

文章编号: 1000-7598 (2009) 06-1687-06

# 城市垃圾填埋场甲烷资源量与利用前景

魏 宁, 李小春, 王 燕, 谷志孟

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 垃圾填埋气的主要成分为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  等气体, 可严重污染大气、地下水和生态环境, 并对全球气候变暖产生一定的影响; 同时填埋气也是一种清洁可再生能源和资源, 回收和利用垃圾填埋气可实现环境、安全、能源、资源、经济多重效益。目前, 垃圾填埋气的利用主要为甲烷利用。本文介绍了填埋气中甲烷资源量的计算方法, 采用一阶动力模型对国内城市垃圾填埋气中的甲烷排放量进行了计算和预测, 获得了城市生活垃圾填埋气中甲烷的资源量的范围, 并分析了国内垃圾填埋气排放的特点和趋势以及国内外对填埋气利用的途径、方法及效果。结合清洁发展机制 (CDM) 项目和国情分析了垃圾填埋气的利用前景, 并提出了填埋气回收利用的主要问题和建议, 为国内城市生活垃圾填埋气的利用提供了有益参考。

**关 键 词:** 垃圾填埋气; 资源量; 温室效应; 甲烷利用

中图分类号: X 705

文献标识码: A

## Resources quantity and utilization prospect of methane in municipal solid waste landfills

WEI Ning, LI Xiao-chun, WANG Yan, GU Zhi-meng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Classical sanitary landfills release large amounts of hazardous and deleterious chemicals to nearby groundwater and air via landfill leachate and landfill gas (LFG). LFG which generated by municipal solid waste (MSW) in landfills brings much trouble to environmental pollution problem. LFG contains important greenhouse gases, such as methane ( $\text{CH}_4$ ), carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ); and LFG is a main environmental pollutant; landfill gas is also a clean renewable resource and energy; recovering and utilizing LFG can bring economics, environment safety, energy, and resources benefits. The utilization of LFG is concerned on the utilization of methane in LFG; then the calculation method of methane emission from landfills is introduced and interpreted briefly. The methane emission of China from landfills is calculated by first order decay method; the range of methane resources quantity in landfill gas is obtained. Based on clean development mechanism and the actual LFG utilization situation in China, utilization methods to address the emission of landfill gas are analyzed; the situation and the problem faced by LFG utilization in China are analyzed; and the advices and results are given. Those results and advices may be helpful to the recovery and utilization of landfill gas.

**Key words:** landfill gas; resources quantity; greenhouse effect; methane utilization

## 1 引 言

近年来我国城市生活垃圾产生量在 1.6 亿吨左右; 而且随着我国人口的增长、城市化和经济发展以及居民生活水平的不断提高, 这些垃圾的产量还在以 7%~9% 的速度逐年增长<sup>[3]</sup>。目前, 我国城市垃圾主要有填埋、堆肥、焚烧和综合利用几种处置方式, 其中以填埋法为主, 占 70% 左右。填埋法具有投资少、处理费用低、运行费用低、处理量大的特点, 对垃圾热值无特殊要求, 同时可回收填埋气,

因此, 在世界各国广泛采用<sup>[3]</sup>。掩盖填埋情况下垃圾中的有机物在填埋状态下将主要发生厌氧分解, 其气体成分主要为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  两种, 占 90% 以上, 单独就甲烷而论, 全球垃圾填埋处理释放的甲烷总量是世界第三的人为甲烷排放源<sup>[1, 4-6, 9]</sup>, 占全球甲烷排放量的 13%, 温室效应等效于 8.4 亿吨  $\text{CO}_2$ 。

垃圾填埋气散发恶臭, 具有毒性和致症作用, 严重污染了填埋场周边的大气环境和生态系统; 填埋气体中的易燃、易爆成分会引发填埋场的爆炸、自燃等安全问题; 同时垃圾填埋气也可作为一种清

收稿日期: 2008-05-04

第一作者简介: 魏宁, 1978 年生, 博士, 助理研究员。主要从事多孔介质渗流、 $\text{CO}_2$  地质封存研究。E-mail: nwei@whrsm.ac.cn

