

# 垃圾填埋场的甲烷释放及其减排

张相锋<sup>1</sup>, 肖学智<sup>2</sup>, 何毅<sup>3</sup>, 陈家军<sup>1</sup>, 杨志峰<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875;

2. 国家环境保护总局环境保护对外合作中心, 北京 100035; 3. 中国环境科学研究院大气环境研究所, 北京 100012)

**摘要:** 垃圾填埋场是重要的甲烷(CH<sub>4</sub>)释放源, 对全球气候变暖影响巨大。本文通过分析影响垃圾填埋气释放的主要因素, 提出了减少垃圾填埋场甲烷释放的技术措施, 并结合国情指出清洁发展机制是我国温室气体减排及垃圾填埋场环境卫生状况改善的良好契机。

**关键词:** 垃圾填埋场; 甲烷减排; 清洁发展机制

中图分类号: X705; S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1166(2006)01-0003-04

**CH<sub>4</sub> Emission and its Reduction from MSW Landfill / ZHANG Xiang-feng<sup>1</sup>, XIAO Xue-zhi<sup>2</sup>, HE Yi<sup>3</sup>, CHEN Jia-jun<sup>1</sup>, YANG Zhi-feng<sup>1</sup> / (1. Environment Stimulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 1000875, China; 2. Foreign Economic Cooperation Office, State Environmental Protection Administration, Beijing 100035, China; 3. Research Institute of Atmosphere, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)**

**Abstract:** The methane (CH<sub>4</sub>) emission from MSW landfill has effect on global warming. This paper analyses the main factors of landfill gas (LFG) generation, discusses the feasible technologies of landfill methane emission reduction, and points out that Clean Development Mechanism (CDM) is a good chance for China to reduce green house gas emission and improve the environmental conditions of landfill site.

**Key words:** MSW landfill; CH<sub>4</sub> emission reduction; Clean Development Mechanism

## 1 前言

自1750年工业革命以来, 人类活动排放的温室气体(如二氧化碳、甲烷等)不断增加所导致的全球变暖已成为世界关注的重大环境问题。分析冰芯资料表明, 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的含量在工业革命前为280 ppmV, 2000年为367 ppmV(增加了约31%); 甲烷(CH<sub>4</sub>)从工业革命前的0.6~0.8 ppmV增加到1992年的1.72 ppmV, 增加了大约145%<sup>[1]</sup>。如果没有减少温室气体排放的特殊政策措施, 到2100年全球表面平均温度将上升0.9~3.5℃<sup>[1]</sup>。为此, 联合国气候变化框架公约缔约方于1997年12月在京都召开了第三次大会(COP3), 并于会上通过了《京都议定书》, 规定发达国家同意在2008~2012年期间将温室气体的排放量在1990年排放水平上至少削减5.2%<sup>[2]</sup>。为实现议定书的减排约定, 《京都议定书》引

入了清洁发展机制(CDM)、排放贸易(ET)和联合履行(JI)三种机制, 允许发达国家以成本有效方式在全球减排温室气体: 如果一国的温室气体排放量低于条约规定的标准, 则可将剩余排放额度卖给完不成履约义务的国家, 以冲抵后者的减排义务。在所有的温室气体中, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>和CFCs构成了最主要的附加温室效应。CO<sub>2</sub>的附加温室效应最大, 但其在全球变暖中的贡献率逐渐降低; CFCs的贡献率虽然较高, 但蒙特利尔议定书已经要求在2006年以前全球禁止生产, 其附加温室效应将逐渐减弱和消失; 而CH<sub>4</sub>在近200年内呈加速上升态势, 预计到2030年大气中CH<sub>4</sub>浓度将达2.34 ppmV, 有可能成为温室效应的主要原因; 同时, CH<sub>4</sub>在大气中的寿命约为12年, 与控制其他温室气体相比, CH<sub>4</sub>的减排控制将起到立竿见影的效果<sup>[3]</sup>。

