

## 渗滤液回灌负荷对填埋场垃圾产气效能的影响

杨国栋<sup>1</sup>, 蒋建国<sup>1\*</sup>, 黄云峰<sup>1</sup>, 黄中林<sup>2</sup>, 冯向明<sup>2</sup>, 周胜勇<sup>2</sup>, 邓舟<sup>1</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 深圳下坪固体废弃物填埋场, 深圳 518019)

**摘要:** 以 4 座有效垃圾量均为 30t 的模拟厌氧生物反应器填埋柱(R1~ R4), 每周分别回灌 1.6、0.8、0.2m<sup>3</sup> 的渗滤液和 0.1m<sup>3</sup> 清水, 对比分析渗滤液回灌负荷对垃圾产气效能及稳定化进程的影响。结果表明, 回灌比例最大(5.3%) 的实验柱 R1 在回灌 5 周后开始大量产气, 比 R2~ R4 分别提前了 7~ 13 周; 且垃圾产气速率与系统进水 COD、VFA 等污染负荷的变化存在正相关关系。回灌至第 50 周时, R1 柱内垃圾更趋于稳定, TOC 和 COD 的累积气相转化率分别为 28.96% 和 14.57%, 这表明部分有机质在回灌早期随液相流失, 减少了垃圾产气潜能。因此, 为提高生物反应器填埋场的垃圾产气效能, 应根据垃圾稳定化的不同阶段适时地调整回灌方案。

**关键词:** 生物反应器填埋场; 渗滤液循环; 回灌负荷; 城市垃圾; 稳定化; 填埋气体

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)10-2129-06

## Impact of Leachate Recirculation Loadings on Efficiency of Landfill Gas (LFG) Generation

YANG Guo-dong<sup>1</sup>, JIANG Jian-guo<sup>1</sup>, HUANG Yun-feng<sup>1</sup>, HUANG Zhong-lin<sup>2</sup>, FENG Xiang-ming<sup>2</sup>, ZHOU Sheng-yong<sup>2</sup>, DENG Zhou<sup>1</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Shenzhen Xiaping Sanitary Landfill, Shenzhen 518019, China)

**Abstract:** Effects of leachate recirculation loading on the efficiency of aerogenesis or methanogenesis of municipal solid wastes (MSWs) was investigated in four simulated anaerobic bioreactors (R1~ R4), which were filled with 30 tons of wet weight waste each and recirculated weekly with 1.6, 0.8 and 0.2m<sup>3</sup> leachate and 0.1m<sup>3</sup> pure water, respectively. The results indicated that R1, with the highest recirculation ratio of 5.3%, began to produce landfill gas (LFG) largely after 5 weeks of leachate recirculation, while the other columns took 7~ 13 more weeks of lag phase time of LFG production. And LFG generation rates had good relationships with pollution loadings, such as COD and VFA in the leachate. By the 50th week, the waste in R1 was more stabilized with the highest loading rate. The accumulative transfer ratios to gas phase of TOC and COD were 28.96% and 14.57%, respectively, which meant large amount of organic matter was carried out by the effluent of the early stage and thus the potential of LFG generation was reduced. Therefore, to enhance the efficiency of LFG generation, the regimes of leachate recirculation in bioreactor landfills should be adjusted timely according to the phases of waste stabilization.

**Key words:** bioreactor landfill; leachate recycle; recirculation loading; municipal solid waste (MSW); stabilization; landfill gas (LFG)

目前, 卫生填埋法在对城市生活垃圾的处理处置过程中暴露出诸如 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 等温室气体释放、渗滤液污染等长期潜在的环境危害, 其改进和发展方向之一即是: 通过填埋场渗滤液的回灌或循环、添加营养物质、调节 pH 值, 以及垃圾预处理或后处理等手段<sup>[1]</sup>, 构建生物反应器填埋场 (bioreactor landfill)<sup>[2]</sup>, 增大垃圾层的水分含量及微生物活性以加快垃圾的降解速率, 使填埋气体的产生更为迅速和集中, 有利于甲烷的生成和利用, 同时渗滤液和垃圾的稳定化过程可缩短为 2~ 3a<sup>[3]</sup>。这在美洲、欧洲、东亚等发达地区已经获得了较好的验证及应用, 如美国已有 200 多座垃圾填埋场采用此项技术, 英国 50% 的填埋场进行了渗滤液回灌, 加拿大、澳大