洁的可再生能源和资源。填埋气回收和利用可减少废气排放,节约资源、调整能源消费结构,获取资源、能源、CDM(Clean Development Mechanisms, 清洁发展机制)收入,为垃圾处理主体带来经济效益;填埋气利用可提供一种安全可靠的温室气体减排选择,对我国社会经济可持续发展和营造良好的国际环境具有重要意义;填埋气利用可改善垃圾处理实体的投资产出结构,实现垃圾处理主体自发化,并提供更多的就业机会;由此,垃圾填埋气的回收和利用可以获得经济、环保、能源、资源、安全、社会等多重效益。

## 2 城市垃圾填埋场甲烷排放现状

在目前条件下,垃圾填埋气中最具回收和利用价值的成分为甲烷。对填埋气体的利用需建立在甲烷利用基础上,而对甲烷的利用则需要建立在垃圾成分分析和垃圾填埋气体的排放量分析基础上。

### 2.1 垃圾填埋气甲烷排放量的方法学

目前计算垃圾填埋气中甲烷含量的方法学有很多,主要有:统计学模型、动力学模型、经验模型等计算方法<sup>[1-13]</sup>。本文采用2006年IPCC报告推荐方法学中的一阶衰减法(First Order Decay Model)进行计算。该模型考虑填埋垃圾的产甲烷速率与填埋时间相关,垃圾在填埋一段时间后产气速率最大而后随时间的增加而衰减。模型参数可以根据填埋场的管理方式和垃圾的类型选择适合的推

荐值或实际测量值(方法学参见 <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>),计算公式为

$$E_{\text{CH}_4 \text{ gen}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k \text{MSW}_i \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \times 16/12 \times \text{Fe}^{-k(t-\Delta)} \quad (1)$$

$$E_{\text{CH}_4} = E_{\text{CH}_4 \text{ gen}} \times (1-R)(1-OX) \quad (2)$$

式中:  $E_{\text{CH}_4 \text{ gen}}$  为填埋气中的甲烷产生量;  $E_{\text{CH}_4}$  为垃圾填埋气中的甲烷排放量;  $\text{MSW}_i$  为第  $i$  时间进入固体废弃物处置场地的固体废弃物质量;  $k$  为垃圾降解速率常数,取值参见表1、表2;  $t$  为垃圾的填埋龄 ( $a$ );  $n$  为填埋场的运行年限 ( $a$ );  $i$  以月为单位递增,  $j$  以月为单位递增;  $\Delta$  为垃圾填埋后到开始产生甲烷的时间间隔,IPCC 推荐为6个月,  $\pm 2$  月误差。对于垃圾填埋气的计算需要计算垃圾中不同成分的产气速率,按照垃圾每年的比重进行累加,公式(1)、(2)就变为垃圾中不同成分的甲烷产生量,累加后获取总甲烷量。

表1 气候区域划分方法<sup>[1]</sup>  
Table 1 Divisions of climate zone

	多年平均温度 / °C	多年平均降雨量 / mm	降雨量/蒸发量
温带干燥区	0~20		<1
温带潮湿区	0~20		>1
热带干燥区	>20	<1 000	
热带潮湿区	>20	>1 000	

表2 不同气候区域的垃圾降解速率常数取值范围<sup>[1]</sup>  
Table 2 Wastes degradation rate in different climate zones

	温带干燥区	温带潮湿区	热带干燥区	热带潮湿区
厨渣 (food waste)	0.17~0.7	0.17~0.7	0.17~0.7	0.17~0.7
园林 (Garden)	0.15~0.2	0.15~0.2	0.15~0.2	0.15~0.2
纸张 (Paper)	0.06~0.085	0.06~0.085	0.06~0.085	0.06~0.085
木竹 (Wood and straw)	0.03~0.05	0.03~0.05	0.03~0.05	0.03~0.05
织物 (Textiles)	0.06~0.085	0.06~0.085	0.06~0.085	0.06~0.085
一次性尿布 (Disposable nappies)	0.15~0.2	0.15~0.2	0.15~0.2	0.15~0.2
淤泥 (Sewage sludge)	0.17~0.7	0.17~0.7	0.17~0.7	0.17~0.7

垃圾有一个累加的过程,若干年前的填埋垃圾对现在的填埋气有影响,具体计算过程可以离散后,考虑历史上的填埋垃圾的影响,计算出每一年的甲烷产生量(IPCC, 2006年):

$$\text{CH}_4 \text{ gen}(i) = q[a\text{DDOC}ma(i) - b\text{DDOC}md(i-1) + c\text{DDOC}md(i)] \quad (3)$$

