **23**(8): 1667-1679.
- [14] Nakasaki K, Aoki N, Kubota H. Accelerated composting of grass clippings by controlling moisture level [J]. *Waste Management and Research*, 1994, **12**(1): 13-20.
- [15] Liang T, Khan M A, Meng Q. Spatial and temporal effects in drying biomass for energy [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, **10**(5-6): 353-360.
- [16] 魏源送, 李承强, 樊耀波, 等. 不同通风方式对污泥堆肥的影响[J]. *环境科学*, 2001, **22**(3): 54-59.
- [17] Ahn H K, Richard T L, Choi H L. Mass and thermal balance during composting of a poultry manure-Wood shavings mixture at different aeration rates [J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42**(2): 215-223.
- [18] 徐红, 樊耀波, 贾智萍, 等. 时间温度联合控制的强制通风污泥堆肥技术[J]. *环境科学*, 2000, **21**(6): 51-55.
- [19] 郭松林, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥生物干化的研究进展与展望 [J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(15): 102-105.
- [20] 陈飞燕. pH 值对微生物的影响 [J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2009, **8**(3): 121-124, 131.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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