

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峥, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究

韩智勇¹, 刘丹², 李启彬²

(1. 农业部沼气科学研究所, 成都 610041; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031)

摘要: 通过将厌氧型生物反应器填埋场(ANBL)和准好氧矿化垃圾生物反应床(SAARB)串联, 组成新型的厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场(AN-SABL), 研究其产气速率、产气量以及产气组分的变化规律, 以期为填埋气体的收集、利用和处理提供理论依据. 实验表明, AN-SABL中的厌氧填埋单元的产气受到了抑制, 其中ANBL2号单元和ANBL3号单元的产气率分别为 $49 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $39 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仅占ANBL1号的94.2%和75.0%, 但提高回灌频率, 能促进厌氧填埋单元的产气, 其甲烷含量最大值可达到62.67%; ANBL夏季产气速率和产气量明显高于冬季, 并以12 h为周期交替出现产气高峰; 此外, AN-SABL能够促进其厌氧单元的硝化和反硝化作用, N_2O 的含量受季节和填埋场类型影响显著, 其变化范围在0.0017%~4.0179%之间. ANBL的累积产气量在初始调整阶段呈对数增长, 过渡酸化阶段呈线性增长, 酸化产甲烷阶段呈指数增长.

关键词: 联合型生物反应器填埋场; 厌氧型生物反应器填埋场; 准好氧矿化垃圾生物反应床; 产气规律; 产气模型

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2118-07

Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill

HAN Zhi-yong¹, LIU Dan², LI Qi-bin²

(1. Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China; 2. The Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A novel bioreactor landfill, the anaerobic-semiaerobic bioreactor landfill (AN-SABL), was devised by combining an anaerobic bioreactor landfill (ANBL) with a semi-aerobic aged refuse biofilter (SAARB). Meanwhile, relevant parameters such as gas production volume and rate, and gas constituents were investigated to provide a theoretical foundation for the collection, utilization and treatment of landfill gas. Results indicated that the gas production of the anaerobic units was inhibited in the AN-SABLs. The gas production rates in the ANBL2 unit and the ANBL3 unit were $49 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $39 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively, which were only 94.2% and 75.0% of that in the ANBL1. However, the gas production in the anaerobic unit could be accelerated by increasing the recirculation frequency. The maximum methane content could reach up to 62.67%. Moreover, the gas production volume and velocity in the ANBL were much higher in summer than those in winter, and the gas production peak could be observed with a 12-hour cycle. Besides, the nitrification and the denitrification in the anaerobic units would be enhanced remarkably in the AN-SABLs. It resulted that the content of N_2O , which fluctuated between 0.0017% and 4.0179%, was influenced obviously by the seasonal variation and the landfill types. Based on the mathematical model of aerogenesis, the cumulative gas volume of the ANBL increased logarithmically in the initial aerobic phase, then increased linearly in the anaerobic acid phase, and increased exponentially in the methane production of acid phase afterwards.

Key words: hybrid bioreactor landfill (HBL); anaerobic bioreactor landfill (ABL); semi-aerobic aged refuse biofilter (SAARB); aerogenesis evolution; mathematical model of aerogenesis

生物反应器填埋场是通过有目的的控制手段, 强化微生物作用过程, 从而加速垃圾中易降解和中等易降解有机组分转化和稳定的一种垃圾卫生填埋场. 其中厌氧型生物反应器填埋场(ANBL)容易出现有机酸和氨氮积累而抑制垃圾降解, 并延长快速产甲烷阶段的启动时间^[1~5]; 而好氧型生物反应器填埋场(ABL)虽能促进对有机物、氮、磷、碱性金属等污染物的去除^[2,6~10], 但不能回收 CH_4 气体, 且运行费用高, 设计复杂. 因此部分学者提出, 通过串联其他类型的生物反应器, 回灌经处理后的渗滤液, 能起到稀释、中和作用, 可以从填埋场顶部到底部逐渐形成有利于产甲烷微生物生长和代谢的环境^[11], 促

进垃圾降解, 从而发展了联合型生物反应器填埋场(HBL).

由于矿化垃圾比表面积大, 水力渗透性能较好, 富含经高浓度渗滤液长期驯化得到的优势微生物^[12,13], 因此有学者采用矿化垃圾构建了生物反应床来处理渗滤液. 其中He^[14]和Long^[15]等用矿化垃圾生物反应器与填埋场串联处理渗滤液, 取得了良

收稿日期: 2011-09-23; 修订日期: 2011-12-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2010XS36, SWJTU09CX059)

作者简介: 韩智勇(1983~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用与处理处置, E-mail: zhiyonghan@yahoo.cn

好的有机物去除效果,但是无法去除氨氮. 故不少学者对其进行改进,发展了塔式矿化垃圾生物反应床^[16],二级和三级串联矿化垃圾生物反应床^[17,18],准好氧矿化垃圾生物反应床等^[19],极大地提高了有机物和氨氮的去除率.