利亚、日本等国也进行了生物反应器填埋场的现场研究与工程实践<sup>[4~ 6]</sup>。我国从 1995 年开始对生物反应器填埋技术的相关研究, 但大多集中于实验室模拟和机理研究, 缺乏现场规模的实验数据和工程应用<sup>[7~ 10]</sup>。

比较而言, 渗滤液的回灌负荷是影响填埋垃圾产气效能的主要因素之一, 已有的研究成果却存在较大的出入, 最佳的回灌比从 13% 到 30% 不

收稿日期: 2005-09-13; 修订日期: 2006-01-20

基金项目: 深圳市科技局资助项目

作者简介: 杨国栋(1980~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化技术。

\* 通讯联系人, E-mail: jiangguoj@mails.tsinghua.edu.cn

等<sup>[11~14]</sup>. 本研究旨在通过我国南方湿润地区填埋场现场环境中的中试规模生物反应器填埋柱实验, 分析渗滤液回灌的污染负荷、水力负荷等对填埋垃圾产气速率和产气量的影响, 探索适用于我国城市垃圾填埋气体利用的生物反应器填埋场的操作条件.

1 材料与方法

1.1 装置的设计与材料

本实验共有 3 个模拟生物反应器填埋柱和 1 个控制反应柱(分别记为 R1 R2 R3 R4), 填埋柱的结构如图 1 所示. 单座实验柱规模为 2.5m × 3m × 5.5 m, 主体由砖混结构砌筑而成. 每座实验柱填入 4m 厚的垃圾, 实验柱内壁以及顶部用 HDPE 膜焊接密封; 在不同高度设置 2 个采样口, 并预埋温度探头. 垃圾的下部和上部布设 HDPE 网和砾石; 上层砾石中埋设渗滤液均匀式布水管(连接到渗滤液调节池)和填埋气体收集管(接有累积型气体流量计). 下层砾石中埋有渗滤液收集管, 其上设置有液位计, 用于观察底层防渗膜上液位高度.

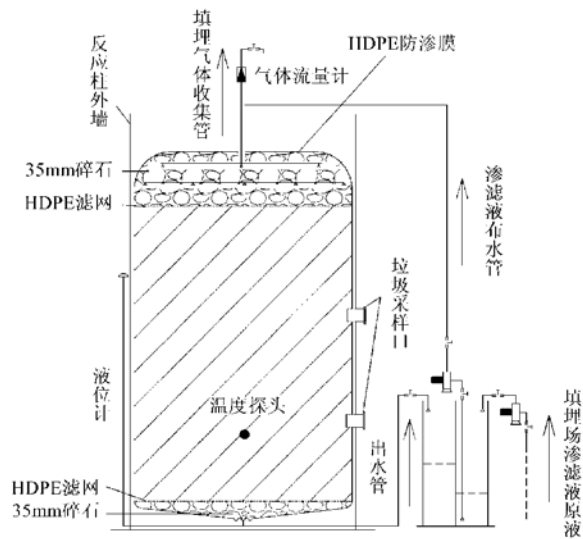


图 1 下坪填埋场的中试模拟生物反应器填埋柱剖面图  
Fig. 1 Profile of the pilot scale simulated bioreactor landfill in Xiaping Sanitary Landfill

实验用垃圾取自深圳市当日收集的新鲜垃圾, 垃圾被压缩车送来后混匀分成 4 份, 分别填入各座实验柱中, 垃圾压实密度约为 0.93 t/m<sup>3</sup>(此密度参考下坪填埋场实际垃圾填埋密度). 装填垃圾的平均组分如表 1 所示.