式中:  $\text{CH}_4 \text{ gen}(i)$  为第  $i$  年甲烷产生量;  $\text{DDOC}ma(i)$

第  $i$  年开始时,无氧条件下可降解有机碳可分解总量;  $\text{DDOC}md(i)$  第  $i$  年,无氧条件下可降解有机碳可分解总量;  $q = F16/12$ ;  $a = 1 - e^{-k}$ ;  $b = 1/k(e^{-k(1-\Delta)} - e^{-k}) - \Delta e^{-k}$ ;  $c = 1 - \Delta - 1/ke^{-k(1-\Delta)}$ ,其中无氧条件下可分解的有机碳总量可采用以下公式进行计算:

$$\text{DDOC}_m = \text{MSW} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \quad (4)$$

式中:  $\text{DDOC}_m$  为无氧条件下可降解有机碳中的可

分解量； $MSW$  为填埋处理的废弃固体质量； $DOC$  为可降解有机碳含量； $DOC_f$  为无氧条件下降解的可降解有机碳比重； $MCF$  为甲烷修正系数，与储存场地覆盖和地下水状况相关，参数见文献[1]。

IPCC 报告指出：填埋气体甲烷影响因素都有一定的不确定性；不同的参数在同样的方法得到的填埋气甲烷排放量相差好多倍。为了减小不确定性，笔者将各个省份作为计算的基本单位，假定各个省份的气候条件、生活习惯都相同，全国填埋气甲烷资源量以省和直辖市为基本单位进行计算，以减小垃圾填埋气甲烷排放量的不确定性。

### 2.2 我国城市生活垃圾的成分

我国城市生活垃圾成分有区域和时间变化特征：随着国民经济发展、城市建成区面积增加、城市人口数量和城市数量增加、人民生活水平的提高，城市生活垃圾产生量和成分发生了很大变化；同时南方城市和大城市的有机物与可回收物含量高于北方城市和中小城市，而无机物含量则相反；有机物含量随时间基本上呈上升趋势，可燃物成分增加，热值有一定提高；无机物含量则呈下降趋势，但近年有机物和无机物含量均逐渐趋于平稳，变化不大<sup>[3,6]</sup>，成分变化见表 3。

表 3 我国城市的垃圾成分<sup>[3]</sup>  
Table 3 Compositions of municipal solid waste

城市数量	年份	湿基成分					其他			水分	
		厨渣	纸类	塑料	织物	木竹	金属	玻璃	砖瓦	其他	水份
57	~1990	27.54	2.02	0.68	0.7		0.54	0.78	67.76		40*
68	1991	59.86	2.85	2.77	1.43	2.10	0.95	1.60	25.03	3.41	41.06
72	1992	57.94	3.04	3.30	1.71	1.90	1.13	1.79	25.90	3.28	40.68
67	1993	54.25	3.58	3.78	1.71	1.83	1.08	1.69	27.76	4.32	41.61
75	1994	55.39	3.75	4.16	1.90	2.05	1.16	1.89	25.69	4.00	40.71
69	1995	55.78	3.56	4.62	1.98	2.58	1.22	1.91	23.71	4.64	39.05
82	1996	57.5	3.71	5.06	1.89	2.24	1.28	2.07	22.31	4.27	40.75
67	1999	49.17	6.72	10.73	2.10	2.84	1.03	3.00	21.58	3.26	48.15
73	2000	43.60	6.64	11.49	2.22	2.87	1.07	2.33	23.14	6.42	47.77

资料来源：《垃圾要分类、资源要利用——生活垃圾分类收集宣传资料》上海市废弃物管理处编辑 2000.9，\*为推断值

### 2.3 我国城市垃圾填埋气中甲烷总量

按照甲烷排放量计算方法对我国（除台湾、香港、澳门）的垃圾填埋气中的甲烷资源量进行了计算。我国城市垃圾清扫量数据（不包含台湾、香港、澳门资料）来源于中国国家统计局统计年鉴（1995~2007 年）（URL: <http://stats.gov.cn>），2008~2010 年的城市垃圾清运量增长率按每年 7% 的增长进行计算假定垃圾成分与 2007 年相同，预测 2010 年我国垃圾填埋气中甲烷的排放量。