为此,本研究通过将厌氧型生物反应器填埋场和准好氧矿化垃圾生物反应床(SAARB)进行串联,分析其产气规律,以期获得一种既廉价,又能促进填埋场快速稳定,还能回收CH₄气体的新型厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场(AN-SABL),为其填埋

气体的收集、处理和利用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验设备

ANBL 模型采用 $\phi 800\text{ mm} \times 1\,280\text{ mm}$ 的 PVC 密封柱,由下到上分别为:底座 + 200 mm 砾石层 + 土工布 + 生活垃圾层 + 50 mm 砾石层; SAARB 模型采用 $\phi 300\text{ mm} \times 1\,100\text{ mm}$ 的 PVC 柱,由下到上分别为:底座 + 200 mm 砾石层 + 土工布 + 矿化垃圾层,如图 1 所示.

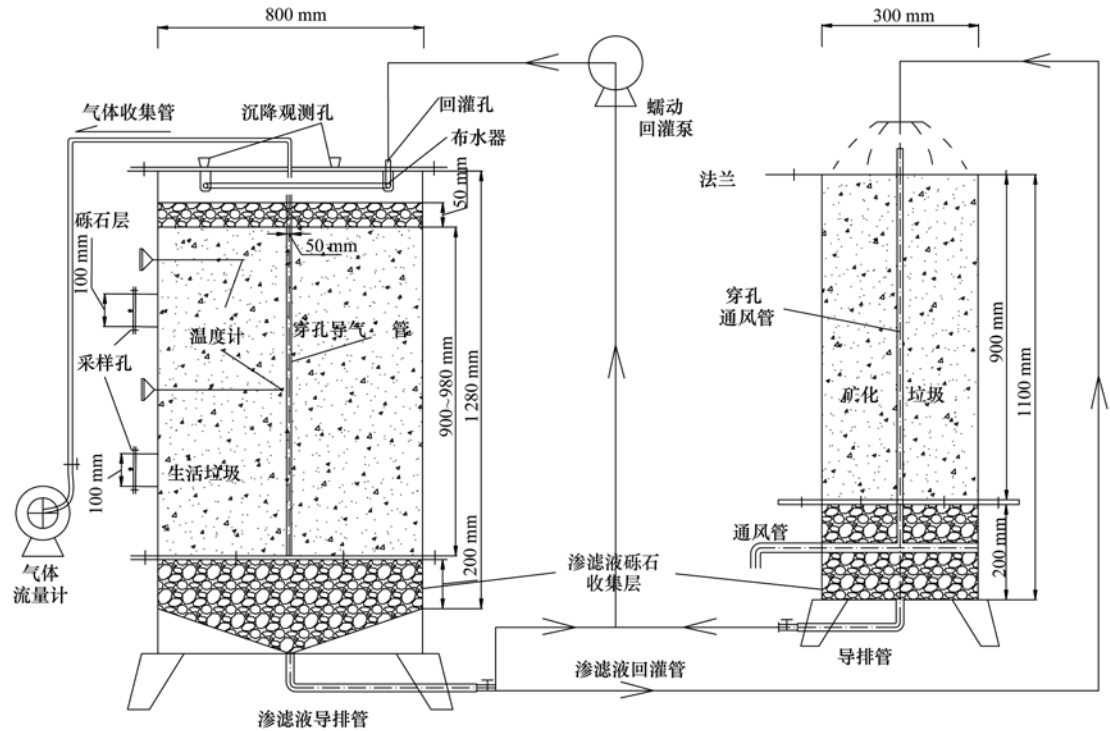


图 1 实验装置剖面示意

Fig. 1 Profile of laboratory apparatus

1.2 实验材料

ANBL 模拟柱中生活垃圾装填密度介于 762.4 ~

829.0 kg·m⁻³之间; SAARB 模拟柱中矿化垃圾装填密度均为1 000 kg·m⁻³,垃圾物化特征见表 1 所示.

表 1 装填垃圾物化特性

Table 1 Physical and chemical characteristics of filling wastes

样品	含水率 /%	可燃分(湿) /%	灰分(湿) /%	BDM /%	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹
矿化垃圾	31.84	13.74	54.42	11.08	72.84	5.380	22.40	1 062
生活垃圾	73.37	18.89	7.74	68.82	389.46	9.856	44.80	1 954

装填的生活垃圾具有含水率高、有机物含量高、渣土含量低的典型燃气生活垃圾特征;矿化垃圾经过孔径为 10 mm 的筛网筛分后,具有粒度均匀,孔隙率高,含水率较低,有机物含量低等典型的矿化垃圾特征.