1.2 实验操作与分析方法

在实验柱装填垃圾完毕后, 经过近 80d 的厌氧

培养过程, 即对 R1~ R4 实验柱分别以相当于垃圾湿重的 5.3%、2.7%、0.67% 和 0.33% 的比例每周回灌 1.6、0.8、0.2m<sup>3</sup> 渗滤液和 0.1m<sup>3</sup> 清水, 回灌频率基本上保持不变. 其中, R1~ R3 柱所回灌的渗滤液取自下坪填埋场渗滤液调节池, 此渗滤液为弱碱性(pH 值为 7.32~ 7.42), 具有调节酸碱度和接种的作用. R4 柱(或称控制柱)回灌自来水, 用以模拟现场填埋作业方式下的降水情形.

表 1 反应器装填垃圾的组分分析

| Table 1 Component of the wastes filled in experimental reactors |      |     |     |     |     |     |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 垃圾组分                                                            | 厨余   | 竹木  | 织物  | 纸张  | 泡沫  | 金属  | 塑料、橡胶 | 玻璃、陶瓷 |
| 质量分数 (湿)/%                                                      | 67.0 | 3.7 | 2.3 | 2.6 | 1.8 | 0.9 | 19.9  | 1.8   |

每周回灌之前, 对回灌渗滤液原液和反应器出水分别采样、分析, 同时记录渗滤液产生量、反应器温度、填埋气体产生量等指标. 所采用的样品分析方法如表 2 所示.

表 2 实验样品的主要分析方法

| Table 2 Methods of analysis of the experimental samples |                                       |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 主要监测指标                                                  | 检测方法或仪器                               |
| pH 值                                                    | 玻璃电极法或精密 pH 值试纸                       |
| 化学需氧量(COD)                                              | GB11914-89 重铬酸钾法                      |
| 生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )                                | GB7488-87 稀释与接种法                      |
| 挥发性脂肪酸(VFA)                                             | 气相色谱法 (SHIMADZU 公司 GC-14C 气相色谱仪)      |
| 总有机碳(TOC)                                               | 非色散红外吸收法 (SHIMADZU 公司 5000-A 型 TOC 仪) |
| 垃圾体温度                                                   | 反应器内置温度探头                             |
| LFG 体积                                                  | 累积型气体流量计                              |

2 结果与讨论

经过 300d 以上的回灌操作与监测分析, 主要实验结果如图 2~ 7 所示.

2.1 渗滤液回灌水力负荷对填埋场产气速率的影响

如图 2(a) 所示, 随着回灌量的减少, R1~ R4 柱依次先后进入大量产气阶段. 因早期没有对气体组分进行分析, 产甲烷滞后时间<sup>[15]</sup>可近似地以产气量达到 1 000L 的时间作为参考. 如 R1 柱在回灌至第 5 周前后达到 1 088L, 这比 R2~ R4 柱的产气量达到同一水平分别提前了 7、10 和 12 周.

可见, 较大水量的渗滤液回灌能够明显加快垃圾产气速度, 缩短垃圾产气滞后时间, 也即缩短了垃圾水解、产酸以及甲烷发酵环境形成的过程. 在一定时间内, 填埋气体累计产量与渗滤液回灌量也存在正相关关系, 即产气量随回灌量增大而增大. 截至第