图 1 为填埋气中甲烷排放量，图 2 为计算得到 2008 年部分省、直辖市的填埋气甲烷排放量，填埋气甲烷总排放量约为 50 亿  $m^3$ ，填埋气甲烷资源量巨大。

采用一阶动力模型考虑了历史上的生活垃圾对填埋气的贡献，获得比较好的排放数据，但模型面临计算参数不确定的问题；相对于 100~200  $m^3/t$  的甲烷气体的潜力，由于甲烷厌氧环境降解系数  $DOC_f$  和甲烷排放修正系数  $MCF$  的限制，以上计算中每吨生活垃圾只能产生 30~70  $m^3$  甲烷气体的排放量，约为产气潜力的 1/4，以上填埋气甲烷排放

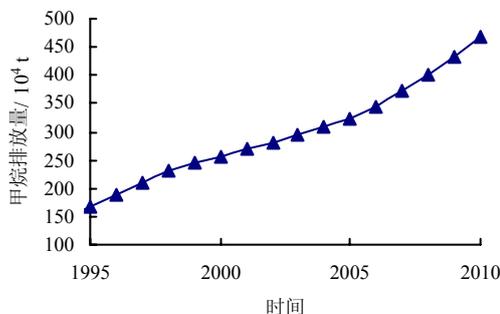


图 1 垃圾填埋气中甲烷释放变化曲线  
Fig.1 Curve of methane emission from landfill gas

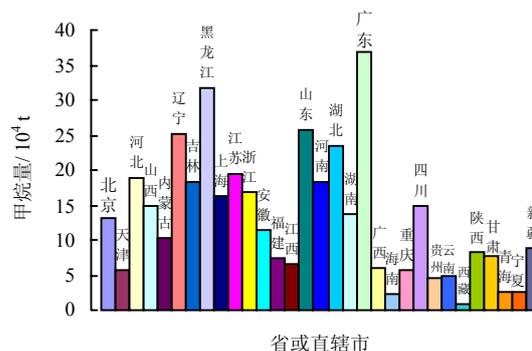


图 2 2008 年全国部分省及直辖市的填埋场甲烷排放情况  
Fig.2 Methane emission from landfills in China, 2008

量的估计相对我国每年垃圾填埋气甲烷的产生量是偏保守的，是基于目前垃圾处理领域的现状得出的结论。填埋气利用实现规模化后，垃圾分类管理措施、垃圾处置场的管理、垃圾成分、垃圾填埋气成气条件、渗滤液利用方式等因素的变化，垃圾填埋气的甲烷实际产生量会成倍增加。

### 3 垃圾填埋气利用的方式及问题

垃圾填埋气是一种清洁可再生能源，尤其在目前能源价格快速上涨和环境保护问题的双重影响下，部分国家对于这部分能源的开发给予政策和经济上的支持和优惠，使得填埋气利用已成为技术成熟、商业化运作，具有显著社会、环境和经济效益的项目。与国外相比，我国差距较大，不仅仅是开

发主体、资金、社会意识问题，更重要的是政策和利用技术开发不足<sup>[8, 14-17]</sup>。

#### 3.1 垃圾填埋气的利用方式

填埋气的利用方式有：通过燃气发电机转换成电能；煤气联合发电；直接用作锅炉、窑炉等的加热燃料；净化后与城市天然气/煤气混合作民用燃料；净化和压缩后作为汽车燃料；作化工材料、燃料电池；生物柴油等利用方式<sup>[14-18]</sup>。总之，在回收利用填埋气甲烷的同时，降低填埋气其他成分污染，即通过填埋气中甲烷成分的利用过程中实现垃圾填埋气的综合减排和利用（见表4）。目前，填埋气发电和工业民用燃料利用是国际上最广泛的利用方式，燃烧一般作为辅助手段处理多余的填埋气（见图3）。其利用模式主要以中小规模利用为主。