1.3 实验设计

实验在室内以 1 个 ANBL 模拟柱作为参照组,以 2 个 AN-SABL 模拟柱作为对比组进行研究,采用不同的回灌方式,具体实施方案见表 2. 其中在实验初期,SAARB 模拟柱在室温(12 ~ 24℃)下运行 2 个月采取了保温措施,此后温度维持在 30℃左右;整个实验期间,ANBL 模拟柱均在室温(8.9 ~

28.5℃)下运行.

实验启动后,每月月底按成都 2000~2008 年月平均降雨量实施模拟降雨,共计加入了 68.9 L 自来

水.实验中,产气量和产气速率测量采用气体流量计测量,NH₃ 含量采用液体吸收法,其余气体组分均采用气相色谱法测定.

表 2 回灌频率及回灌量设计

Table 2 Experimental design of recirculation frequency and volume			
模型	参照组 (ANBL1 号)	对照组 1 号系统 (AN-SABL2 号)	对照组 2 号系统 (AN-SABL3 号)
回灌频率/d·次 ⁻¹	3	3	1
回灌量/L	1.6~15.7	1.0~17.0	0.5~23.6
回灌时间/min	10~90	ANBL 单元:10~90; SAARB 单元:5	
回灌方式	全回灌	ANBL 单元出水部分经 SAARB 单元处理后再回灌进入 ANBL 单元,剩余部分直接回灌进入 ANBL 单元	
驯化实验阶段 (2009-09-19~2009-10-09)	回灌 COD 浓度: 35 963~81 672 mg·L ⁻¹	SAARB 单元驯化采用混合培养法,进水量为 1.0 L,进水周期为 12 h,渗滤液与生活污水的混合体积比按(2:8)、(4:6)、(6:4)、(8:2)和(10:0)逐步提高.其中生活污水 COD 约 445 mg·L ⁻¹ ,NH ₄ ⁺ -N 约 30 mg·L ⁻¹ ; 渗滤液 COD 介于 23 327~71 712 mg·L ⁻¹ 之间,NH ₄ ⁺ -N 介于 232~1 170 mg·L ⁻¹ 之间,驯化方法详见文献[20]	
最优工况实验阶段 (2009-10-10~2010-04-07)	回灌 NH ₄ ⁺ -N 浓度: 149~1 454 mg·L ⁻¹	SAARB 单元最优工况研究采用正交法,进水量为 1~2 L,进水周期为 1~3 d,进水 COD 为 30 000~50 000 mg·L ⁻¹ ,实验详见文献[19]	
常规运行实验阶段 (2010-04-08~2010-12-04)		SAARB 单元实验按最优方式运行,进水量 2 L,进水频率与系统回灌频率相同,进水 COD 浓度介于 30 147~81 672 mg·L ⁻¹ 之间,NH ₄ ⁺ -N 介于 952~1 452 mg·L ⁻¹ 之间	

2 结果与分析

2.1 产气速率和产气量

2.1.1 阶段性变化规律

图 2 是 ANBL1 号、ANBL2 号单元、ANBL3 号单元在标准状态(101 325 Pa,0℃)下的产气速率和累积产气量的变化趋势图.

由图 2 可知,ANBL 和 AN-SABL 中厌氧填埋单元的产气速率和累积产气量的变化趋势相同.产气速率分别在填埋 1~2 d 后立即达到最大值 2.428、1.714 和 2.101 L·(kg·d)⁻¹,然后迅速下降;在 60

d 以后,趋于平缓;250 d 以后缓慢上升;380 d 后,产气速率略有下降;截止到 440 d 时,其平均速率分别为 0.073、0.039 和 0.049 L·(kg·d)⁻¹.产气速率的变化主要是由于内部微生物活性受到温度和填埋场不同阶段内部环境的变化所致.

实验结束时,累积产气量由大到小依次为 ANBL1 号(5 633 L,52 L·kg⁻¹)、ANBL3 号单元(5 196 L,49 L·kg⁻¹)和 ANBL2 号单元(4 237 L,39 L·kg⁻¹),相对 ANBL 来说,AN-SABL 中的 ANBL 单元的产气受到了抑制.这是因为渗滤液经过 SAARB 处理后,一部分有机物被好氧降解转化为气体释放,而且渗滤液得