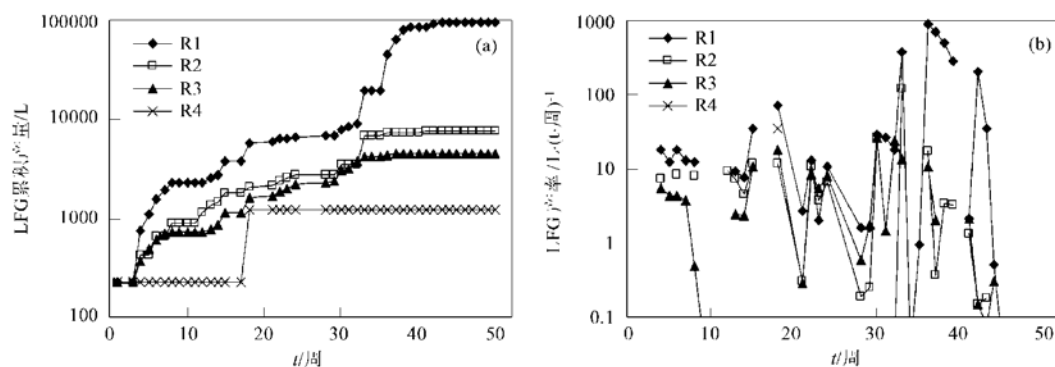


图 2 各柱 LFG 累计产量及产生速率的变化

Fig. 2 Variations of LFG volumes and LFG generation rates of R1~R4

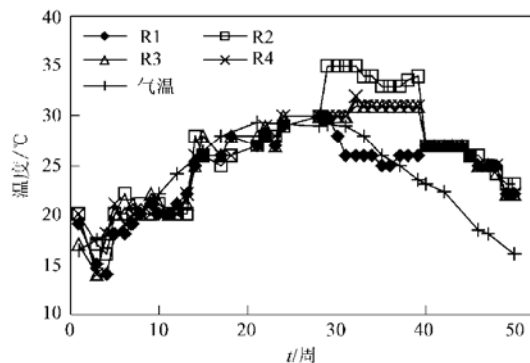
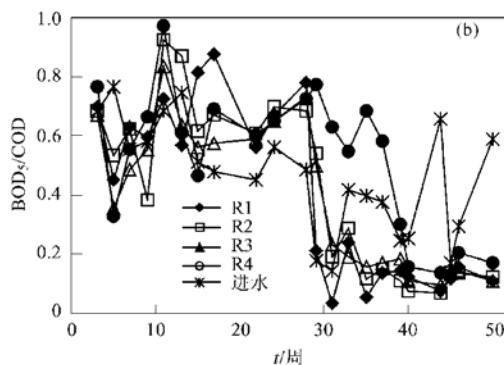
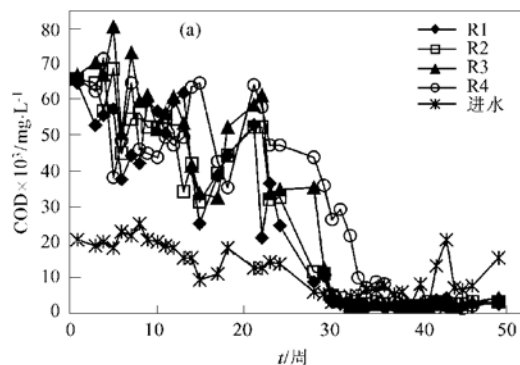


图 3 各柱温度与外部气温的变化

Fig. 3 Temperature Variations of R1~R4 and the environment

图 4 各柱进、出水 COD 和 BOD<sub>5</sub>/COD 的变化Fig. 4 COD and BOD<sub>5</sub>/COD variations of influent and effluent leachate from R1~R4

如从反应器温度来看,由于渗滤液的回灌,垃圾层内的微生物活性较高,生化反应产热使反应器逐渐升温至 30℃左右(图 3);但在 30 周左右,尽管此时出现了产气高峰值,但在当地高强度的大气降水和较大的回灌负荷冲击条件下,R1 柱的温度反而下降至 25℃,说明垃圾降解反应产热已不足以提升或

50 周,R1 柱的 LFG 累计体积已达 94 945L,而 R2~R4 柱的 LFG 只有 7 515L、4 541L 和 1 230L。

但从产气量阶段性增加的规律来看,垃圾产气速率并没有稳定的上升,而存在较大的波动,如图 2(b)。以 R1 柱为例,回灌至 33 周时,垃圾产气的平均速率为  $382.4 \text{ L} \cdot (\text{t} \cdot \text{周})^{-1}$ ,而 34~35 周时降至  $0.1 \text{ L} \cdot (\text{t} \cdot \text{周})^{-1}$  以下,但在 36 周时又迅速恢复至  $910.4 \text{ L} \cdot (\text{t} \cdot \text{周})^{-1}$ 。这表明较大的水力负荷对垃圾层的微观环境造成了一定的负面影响,如渗滤液在垃圾表面积存下来,将不利于接种微生物在垃圾表面的附着以及生物反应的发生<sup>[11]</sup>,也不利于填埋场结构和系统温度的稳定。