CH<sub>4</sub>的人类活动释放源主要是水稻田、反刍动

收稿日期: 2004-07-01

项目来源: 国家863高技术项目(2001AA644020)资助

作者简介: 张相锋(1973-), 男, 河南南阳人, 博士, 主要从事固体废物污染控制与资源化技术研究。电话: 13693203189, 010-86965913, E-mail:

zhangxf@bnu.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

物、垃圾堆填等。其中,垃圾填埋场是  $\text{CH}_4$  最大的人类活动释放源,垃圾填埋场内的有机物在厌氧微生物的作用下分解将产生含有大量  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的垃圾填埋气(Landfill gas, LFG),据估计全球每年垃圾填埋场释放的甲烷为  $10\sim 70 \text{ Tg}^{[4]}$  ( $1 \text{ Tg} = 10^9 \text{ g}$ )。

## 2 垃圾填埋场气体释放的影响因素

垃圾在进入填埋场后,将依次经历好氧分解、水解、产酸、产甲烷和最终的好氧稳定化(引文如此)共五个阶段,整个周期可达数十年甚至上百年<sup>[5]</sup>。随着垃圾的不断进场,填埋场内的存量垃圾处于不同的年龄和环境状态,使得 LFG 的准确预测十分困难。垃圾填埋气释放的主要影响因素有:

(1) 垃圾组分。微生物靠分解垃圾中的有机物繁殖,同时释放出 LFG。垃圾中可降解有机物的含量,以及可降解有机物中多糖、纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质、脂肪的构成比例,对填埋气的潜在最大产生量起着决定性的作用<sup>[6]</sup>。其中,易降解有机物含量越高,填埋场产气越快。

(2) 填埋场水分状况。水分是垃圾填埋场中废物降解的基本限制性因子<sup>[7]</sup>。填埋场水分状况取决于多种因素,如垃圾自身含水率、填埋区降雨、填埋层覆盖、场底防渗设施以及填埋工艺(如渗滤液回灌、压实作业)等。传统的填埋场倾向于把垃圾封闭起来,形成“干炸弹”,从而限制了 LFG 的释放速率。近来提出的生物反应器填埋技术通过填埋场水分管理加速填埋场产气,从而加速填埋场稳定化,减少后期的维护<sup>[8]</sup>。

(3) 垃圾温度。填埋垃圾的温度状况决定了填埋场内微生物群落的空间分布,从而决定了 LFG 产气速率的高低。影响填埋垃圾温度的主要因素有垃圾埋深、垃圾密度、周围环境温度、微生物活性、垃圾含水率等。最佳的厌氧微生物繁殖温度为  $30\sim 41 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温度降低  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,微生物产甲烷能力迅速下降<sup>[9]</sup>。

(4) pH 值。pH 值在  $6\sim 8$  之间时均可产生甲烷,微生物产甲烷的最佳 pH 值为  $(6.7\sim 7.5)^{[9]}$ ,接近中性条件。大部分填埋场初始 pH 呈酸性,随着水解酸化阶段的完成,在碳酸盐缓冲体系的作用下,产甲烷阶段的 pH 值保持在  $7\sim 8$  之间。

(5) 气象条件。气象条件对填埋气释放的影响主要表现在温度、大气压和降雨三方面<sup>[10]</sup>。寒冷的天气降低表层垃圾中的微生物活性,减少了 LFG 的释放。大气压的变化可能导致空气进入填埋场或者

填埋气从填埋场释放出去;空气的流动会加剧填埋气的对流及扩散效应。降雨向填埋场内补充水分,加速填埋场气产生,然而过大的降雨可能导致垃圾内孔隙减少从而阻碍填埋气的释放。在填埋场表层有土工膜(在填埋气回收工程中,为减少填埋气的泄漏,有的填埋场覆盖层设计中使用土工膜,如 HDPE 膜等)密封的条件下,气象条件对 LFG 产气的影响将大大降低。

(6) 垃圾年龄。在垃圾进入填埋场的初始阶段,垃圾处于填埋场表面,垃圾密度低,孔隙率大,废物与空气有一定接触;同时,好氧降解速度比厌氧快,所产生的 LFG 中二氧化碳含量高;随着填埋年龄增加,垃圾进入水解酸化阶段, LFG 产气量降低;待水解酸化完成后,垃圾进入产甲烷阶段,产气量增加,甲烷浓度逐渐升高,可达  $60\%$  以上;随着有机物的逐渐消耗,垃圾进入稳定化阶段,产气速率和甲烷浓度又开始下降,直至最后稳定<sup>[10]</sup>。