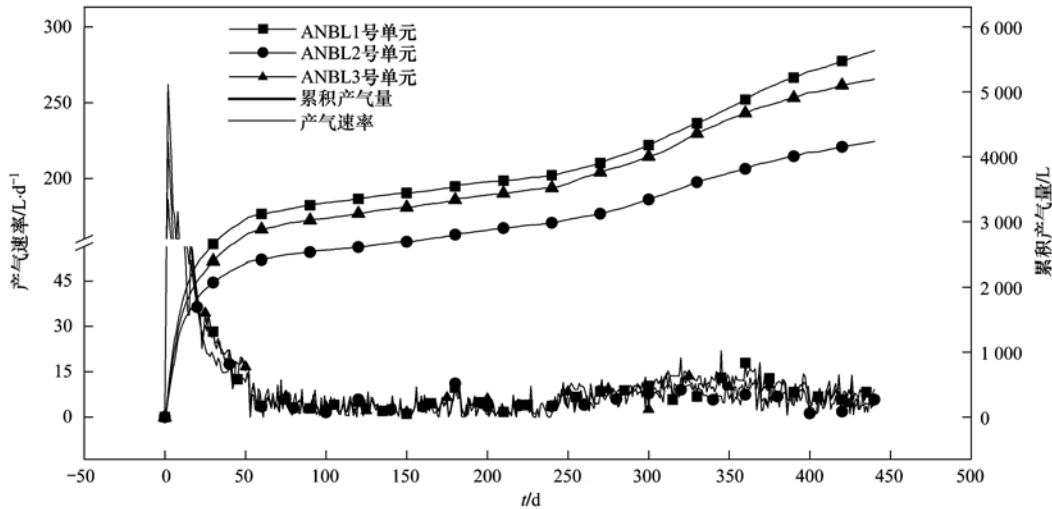


图 2 产气速率和累积产气量变化趋势

Fig. 2 Variation of landfill gas production rate and cumulative volume

以一定程度复氧(在冬季尤为明显),当返回到 ANBL 单元时,渗滤液中的溶解氧和 NO_3^- -N会抑制厌氧菌尤其是产甲烷菌的活性^[21,22]所致。

此外,在 AN-SABL 中,回灌频率为每天 1 次的 ANBL3 号单元的累积产气量要比回灌频率为每 3 天 1 次的 ANBL2 号单元的累积产气量大,这是由于增加回灌频率后,加强了填埋场内部的传质作用,更

加有利于 ANBL3 号中微生物的代谢产气。

2.1.2 单周期变化规律

为了研究 AN-SABL 在单个渗滤液回灌周期(1 d 和 3 d)内的产气速率和产气量变化规律,在冬季和夏季各进行了 1 次产气速率单周期监测实验,ANBL 单元的产气速率和产气量在标准状态(101 325 Pa, 0℃)下的单周期变化规律见图 3 和图 4。

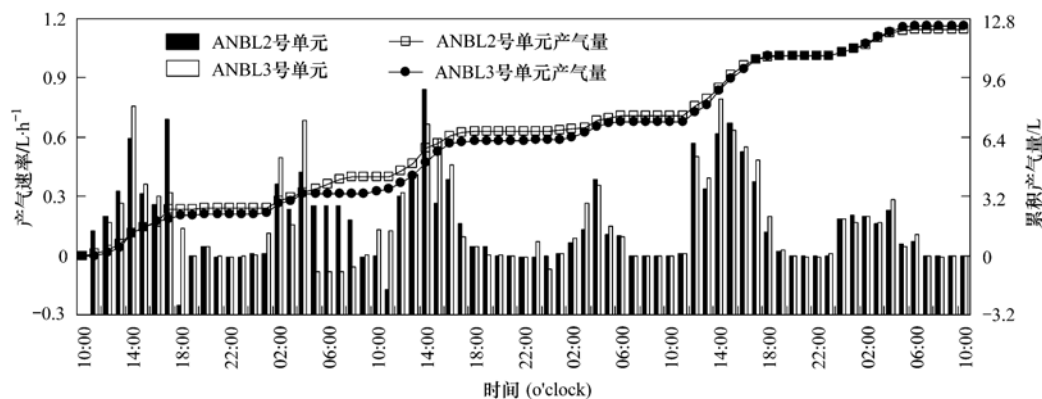


图 3 冬季单周期产气速率及累积产气量变化趋势

Fig. 3 Variation of gas production velocity and cumulative volume in the single-period experiment in winter