表4 垃圾填埋气的利用方式  
Table 4 Utilizations of methane in landfill gas

利用方式	国外利用情况	我国的情况	经济性
进入供气管网或者压缩天然气	填埋气进行分离后，高浓度甲烷气体输入天然气或煤气管网，获利丰厚。为非常重要的利用方式。	我国应用较少，有待扶持政策和公众态度的转变，同时天然气/煤气管网建设不足。靠近供气管网和用户的区域可以优先考虑；或者采用 CNG 或 LNG（高压或液化气）使用。	对气体分离要求较高；随供气管网完善，利用环境改善，该利用方式的经济性会显著提高。
发电	大多数的填埋气采用发电利用方式，结合热电联供、余热利用等方式，能源利用率高。	相关的沼气发电设备、甲烷发电设备、填埋气预处理设备、输电设备已经成熟，可全部国产化，面临的主要问题是电力入网和技术集成整合。	火电入网电价约 0.3 元/度，发电可获约 ¥0.5 元/m <sup>3</sup> ，财政补贴 0.25 元/度；经济性非常好。
供热/制冷	发电余热利用，采用 CHP（供热发电联合）或者单独供热。国外有应用于气制冷工程。	北方地区冬天供热，需求较多；全国夏季需要冷气，市场潜力大；国内有天然气制冷项目，但未见填埋气应用。	发电供热联合经济效果会更好，需要有较大规模的终端用户群。
其他能源	填埋气作为汽车燃料，二次能源方面，国外利用甲烷生产电池，无规模效应，经济性较差。	国内已经有利用填埋气作为汽车能源的应用，鞍山等城市有应用；燃料电池未见报道。	无规模效应，经济性一般。
燃烧放空	它是一种温室气体减排的低成本、有效的手段，作为燃烧供热或发电利用的辅助手段。	作为工业能源和热源利用，国内有填埋气空烧的现象，浪费了宝贵资源。	一般作为处理多余填埋气的辅助手段，与热电厂和供热系统联合，将会有较大收益。
化工产品	国外有少量的化工利用项目，经济性较差	国内有应用，生产 CO <sub>2</sub> 、炭黑、化肥、石膏、甲醇、甲醛等产品，经济性较差。	需要进行经济评价
清洁发展机制	全世界有 72 项注册的 LFG 利用的 CDM 项目	2008 年 4 月止，国内已有 8 个 LFG 利用项目通过注册，还有大量的项目在设计阶段。	CDM 额外收入约 ¥0.5 元/m <sup>3</sup> （价格 \$10/tCO <sub>2</sub> e）

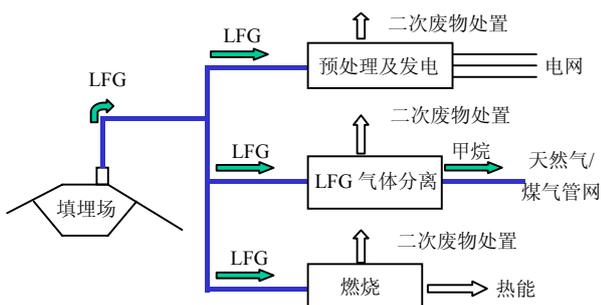


图3 填埋气主要利用方式示意图  
Fig.3 Sketch map of landfill gas utilization

填埋气回收和利用方式应该因地制宜，区别对待，依其技术的可靠性、经济的可承受性及所能达到的减量化、资源化、无害化效果予以确定。目前就国内纯填埋气回收和利用项目而言，无法获取利润或者利润极低，填埋气的处理主体无法获利，若没有其他的激励措施，填埋气的利用项目很难进展。近年来，国家激励政策、全球碳交易市场和清洁发展机制的出现使得原本低利润和亏本的环境保护项目变得有利可获，为垃圾填埋气的利用项目带来了

转机。

### 3.2 填埋气利用 CDM 项目

清洁发展机制 (CDM) 是发达国家实现温室气体减排承诺提供的 3 种“灵活机制”之一, 核心内涵是: 发达国家通过提供资金和技术的方式, 与发展中国家合作, 在发展中国家实施具有温室气体减排效果的项目, 项目所产生的温室气体减排量用于发达国家履行京都议定书的承诺。同时为中国环境保护提供了一个契机, 使得原本无收益或者收益较低的环保项目变得有利可获, 为发展中国家的环保产业提供了一种出路。发展中国家在 CDM 项目实施过程中可获取收益、管理经验、产业结构调整 and 升级、改善环境、并走向可持续发展方向, 具有良好的经济、社会、技术、环境效益。