(7) 填埋场构造及环境地质条件。填埋场构造及环境地质条件影响垃圾填埋气的释放途径<sup>[5]</sup>。垃圾填埋气的释放途径可以向上释放,还可能向下或在地下横向运动。填埋场中的二氧化碳和甲烷可以通过对流和扩散释放到大气圈中。二氧化碳的密度是空气的  $1.5$  倍,甲烷的  $2.8$  倍,有向填埋场底部运动的趋势,最终可能在填埋场的底部聚集。LFG 通过填埋场周边可渗透地质介质的横向水平迁移,可使 LFG 迁移到高填埋场较远的地方才释放进入大气。

## 3 垃圾填埋场释放甲烷的减排技术

随着城市化进程的加快、人口的增加以及生活消费水平的稳步提高,我国城市生活垃圾产量每年以  $8\%\sim 10\%$  的比例递增。目前中国每年城市生活垃圾产生量在  $1.4$  亿吨左右,并以每年  $5\%\sim 8\%$  的速度增长<sup>[11]</sup>。垃圾填埋量的增加使甲烷释放量呈上升趋势,从而加剧温室效应。随着京都议定书于 2005 年 2 月 16 日的正式生效,垃圾填埋场温室气体减排技术正在成为国内外竞相研究开发的热点<sup>[2]</sup>:

(1) 收集 LFG 用于锅炉供热或并网发电。在垃圾填埋场产气活跃期, LFG 中  $\text{CH}_4$  含量高达  $50\%$  以上,是一种良好的可再生能源,利用 LFG 发电和供热是国际上应用最广泛的温室气体减排技术<sup>[12]</sup>。

(2) 作为管道气。采用有效的预处理手段,将垃圾填埋气中的  $\text{CH}_4$  浓度提高到  $95\%$ ,同时去除灰尘及酸性气体,可以制备性能卓越的管道气,作为城市

煤气的替代产品,从而控制垃圾场甲烷的无控释放<sup>[12]</sup>。

(3) 作为运输工具的动力燃料。全球环境基金(GEF)在我国鞍山市建设了垃圾填埋沼气制取汽车燃料的示范工程,其产品为净化垃圾填埋气压缩气(CLFG),可用作汽车燃料,开辟了垃圾填埋气利用的新途径<sup>[13]</sup>。

(4) 经火炬燃烧后排放。对于小型垃圾填埋场及封场多年的垃圾场,LFG利用没有经济可行性。鉴于CH<sub>4</sub>的GWP(Global Warming Potential,全球变暖潜势)是CO<sub>2</sub>的21倍,通过火炬燃烧将CH<sub>4</sub>转化为CO<sub>2</sub>可以大大降低LFG的温室气体排放强度<sup>[14]</sup>。

(5) 生物覆盖层。垃圾填埋气在通过填埋场表面覆盖层时,通过甲烷氧化微生物的作用下,可以将CH<sub>4</sub>氧化为CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>氧化率达12%~60%<sup>[15]</sup>。通过设计安装垃圾填埋场生物覆盖层,强化甲烷氧化微生物的活性,加快CH<sub>4</sub>的氧化速度,有望实现填埋场运营后期不适宜资源化的填埋气通过火炬焚烧达到低浓度CH<sub>4</sub>填埋气的减排。

(6) 可持续填埋技术。近年来在欧洲兴起的可持续填埋技术,在垃圾进入填埋场前进行好氧预处理,在进入填埋场后使其快速稳定化,实现填埋场的交替使用,同时减少垃圾填埋场的CH<sub>4</sub>释放<sup>[16]</sup>。