保持反应器温度。同时随着反应器温度的降低,产气速率在经历了剧烈的波动后降至  $0.5 \text{ L} \cdot (\text{t} \cdot \text{周})^{-1}$  的低谷。相比之下,R2 柱保持 2.7% 的回灌比例,能够保证调节水分和接种的作用,且不会带走过多的微生物和有机质,系统稳定温度较高,承受冲击负荷的能力较强,直至 40 周后由于环境温度的降低导致系

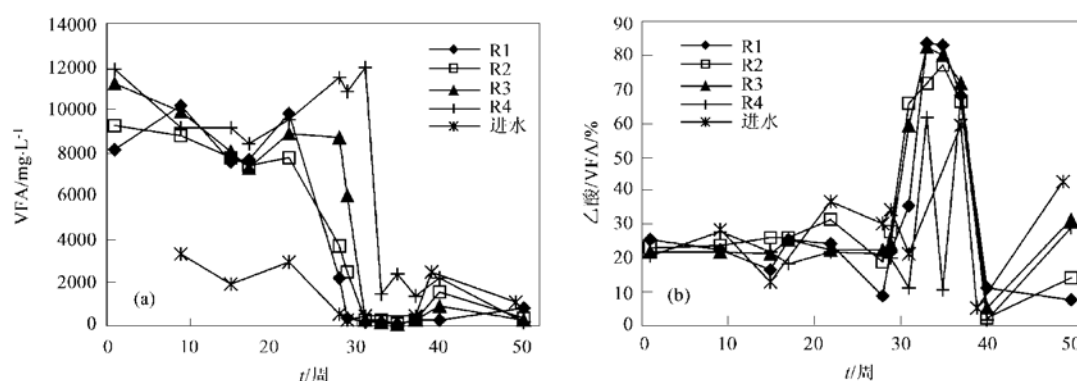


图5 各柱进、出水VFA和乙酸/VFA的变化

Fig. 5 VFA and acetic acid/VFA variations of influent and effluent leachate from R1~ R4

统温度下降. 因此, 生物反应器填埋场内的温度变化可以作为其内部生物化学反应状况的重要表征, 垃圾产气活动的适宜温度应稳定在 30℃以上, 乃至 37~45℃<sup>[12]</sup>, 而系统回灌水量应根据温度变化做出必要的调整.

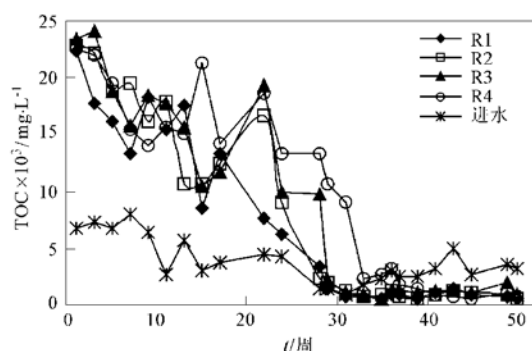


图6 各柱进、出水TOC的变化

Fig. 6 TOC variations of influent and effluent leachate from R1~ R4

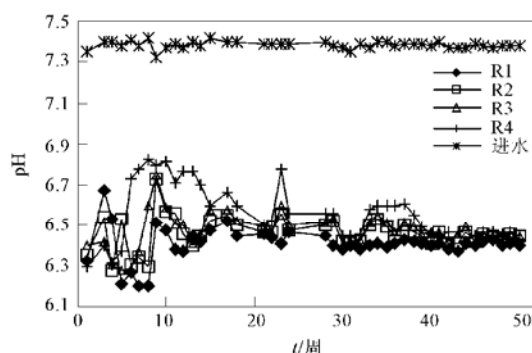


图7 各柱进、出水pH的变化

Fig. 7 pH variations of influent and effluent leachate from R1~ R4

## 2.2 反应器进水污染负荷对填埋气体产生速率的影响

由于本实验反应器所采用的回灌进水取自深圳下坪填埋场渗滤液调节池内的原液, 因受本地干湿季节不同的大气降水量以及填埋场内垃圾的不同降解程度的影响而存在较大的污染物浓度波动, 尤其是有机污染强度, 体现出夏、秋季(5~11月)较低, 而春、冬季节较高的趋势.