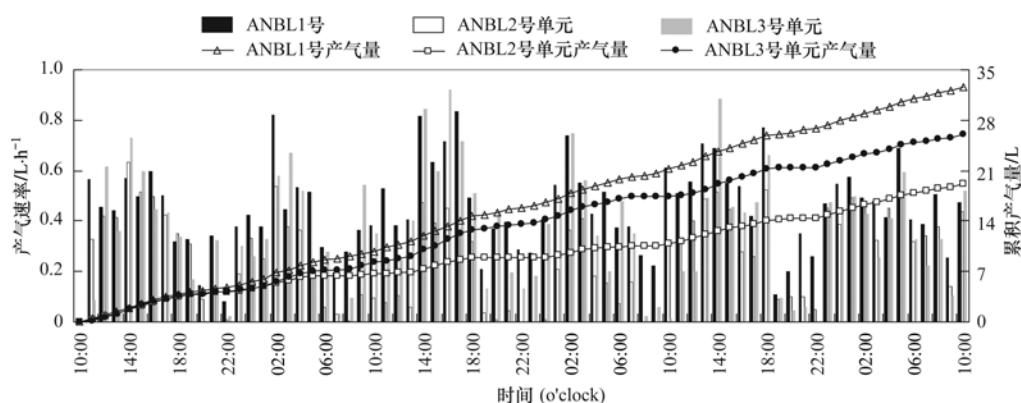


图 4 夏季单周期产气速率及累积产气量变化趋势

Fig. 4 Variation of gas production velocity and cumulative volume in the single-period experiment in summer

从图 3 和图 4 可以看出,ANBL 以 12 h 为周期交替出现产气高峰,每日分别在中午 14:00 和凌晨 02:00 附近出现。这一现象在其它实验中尚未见报道,推测可能是由于 ANBL 中微生物优势种群的生长繁殖或代谢周期引起产气速率的周期性变化,也可能是微生物代谢过程中产生的抑制物质的积累-消解周期性变动引起,还可能是由于推动流量计转动需要一定的压力,导致 ANBL 周期性突破压力释放气体而形成,具体原因还需要进一步研究。

此外,夏季产气速率和产气量均明显高于冬季。在夏季,产气量由大到小依次为 ANBL1 号、ANBL3 号单元、ANBL2 号单元,这主要是因为冬季,ANBL 中微生物活性受到较低温度的抑制而造成

的。在冬季,由于温差变化大,导致 ANBL 倒吸,故产气速率还出现了负值。

2.2 产气组分

2.2.1 主要气体变化规律

(1) CH_4 含量

图 5 为 ANBL 填埋气体中 CH_4 所占的体积分数的变化趋势。

ANBL 各模拟柱填埋气体的 CH_4 含量(体积分数)变化趋势基本一致,即在前 60~70 d 内从 0 开始迅速增加,随后稳定在 20% 以内,260 d 之后开始迅速升高,其中 ANBL1 号和 ANBL2 号单元的 CH_4 含量分别在第 418 d 和第 388 d 达到最大值 62.60% 和 57.62% 后迅速降低到 50% 以下,而回灌

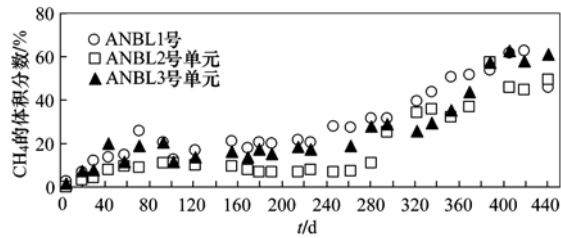


图5 CH₄ 含量变化趋势
Fig. 5 Variation of CH₄ content

频率为每天1次的ANBL3号的CH₄含量在第405 d达到最大值62.67%后,只略微下降,维持在60%附近.整个实验期间,ANBL2号单元的CH₄含量大部分时间均处于最低水平.

尽管有报道称,当pH值低于5.5时产甲烷反应将停止^[23],但是本实验和其他大量实验均证实,当反应体系的pH值为5.0~6.0时,仍然能够检测到含量高达10%~40%的甲烷气体^[1, 11, 24~27],这说明产甲烷菌在酸性环境下仍然能够生长繁殖.

由图5可知,与ANBL1号相比,AN-SABL中的ANBL2号单元和ANBL3号单元的产甲烷能力均受到了抑制,这同样是因为回灌复氧后的渗滤液抑制产甲烷菌的活性导致.尽管如此,实验显示在酸化产甲烷阶段,增大回灌频率能够有效减少这一因素对

产甲烷的抑制作用.

(2) CO₂ 含量

ANBL 填埋气体中CO₂所占的体积分数的变化趋势如图6所示.

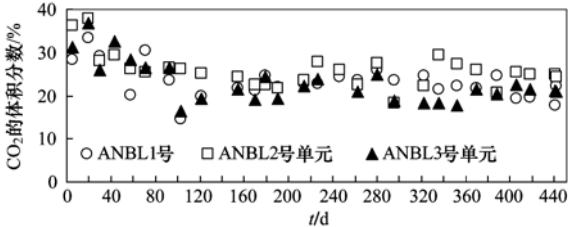


图6 CO₂ 含量变化趋势
Fig. 6 Variation of CO₂ content

由于垃圾刚填埋时带入了空气,微生物进行激烈的好氧分解,因此ANBL1号、ANBL2号单元、ANBL3号单元的CO₂含量(体积分数)在前15~20 d内快速增加,先后达到峰值33.32%、37.92%和36.80%.此后,氧气消耗殆尽,使CO₂含量迅速下降.120 d后,ANBL内部环境基本稳定,在厌氧产酸菌和产甲烷菌等微生物共同作用下,CO₂浓度开始保持相对稳定,大部分介于20%~25%之间.