(7) 生物反应器填埋技术。生物反应器填埋是US EPA推荐的第三代垃圾填埋技术,该技术在填埋场内交替使用好氧/厌氧两种工况,通过控制填埋场内的温度和水分状况,加速填埋场的稳定化,提高LFG的产气速率和CH<sub>4</sub>浓度,改善LFG利用的经济价值,为减少垃圾填埋场温室气体减排创造便利条件<sup>[17]</sup>。

#### 4 垃圾填埋场甲烷减排的契机

2005年2月16日,《京都议定书》正式生效。作为一种有效的温室气体减排措施,清洁发展机制(CDM)项目及其相关的二氧化碳减排指标(CERs)交易已经成为国际社会所关注的焦点。CDM是指工业化国家的政府或企业,以资金和技术投入的方式,帮助发展中国家实施具有减少温室气体排放项目的一种合作机制。工业化国家通过CDM项目产生的CERs抵偿自己在公约中规定的减排份额,由此形成了一个年交易额高达140~650亿美元的国际温室气体贸易市场。CDM既可以帮助发达国家实现减排温室气体的承诺,又促进发展中国家的

可持续发展,是一种共赢的国际合作机制,《京都议定书》的生效为这一合作机制提供了法律基础。

我国开展垃圾填埋气回收利用的CDM项目能够利用国外资金和先进技术,提高我国垃圾填埋场管理水平,降低填埋场火灾和爆炸风险,控制填埋场有害气体释放,减少甲烷向大气的排放,提高周围居民的生活和健康水平,改善全球气候变化,促进区域的可持续发展。目前,我国的首个垃圾填埋气CDM项目(北京市安定生活垃圾卫生填埋场)已经获得了国家发展与改革委员会的审批,同时,世界银行、日本、荷兰、意大利等国家和金融机构均对我国的垃圾填埋气CDM项目表现出极大的兴趣。

#### 5 结 语

垃圾填埋场释放的CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>是最重要的温室气体,特别是CH<sub>4</sub>在未来仍将呈增长趋势。我国是世界上人口最多的国家,也是全球经济最活跃的国家之一。随着我国经济、人口的增长,垃圾填埋场释放的CH<sub>4</sub>将占越来越大的比重。在可以预见的将来,中国必将承担起温室气体减排的责任。开发适合中国国情的垃圾填埋场温室气体减排技术对于未来我国履行温室气体减排义务具有重大意义。

#### 参考文献:

- [1] El-Fadel M, Massoud M. Methane emissions from wastewater management. Environmental Pollution [J], 2001, 114: 177~185.
- [2] 于培伟.《京都议定书》生效蕴藏着重大的历史性机遇 [EB/OL]. [http://www.zj.xinhuanet.com/magazine/2005-06/02/content\\_4359658.htm](http://www.zj.xinhuanet.com/magazine/2005-06/02/content_4359658.htm).
- [3] 吴兑. 温室气体与温室效应[M]. 北京: 气象出版社 38~84, 2003.
- [4] Boeckx P, O. Van Cleemput, I Villaralvo. Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28: 1397~1405.
- [5] 聂永丰. 三废处理工程技术手册(固体废物卷) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000, 654~655.
- [6] Barlaz M A, Ham R K, Schaefer D M. Mass Balance Analysis of Anaerobically Decomposed Refuse [J]. Journal of Environmental Engineering, 1989, 115(6): 1088~1102.
- [7] Reinhart D R, B Al-Yousfi. The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics [J]. Waste Management & Research, 1996, 14: 337~346.

(下转第14页)

$\text{cm}^{-3}$ , 第二格  $4.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 第三格  $3.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。  
三格平均为  $4.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

#### 参考文献:

- [1] G Lettinga, J Field, J van Lier, G Zeeman, L W Hulshoff Pol. Advanced Anaerobic Wastewater Treatment in The Near Future[J]. Wat Sci Tech, 1997, 35(10): 5- 12.
- [2] A Bachmann, V L Beard, P L McCarty. Comparison of Fixed Film Reactors with a Modified Sludge Blanket Reactor[J]. Pollution Technology Review, 1983, (10): 384- 402.
- [3] A Bachmann, V L Beard, P L McCarty. Performance Characteristics of the Anaerobic Baffled Reactor[J]. Wat Res, 1985, 19(1): 99- 106.
- [4] 黄永恒, 王建龙, 文湘华, 钱易. 折流式厌氧反应器的工艺特性及其运用[J]. 中国给水排水, 1999, 15(7): 18- 20.