如图4(a)所示的实验结果, 以COD浓度在20000mg/L左右的渗滤液对R1~R3柱进行回灌后, 出水COD浓度都很高, 其峰值(64480~80710mg/L)与控制柱R4的出水峰值相当(71370mg/L), 因而有大量的有机物质随反应器出水流出系统.

当回灌进行到28周时, R1柱的出水COD浓度迅速下降至9190mg/L(同期R2~R4的出水COD浓度分别为17700 35430 43920mg/L), 34周之后稳定在2000mg/L左右, 而R2柱降至同一水平仅延迟了3周(R3~R4柱分别延迟了7~8周). 反应器出水的VFA、TOC浓度与COD浓度变化规律基本类似[图5(a)、图6]. 一方面, 这是由于进水污染浓度的降低, 减轻了系统的有机负荷; 另一方面, 填埋气体的产生速率相应地有所增大[图2(a)], 有相当一部分有机物转化为填埋气体转入气相.

在回灌初期, R1出水BOD<sub>5</sub>/COD比值平均为0.67, 而在29周之后, R1柱出水BOD<sub>5</sub>/COD比值陡然降至0.21~0.03[图4(b)]; 相应地, R1柱出水总有机酸中乙酸所占的比例(乙酸/VFA)也在产气量比较集中的35~40周之间从83.5%陡然下降至11.3%[图5(b)]. 这说明渗滤液中大部分易降解的有机物已被水解、乙酸化、继而转化为填埋气体释放. 但由于40周之后进水COD等负荷的较大波动以及反应器温度的降低, 垃圾产气活动也受到了影

响. 如进水 COD 浓度从 8 390 mg/L (42 周) 降至 1 590 mg/L (43 周) 时, R1 柱的气体产率则从  $208.9 \text{ L} \cdot (\text{t} \cdot \text{周})^{-1}$  下降至  $35.6 \text{ L} \cdot (\text{t} \cdot \text{周})^{-1}$ .

因而, 以较大有机负荷的渗滤液回灌至水解、产酸垃圾层, 可以显著加速垃圾产气进程, 但按照 5.3%~2.7% 的比例, 回灌效果相差不大. 而在集中产气阶段, 垃圾产气速率与进水 COD (或 BOD、VFA、TOC) 等有机负荷存在正相关关系, 即使在较高的负荷下, 以乙酸为主的中间产物也可以及时地转化为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  等填埋气体, 并没有出现有机酸的长时间累积, 出水 pH 值也稳定在 6.4 左右 (图 7). 因此, 在垃圾产气旺盛阶段, 可以适当增大渗滤液回灌的有机负荷.

### 2.3 垃圾稳定化进程与产气效能的分析

为了防止实验柱厌氧状态被破坏, 目前尚未对柱中垃圾进行采样分析, 柱中垃圾体稳定化程度主要从渗滤液污染强度、填埋气体产生量和实验系统的物料衡算得出. 例如, 伴随垃圾产气活动的增强,

R1 柱的出流渗滤液浓度最早实现稳定的降低. 以各柱 COD 的减半时间 (half life, 可以作为垃圾稳定化速率的指示参数之一<sup>[11]</sup>) 为例, R1~R4 柱分别为 14、16、22 和 28 周.

此外, 将单个实验柱作为一个封闭系统, 流入这个系统的有机组分来自回灌的渗滤液, 流出这个系统的为出流渗滤液和填埋气体. 虽然流入流出的有机物组成不相同, 但可以 TOC 或 COD 当作等价物进行对比, 流出系统的有机物越多, 留在系统内部的可降解物质越少, 稳定化进程也就越彻底. 其中, 填埋气体可按照 1 kg COD 产生 350 L 甲烷和 350 L 二氧化碳 (标准状况下的干燥气体) 进行估算<sup>[16]</sup>. 当回灌至第 50 周时, 各柱 TOC 和 COD 的净释放量如图 8 所示. 从中可见, R1 柱的 TOC 和 COD 释放量最大, 剩余的产甲烷潜能最低, 其垃圾的稳定性最大; R2 柱次之, R3 和控制柱 R4 的稳定化速率最低, 且二者相当. 这说明, 以 5.3% 左右的回灌比例, 可以实现较快速的垃圾稳定化.