2.2.2 微量气体

在实验期间分别对CO、NO、N₂O、NH₃进行了针对性的监测,结果见表3所示.

表3 微量气体含量

Table 3 Content of trace gases

微量气体	ANBL1 号	ANBL2 号	ANBL3 号
CO × 10 ⁻² / %	1.40	1.07	1.43
NO × 10 ⁻⁴ / %	0.586	1.027	1.200
N ₂ O / % (冬季)	0.001 7	2.261 9	4.017 9
N ₂ O / % (夏季)	0.182 5	0.094 2	0.056 4
NH ₃ × 10 ⁻³ / %	4.417 9	5.151 9	5.786 6
N ₂ O 释放速率 / mg · (m ² · d) ⁻¹	0.030 ~ 3.168	2.927 4 ~ 70.296	3.469 ~ 247.314

由表3可知,填埋气体中微量气体CO、NO、N₂O和NH₃的含量很小,而且在各个ANBL模拟柱中,CO和NH₃含量基本相同,但是ANBL1号和ANBL2号单元、ANBL3号单元的NO和N₂O含量相差较大,这说明一方面在ANBL中,尽管呈厌氧环境,但是仍然能发生硝化和反硝化反应;另一方面,在AN-SABL中,由于在回灌过程中会携带更多氧气和硝酸盐进入ANBL单元(尤其是在冬季),故可促进内部的硝化和反硝化作用.

3 累积产气量模型构建

上述分析可知,在AN-SABL中,ANBL单元的产气可分为初始调整阶段、过渡酸化阶段、酸化产甲

烷阶段,因此,如果要准确进行预测,需进行分段研究与分析.

3.1 累积产气量模型的选择和建立

(1) 初始调整阶段

在初始调整阶段,由于氧气的存在,在很短的时间内(1~2 d)产气速率迅速达到最大值.考虑到2 d的时间与填埋场整个稳定化过程相比非常短,可以忽略,因此整个期间ANBL的气体累积产生量呈对数增长,即:

$$V_{g1} = a_1 \lg(t_1) + b_1 \quad (1)$$

式中, V_{g1} 为初始调整阶段累积产气量(L); t_1 为填埋时间(d); a_1 为产气系数; b_1 为产气因子.

(2) 过渡酸化阶段

在过渡酸化阶段,微生物种类及数量相对稳定,整个填埋场内部长时间维持在稳定的酸性环境中,填埋场中微生物活性因有机酸积累的影响而受到抑制,这使得此阶段的产气量较低,而且变化幅度不大,累积产气量呈线性增长,即:

$$V_{g2} = a_2t_2 + b_2 \tag{2}$$

式中, V_{g2} 为过渡酸化阶段累积产气量(L); t_2 为填埋时间(d); a_2 为产气系数; b_2 为产气因子.

(3) 酸化产甲烷阶段

在酸化产甲烷阶段,尽管填埋场仍处于酸化阶段,但是由于在填埋场中产甲烷菌数量开始迅速增加,而且基质充足,因此开始大量产甲烷,填埋气体累积产生量开始呈指数增长,即:

$$V_{g3} = V_3e^{k_1t_3} \tag{3}$$

式中, V_{g3} 为酸化产甲烷阶段累积产气量(L); V_3 为时间 t_2 以前已产生的填埋气量(L); t_3 为填埋时间(d); k_1 为产气速率常数(d^{-1}).

综上所述,厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场的累积产气量预测模型如下:

$$V_g = \begin{cases} a_1\lg(t) + b_1 & (t \leq t_1) \\ a_2t + b_2 & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ V_3e^{k_1t} & (t_2 \leq t) \end{cases} \tag{4}$$

式中, V_g 为累积产气量(L); t 为填埋时间(d);其余参数与前述相同.

3.2 累积产气量模型的求解和检验

根据监测数据,利用 EXCEL 2003 软件进行模型参数求解,公式(4)中的参数见表 4.