- [5] W P Barber, D C Stuckey, The Use of The Anaerobic Baffled Reactor(ABR) for Wastewater Treatment: A Review[J]. Wat Res, 1999, 33(7): 1559- 1578.
- [6] 沈耀良. 新型厌氧处理工艺—厌氧折流板反应器[J]. 重庆环境科学, 1994, 16(5): 36- 38.
- [7] 严月根, 钱易. 两相厌氧工艺的理论基础及实际应用[J]. 中国沼气, 1989, 7(4): 1- 6.
- [8] A Gubicki, D C Stuckey. Performance of the Anaerobic Baffled Reactor under Steady- State and Shock Loading Conditions[J]. Biotech. Bioeng, 1991, 37(4): 344- 355.
- [9] T Setiadi Husaini, A Djajadiningrat, Palm Oil Mill Effluent Treatment by Anaerobic Baffled Reactors: Recycle Effects and Biokinetic Parameters [J]. Wat Sci Tech, 1996, 34(11): 59- 66.
- [10] A Tilche, S M. Vieira. Discussion Report on Reactor Design of Anaerobic Filters and Sludge Bed Reactors[J]. Wat. Sci. Technol., 1991, 24(8): 193- 206.

(上接第5页)

- [8] Reinhart D R, Townsend T G. Landfill bioreactor design and operation[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, 1998. 61- 84.
- [9] McBean E A, F A Rovers, G J Farquhar. Solid Waste Landfill Engineering and Design[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 73- 80.
- [10] U S Army Corps of Engineers. Landfill Off-Gas Collection and Treatment Systems[R]. Washington: U S Army Corps of Engineers(ETL 1110- 1- 160). 1995, A- 19- A- 20.
- [11] 任勇, 田春秀, 李霞. 中国如何应对《京都议定书》[EB/OL]. <http://www.cenews.com.cn/news/2005-04-12/44761.php>.
- [12] US EPA. Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook[R]. US: EPA (430- B- 96- 0004). 1996, 5- 4- 5- 30.
- [13] 陈家军, 于艳新, 董晓光, 等. 垃圾填埋气(LFG)用作

车辆燃料资源化现状及发展前景[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(2): 14- 16.

- [14] Eden RE, Smith R. Guidance on best practice flaring of landfill gas in the UK[A]. Sardinia' 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium[C]. Cagliari, Italy, 1999. 499- 506.
- [15] Barlaz M A, Green R B, Chanton J P, et al. Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38: 4891- 4899.
- [16] Zach A, Humer M, Gomisek T, et al. An approach to a low-emission landfill[A]. Sardinia' 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium[C]. 1999, Cagliari, Italy, 301- 308.
- [17] 何若, 沈东升, 朱荫湄. 生物反应器填埋场处理生活垃圾的研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2004, 30(3): 252- 258.

(上接第8页)

- [6] Liu Y, et al. Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. Wat Res, 2003, 37: 661- 673.
- [7] 陆柱, 蔡兰坤. 水处理药剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [8] Yu H Q, et al. Enhanced sludge granulation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor by aluminum chloride [J]. Chemosphere, 2001, 44: 31- 36.
- [9] Yu H Q, et al. The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up [J]. Wat Res, 2001, 35(4):

1052- 1060.

- [10] 李克勤, 等. 水力作用对颗粒污泥形成的影响[J]. 中国沼气, 2003, 21(1): 12- 14.
- [11] Uyanik S, et al. The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part I: process performance [J]. Wat Res, 2002, 36: 933- 943.
- [12] El-Mamouni R, et al. Influence of synthetic and natural polymers on the anaerobic granulation process [J]. Wat Sci Tech, 1998, 38(8- 9): 341- 347.
- [13] 郭晓磊, 胡勇有. 低浓度污水厌氧污泥颗粒化促进技术研究[J]. 中国给水排水, 2002, 18(4): 19- 22.