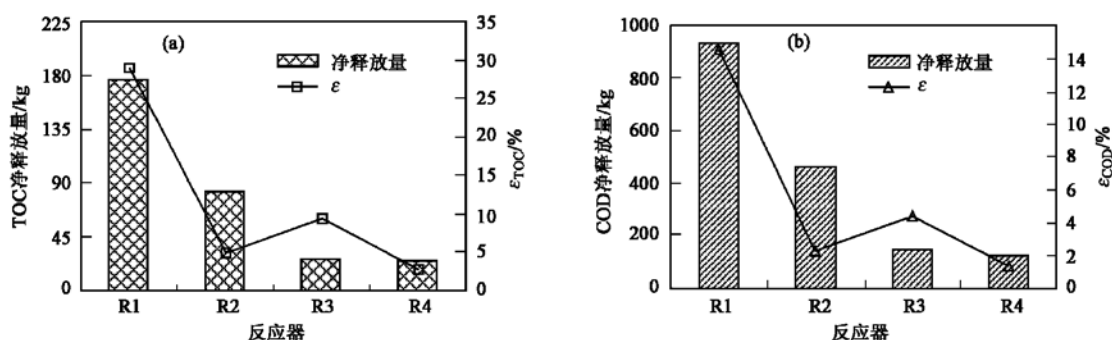


图 8 各柱 TOC 和 COD 净释放量及其累积气相转化率 (第 50 周)

Fig. 8 Net amounts and gaseous mass percents of TOC & COD released by the 50th week

但在垃圾水解、产酸阶段, 垃圾稳定化的主要机制是大量有机物质转入液相随系统出水流失; 而在垃圾产甲烷阶段, 高有机负荷的渗滤液回灌至填埋场, 可以大大提高垃圾产气效率和产甲烷潜能 (来自回灌的部分有机物也构成产气潜能的一部分), 此时填埋气体的产生才成为垃圾稳定化的主要原因. 由此, 可以对 Marticorena 等人<sup>[17]</sup>提出的产甲烷经验模型进行修正, 结果如下.

$$D = \frac{MP_0}{d} \exp\left[-\frac{t}{d}\right] + k \cdot (c_R - c_0) \cdot q \quad (1)$$

$$F = \sum_i \left[ T_i \left[ \frac{MP_0}{d} \exp\left[-\frac{t}{d}\right] \right]_i + k \cdot (c_R - c_0) \cdot Q_i \right] \quad (2)$$

式中,  $D$  为某一层垃圾的特定年甲烷产率,

$\text{m}^3 \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ ;  $t$  为时间, a;  $d$  为垃圾生命持续时间, a;  $MP_0$  为新鲜垃圾的特定产甲烷潜能,  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $k$  为回灌渗滤液中单位质量 COD 的产气系数,  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $c_R$  为回灌渗滤液 COD 浓度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c_0$  为出流渗滤液 COD 浓度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $q$  为单位体积垃圾回灌量,  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $F$  为整个垃圾场的甲烷产率,  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $T_i$  为第  $i$  层中废物质量, kg;  $Q_i$  为第  $i$  年内回灌总量,  $\text{m}^3$ .

比较有机碳的气相转化率, 即固、液相有机碳转化为气相碳的比率, 可以说明各柱垃圾产气的效率<sup>[18]</sup>. 截至第 50 周, R1 柱采用 5.4% 的回灌比例, 虽然初期有机物的流失总量大于 R2 柱, 但由于后期高负荷的渗滤液回灌促进了垃圾的产气活动, 使得 R1 的 TOC 和 COD 的累积气相转化率分别 (计

为  $\epsilon_{\text{TOC}}$  和  $\epsilon_{\text{COD}}$  达到了 28.96% 和 14.57% (见图 8), 并随产气量的增加保持增长趋势. 比较而言, R2 柱采用 2.7% 的回灌比例, TOC 净释放量中仅有 4.84% 转化为填埋气体, 相应的 COD 气相转化率只有 2.33%, 这一转化率甚至低于 R3 柱, 略高于控制柱 R4.