表 4 模型参数表

Table 4 Parameters of simulated models			
参数 ¹⁾	ANBL1 号	ANBL2 号	ANBL3 号
a_1	817.59	641.75	765.19
b_1	-154.85	-138.19	-216.47
R^2	0.992 5	0.990 1	0.993 1
a_2	3.22	3.07	3.50
b_2	2 957.4	2 247.3	2 701.4
R^2	0.994 9	0.996 4	0.997 5
V_3	2 034.5	1 716.6	1 937.6
k_1	0.002 4	0.002 2	0.002 4
R^2	0.997 4	0.996 2	0.995 6

1) R^2 为全相关系数

由表 4 可分别得到 ANBL1 号、ANBL2 号单元、ANBL3 号单元的累积产气量计算公式,即:

$$V_{g1} = \begin{cases} 817.59\lg(t) - 154.85 & (t \leq 60) \\ 3.22t + 2\,957.4 & (60 \leq t \leq 250) \\ 2\,034.5e^{0.002\,4t} & (250 \leq t) \end{cases} \tag{5}$$

$$V_{g2} = \begin{cases} 641.75\lg(t) - 138.19 & (t \leq 60) \\ 3.07t + 2\,247.3 & (60 \leq t \leq 250) \\ 1\,716.6e^{0.002\,2t} & (250 \leq t) \end{cases} \tag{6}$$

$$V_{g3} = \begin{cases} 765.19\lg(t) - 216.47 & (t \leq 60) \\ 3.50t + 2\,701.4 & (60 \leq t \leq 250) \\ 1\,937.6e^{0.002\,2t} & (250 \leq t) \end{cases} \tag{7}$$

利用以上公式对模拟的厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场累积产气量进行预测,其预测值与实测值非常接近,各模拟填埋场累积产气量参数拟合的全相关系数均在 0.99 以上(见图 7),故用分段

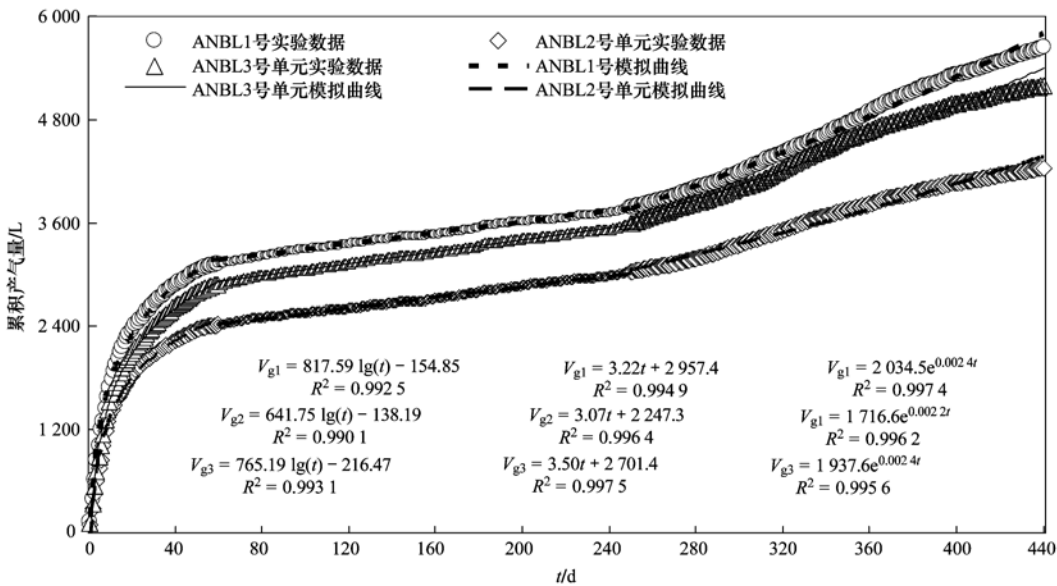


图 7 累积产气量实测值与模拟值拟合

Fig. 7 Fitting curves of experimental value and simulated value of cumulative gas volume

函数对厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场的累积产气量进行预测,具有较高的准确性。

4 结论

(1)不同的 ANBL 产气速率变化趋势相似,受气温、不同阶段、不同操作方式的影响较大,呈现出高速升高,迅速下降,然后保持稳定的变化趋势。

(2)累积产气量由大到小依次为 ANBL1 号(5 633 L, 52 L·kg⁻¹)、ANBL3 号单元(5 196 L, 49 L·kg⁻¹)和 ANBL2 号单元(4 237 L, 39 L·kg⁻¹)。相对 ANBL 来说,AN-SABL 中的 ANBL 单元的产气受到了抑制,但提高回灌频率,能促进产气。

(3)在单周期实验中,ANBL 以 12 h 为周期交替出现产气高峰;而且夏季产气速率和产气量明显高于冬季。

(4)AN-SABL 中的 ANBL 单元产甲烷虽然受到抑制,但是在酸化产甲烷阶段通过提高回灌频率,可促进甲烷的产生;CO₂ 含量在通过迅速上升和下降的变化后,大部分稳定在 20%~25% 之间。