能源价格上涨、温室气体排放权交易市场的形成 (发展中国家通过 CDM 向发达国家销售 CO<sub>2</sub> 的减排额度而获取收益) 和国家对可再生资源、能源和环境保护方面的政策支持, 为填埋气开采和利用创造了前所未有的市场、经济、政策条件。截至 2009 年 3 月, 全球范围内已经有 83 个垃圾填埋气利用项目注册成为 CDM 项目, 我国也有 12 个填埋气回收和利用项目成为了 CDM 注册项目 (部分项目参见表 5, 项目详细情况和资料查询 URL: <http://cdm.unfccc.int/Projects/registered.html>)。清洁发展机制中已经验证的基线和监测方法学中有垃圾填埋气燃烧、供热、发电等利用方式 (验证的方法学有: AM0002、AM0003、AM0010、AM0011、ACM0001、ACM0008, 还有其他的填埋气减排方法学正在申请过程中, 相关的具体方法学详见 CDM 方法学 (URL: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/approved.html>) )。

表 5 在 CDM 执行理事会成功注册的垃圾填埋气利用 CDM 项目

Table 5 Validated LFG utilization projects in China

项目名称	注册时间 / 年-月-日	利用方式
济南垃圾填埋气发电项目	2007.05.13	LFG 发电
深圳下坪固体废弃物填埋场填埋气收集利用项目	2007.05.04	发电+燃烧
无锡桃花山垃圾填埋气发电项目	2007.04.09	发电
北京安定填埋场填埋气收集利用项目	2006.04.21	LFG 热处理渗滤液
南京天井洼垃圾填埋气发电项目	2005.12.18	发电
南京轿子山垃圾填埋气利用供热工程	2007.11.30	供热

填埋气利用+CDM+优惠政策使得填埋气利用的经济效益显著增加, 加快了填埋气利用的进程。

填埋气利用项目应根据各个垃圾填埋场地周边区域的市场、经济、政策条件, 采用不同的利用方式, 因地制宜, 合理利用。

### 3.3 填埋气利用还需解决的问题

目前我国垃圾填埋气的回收和利用还面临以下几个问题并建议如下:

(1) 我国填埋气利用缺乏填埋气回收和利用的经验。需要填埋气的产气量、产气速率和产气周期等方面的预测和控制技术, 优化填埋工艺, 提高场地的产气量和稳定性, 最大化利用填埋气资源和设备, 避免设备闲置或空转运行; 同时提高设备的技术水平及能源转化效率和联合利用效率, 相关技术的整合程度有待提高。

(2) 我国垃圾填埋场地理分布比较分散。填埋气利用比较适合于中小规模分散式的回收和利用项目, 分散式中小型项目更有经济潜力。

(3) 我国填埋气利用还没有形成相应的产业化基础和商业运作模式。需要借鉴国外的先进填埋气利用产业化经验和商业运作模式, 建立现代的填埋气利用产业和商业运作模式。

(4) 利用 CDM 项目可有效地处理垃圾场和填埋气污染问题, 但 CDM 申请程序比较繁琐。政府应建立技术、信息和咨询服务机构, 并帮助实施主体完成 CDM 项目申请, 目前, 填埋气利用主体正积极开展 CDM 项目申请。

(5) 国家和政府在垃圾填埋气利用上的优惠政策和优惠条件应有配套、可操作、稳定的实施细则和措施保证, 如: 收费政策、优惠贷款政策和为填埋气回收试点示范项目提供补贴; 同时建立相应的环保和碳税政策, 营造良好投资环境, 使潜在的投资商 (私营部门、国际发展银行以及融资商) 在支持填埋气能源项目的技术及政策框架中实现利润化运营。

## 4 结 语

(1) 本文阐述了垃圾填埋气的特点; 介绍了垃圾填埋气中甲烷排放量的计算方法及我国垃圾成分变化情况, 并采用一阶动力模型对填埋气中的甲烷排放量进行了计算, 获取了我国垃圾填埋气甲烷的资源总量。

(2) 分析了我国垃圾填埋气利用实现状况和利用方面的主要问题, 并提出相应的建议。结合国家相关政策和 CDM 项目, 我国垃圾填埋气的回收和利用在经济、政策、能源、资源、环保等方面是可行的, 且利用环境正在完善; 同时我国填埋气的资