因此, 选择适当的回灌量、回灌时机和回灌方式, 能对填埋场的产气效率进行人为控制, 如在稳定的产甲烷阶段, 有机碳的气相转化率可以达到甚至超过 80%<sup>[18]</sup>, 这正是生物反应器填埋场的显著优势之一.

### 3 结论

(1) 实验柱 R1 采用较大渗滤液回灌量(相当于垃圾湿重的 5.3%)至新鲜垃圾层, 显著加速了填埋垃圾的水解、酸化和产气进程, 其产气滞后时间分别比 R2~R4 柱大约缩短了 7、10 和 12 周; 回灌至 50 周时, R1 柱的产气量和有机碳(TOC 或 COD)气相转化率均高于 R2~R4 柱.

(2) R2~R4 柱保持 2.7% 以下的回灌比例, 虽然能够使系统维持短期的较高温度, 且早期不会带走过多的有机质, 但最终不足以维持垃圾产气活动所需要的水分和微生物量.

(3) 为提高填埋垃圾的产气速率和产气潜能, 可以 5.3% 的比例回灌具有较高 pH 值的渗滤液, 有助于提高垃圾体对有机酸的缓冲能力; 当生物反应器进入产气阶段之后, 则宜采用高有机负荷的渗滤液(如处于产酸阶段的新鲜垃圾层回灌系统的出水)回灌至该反应器系统, 提高有机碳的气相转化率和产气量.

(4) 生物反应器填埋场内的温度变化是其内部生物化学反应状况的重要表征, 场区环境温度的降低和高强度的大气降雨, 容易造成系统温度和产气效率的不稳定, 系统回灌负荷应据此调整, 避免过高的水力冲击加剧系统的不稳定性.

#### 参考文献:

- [1] Warith M. Bioreactor landfills: experimental and field results [J]. *Waste Management*, 2002, **22**: 7~17.
- [2] Pohland F G. Sanitary Landfill Stabilization with Leachate Recycle and Residual Treatment [R]. U.S. EPA, Cincinnati, Ohio: EPA-600/2-75-043, 1975.
- [3] Reinhart D R, Al-Yousfi A B. The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics [J]. *Waste Management & Research*, 1996, **14** (4): 337~346.
- [4] 于晓华, 李国建, 何晶晶, 等. 生物反应器填埋技术及其应用 [J]. *环境保护*, 2003, (2): 24~26.
- [5] Reinhart D R. Full-scale experiences with leachate recirculation landfills: case studies [J]. *Waste Management & Research*, 1996, **14**: 347~365.
- [6] Yuen S T S. Bioreactor landfills: Do they work? [A]. In: *Geoenvironment 2001: 2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics* [C]. Australia: Newcastle, 2001. 28~30.
- [7] 唐家富, 李国建. 垃圾填埋场渗滤液回灌处理的影响因素研究 [J]. *环境卫生工程*, 1997, (1): 14~20.
- [8] 王琪, 董路, 李姐, 等. 填埋场加速稳定技术的研究 [J]. *中国环境科学*, 2000, **20**(5): 461~464.
- [9] 王君琴, 沈东升. 生物反应器填埋场的试验研究 [J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(11): 2077~2078.
- [10] Luo F, Chen W Z, Song F Z, *et al.* Comparison between controlled landfill reactor and conditioned landfill bioreactor [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, **16**(5): 874~880.
- [11] Chugh S, Clarke W, Pullammanappallil P, *et al.* Effect of recirculated leachate volume on MSW degradation [J]. *Waste Management & Research*, 1998, **16**(6): 564~573.
- [12] Sponza D T, Akgöç O N. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors [J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**: 2157~2165.
- [13] San I, Onay T T. Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, **B87**: 259~271.
- [14] 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.
- [15] Lay J J, Li Y Y, Noike T T. Mathematical model for methane production from landfill bioreactor [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, **124**(8): 730~736.
- [16] 聂永丰. 三废处理技术手册: 固体废物卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 657~658.
- [17] Marticorena B, Attal A, Camacho P, *et al.* Prediction rules for biogas valorization in municipal solid waste landfills [J]. *Water Science & Technology*, 1993, **27**(3): 235~241.
- [18] 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): 307~308.