(5)ANBL1 号、ANBL2 号单元、ANBL3 号单元的填埋气体中 CO、NO 和 NH₃ 等气体的含量均相差不大,但是 N₂O 的含量受季节和填埋场类型影响显著,AN-SABL 能够促进其厌氧单元的硝化和反硝化作用,冬季尤为明显。

(6)ANBL 的累积产气量在初始调整阶段呈对数增长,过渡酸化阶段呈线性增长,酸化产甲烷阶段呈指数增长,建立的分段函数模型参数拟合的全相关系数均在 0.99 以上,具有较高的准确性。

参考文献:

- [1] Sponza D T, Ağdağ O N. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors [J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(12): 2157-2165.
- [2] Sang N N, Soda S, Sei K, *et al.* Effect of aeration on stabilization of organic solid waste and microbial population dynamics in lab-scale landfill bioreactors [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2008, **106**(5): 425-432.
- [3] 曹丽娜. 城市生活垃圾填埋场渗滤液回灌处理研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [4] Hao Y J, Wu W X, Wu S W, *et al.* Municipal solid waste decomposition under oversaturated condition in comparison with leachate recirculation[J]. *Process Biochemistry*, 2008, **43**(1): 108-112.
- [5] 王浩. 不同渗滤液回灌条件下 MSW 实验室模拟填埋产气研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2008.
- [6] 李兵, 董志颖, 赵勇胜, 等. 2 种 MSW 好氧生物反应器型填埋方式的对比实验[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 180-185.
- [7] 李秩伦. 好氧回灌法处理城市垃圾填埋场渗滤液的机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [8] 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.
- [9] Giannis A, Makripodis G, Simantiraki F, *et al.* Monitoring operational and leachate characteristics of an aerobic simulated landfill bioreactor [J]. *Waste Management*, 2008, **28**(8): 1346-1354.
- [10] Mark M, John M. In-situ municipal solid waste composting using an aerobic landfill system[EB/OL]. <http://www.p2pays.org/ref/12/11566.pdf>, 2010-09-01.
- [11] He P J, Qu X, Shao L M, *et al.* Leachate pretreatment for enhancing organic matter conversion in landfill bioreactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **142**(1-2): 288-296.
- [12] 赵由才, 柴晓利, 牛冬杰. 矿化垃圾基本特性研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(10): 1361-1363.
- [13] 石磊, 张全, 牛冬杰, 等. 矿化垃圾反应床处理渗滤液的微生物学特性[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(8): 1085-1089.
- [14] He P J, Shao L M, Guo H D, *et al.* Nitrogen removal from recycled landfill leachate by ex situ nitrification and in situ denitrification[J]. *Waste Management*, 2006, **26**(8): 838-845.
- [15] Long Y, Lao H M, Hu L F, *et al.* Effects of in situ nitrogen removal on degradation/stabilization of MSW in bioreactor landfill [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(8): 2787-2794.
- [16] 何岩, 赵由才, 柴晓利, 等. 塔式矿化垃圾生物反应床处理垃圾填埋场渗滤液的效能研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, **29**(7): 502-509.
- [17] 陶正望, 夏立江, 王进安. 矿化垃圾生物反应床处理垃圾渗滤液的效果[J]. *农业工程学报*, 2009, **25**(1): 213-216.
- [18] Li H J, Zhao Y C, Shi L, *et al.* Three-stage aged refuse biofilter for the treatment of landfill leachate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(1): 70-75.
- [19] Han Z Y, Liu D, Li Q B, *et al.* A novel technique of semi-aerobic aged refuse biofilter for leachate treatment[J]. *Waste Management*, 2011, **31**(8): 1827-1832.
- [20] 刘丹, 张爱平, 陈锦文. 准好氧生物反应器处理渗滤液系统的驯化研究[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(19): 80-82.
- [21] Price G A, Barlaza M A, Haterb G R. Nitrogen management in bioreactor landfills[J]. *Waste Management*, 2003, **23**(7): 675-688.
- [22] El-Mahrouki I M L, Watson-Craik I A. The effects of nitrate and nitrate-supplemented leachate addition on methanogenesis from Municipal Solid Waste[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2004, **79**(8): 842-850.
- [23] Ruskin F R. Food, fuel, and fertilizer from organic wastes[M]. Washington DC: National Academy Press, 1982.
- [24] Sponza D T, Ağdağ O N. Effects of shredding of wastes on the treatment of municipal solid wastes (MSWs) in simulated anaerobic recycled reactors [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2005, **36**(1): 25-33.
- [25] 郝永俊. 基于生物反应器的城市生活垃圾快速降解与渗滤液原位脱氮特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [26] Šan I, Onay T T. Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, **87**(1-3): 259-271.
- [27] Ağdağ O N, Sponza D T. Effect of alkalinity on the performance of a simulated landfill bioreactor digesting organic solid wastes [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(6): 871-879.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人