源量是非常丰富的, 填埋气具有非常广阔的利用前景。

### 参 考 文 献

- [1] EGGLESTON H S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme[R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [2] GARDNER N, PROBERT S D. Forecasting landfill gas yields[J]. **Applied Energy**, 1993, (44): 131—163.
- [3] 杜吴鹏, 高庆先, 张恩琛, 等. 中国城市生活垃圾排放现状及成分分析[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(5): 85—90.  
DU Wu-peng, GAO Qing-xian, ZHANG En-chen, et al. The emission status and composition analysis of municipal solid waste in China[J]. **Research of Environmental Sciences**, 2006, 19(5): 85—90.
- [4] 赵玉杰, 王伟. 垃圾填埋场甲烷气的排放及减排措施[J]. *环境卫生工程*, 2004, 12(4): 217—219.  
ZHAO Yu-jie, WANG Wei. Emission of methane from landfill site and its mitigation measures[J]. **Environmental Sanitation Engineering**, 2004, 12(4): 217—219.
- [5] 高庆先, 杜吴鹏, 卢士庆, 等. 中国城市固体废物甲烷排放研究[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(6): 269—272.  
GAO Qing-xian, DU Wu-peng, LU Shi-qing, et al. Methane emission from municipal solid waste in China[J]. **Advances in Climate Change Research**, 2006, 2(6): 269—272.
- [6] 何德文, 金艳, 柴立元, 等. 国内大中城市生活垃圾产生量与成分的影响因素分析[J]. *环境卫生工程*, 2005, 13(4): 7—11.  
HE De-wen, JIN Yan, CHAI Li-yuan, et al. Influence factors investigate on output and component of municipal solid waste in China cities[J]. **Environmental Sanitation Engineering**, 2005, 13(4): 7—11.
- [7] 徐新华. 垃圾中甲烷产率计算及全国垃圾甲烷气资源估算[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(1): 89—93.
- [8] 龚利华. 垃圾处理中填埋气的回收利用中国资源综合利用[J]. *中国资源综合利用*, 2004, (7): 28—30.  
GONG Li-hua. Research on recycling and utilization of the gas from garbage buried ground[J]. **China Resources Comprehensive Utilization**, 2004, (7): 28—30.
- [9] EEA. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook-2005[EB/OL]. [S. l.]: European Environment Agency, 2005. <http://reports.eea.eu.int/EMEPCORINAIR4/en>.
- [10] GARDNER N, PROBERT S D. Gas emissions from landfills and their contributions to global warming[J]. **Applied Energy**, 1993, (44): 165—174.
- [11] HAM P K, BARLAZ M A. Measurement and prediction of landfill gas quality and quantity in sanitary landfilling[C]//Proceedings of Technology and Environmental Impact. London: Academic Press, 1989: 155—166.
- [12] EMCON. Methane generation and recovery from landfills[M]. Michigan: Ann Arbor Science, 1982: 25—58.
- [13] U.S. EPA. U.S. EPA's Compilation of Air Pollutant Emissions Factors[R/OL]. U.S. :United States Environmental Protection Agency, 1995. <http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42>.
- [14] 王进安, 杜巍, 刘学建, 等. 垃圾填埋场填埋气回收处理与利用[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(6): 86—89.  
WANG Jin-an, DU Wei, LIU Xue-jian, et al. Recovery and utilization of landfill gas from landfill site[J]. **Research of Environmental Sciences**, 2006, 19(6): 86—89.
- [15] 黄晓文, 吴三达. 填埋气体的综合利用[J]. *环境卫生工程*, 2006, 14(4): 9—11.  
HUANG Xiao-wen, WU San-da. Comprehensive utilization of landfill gas[J]. **Environmental Sanitation Engineering**, 2006, 14(4): 9—11.
- [16] 王敏, 王里奥, 刘莉. 垃圾填埋场的温室气体控制[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2001, 24(5): 142—144.  
WANG Min, WANG Li-ao, LIU Li. Greenhouse gas control for landfill[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2001, 24(5): 142—144.
- [17] BOVE R, LUNGHI P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies[J]. **Energy Conversion and Management**, 2006, (47): 1391—1401.
- [18] 姚海林, 吴文, 刘峻明, 等. 城市生活垃圾的消纳的处理方法及其利弊分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(10): 1756—1759.  
YAO Hai-lin, WU Wen, LIU Jun-ming, et al. On advantages and disadvantages of solid waste treatment technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(10): 1756—1759.