

中国城市生活垃圾填埋气甲烷产量评估

卜美东¹, 张 田^{2,3}

(1.中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193; 2.北京林业大学 林学院, 北京 100083; 3.中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 研究了国内城市生活垃圾清运量、填埋量、构成特点及变化趋势,采用联合国政府间气候变化委员会(IPCC)推荐的用于估算填埋气甲烷产量的IPCC缺省法,对2005~2009年中国城市生活垃圾填埋气甲烷产量进行了初步评估;目前我国年垃圾填埋气甲烷产量已超过50亿m³,可转化为电能200亿kWh左右,人口密度越大、经济越发达地区其填埋气产量越高,在地域上呈现由东到西递减趋势。开发填埋气回收利用工程,不仅能有效地控制温室气体甲烷的排放,而且通过净化后还可获得资源量可观的清洁能源,实现能源与环保的双赢。

关键词: 城市生活垃圾; 垃圾填埋气; 甲烷; 资源评估; 分布

中图分类号: TK6; X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2012)05-0089-06

Assessment of methane production from domestic waste landfill in China

BU Mei-dong¹, ZHANG Tian^{2,3}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2.College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the survey on quantity, characteristics and changing trend of municipal solid wastes, the methane emission from landfill in China from 2005 to 2009 is calculated by IPCC model in this paper. At present, the annual landfill methane gas production is beyond 5 billion cubic metres, which could produce about 20 TWh electricity powers, if fully used. The research indicated that densely populated and economically developed areas often with higher methane production, showing a decreasing trend from the east to west of China geographically. The potentials of alternative energy are very considerable in some regions. The landfill gas recycling projects can not only effectively reduce the greenhouse gas emissions, improve air quality, but also can yield substantial clean energy resources and economic benefits. And then realize the win-win of environmental protection and energy demand.

Keywords: municipal solid wastes; landfill gas; methane; resource assessment; distribution

0 引言

随着社会经济的发展,人口的增长以及生活水平的提高,中国城市生活垃圾产生量逐年增长,已成为制约我国城市化建设和可持续发展的一个

重要因素。据国家统计局资料显示,2009年全国垃圾清运量已超过1.5亿t,其中大部分(56.6%)采用卫生填埋方式^[1]。在垃圾填埋场的厌氧环境条件下,通过微生物厌氧降解,从而产生大量的垃圾

收稿日期:2011-08-19; 修回日期:2011-09-19。

作者简介:卜美东(1986-),男,安徽全椒人,硕士研究生,主要从事生物质能源资源评估研究工作。E-mail:bumeidong@yahoo.com.cn

填埋气(Landfill gas)^[2]。填埋气是一种可燃的、具有潜在危险性的混合性气体,主要为CH₄、CO₂以及一些微量的挥发性有机组分(VOC)。在垃圾填埋后不久即有气体产生,10年后产量达到峰值,一般可持续产气40a甚至更久^[3]。联合国政府间气候变化委员会(IPCC)估计甲烷的温室效应是CO₂的21倍^[4],如果任这些甲烷气体排入大气,将会造成严重的温室效应。美国环保署(U.S. EPA)2011年8月公布的《1999~2030年全球人为源非CO₂温室气体排放量》评估报告显示,2010年全球甲烷人为源排放量为3.22亿t,其中11.8%即0.38亿t来自于垃圾填埋气(图1)^[5]。同时,填埋

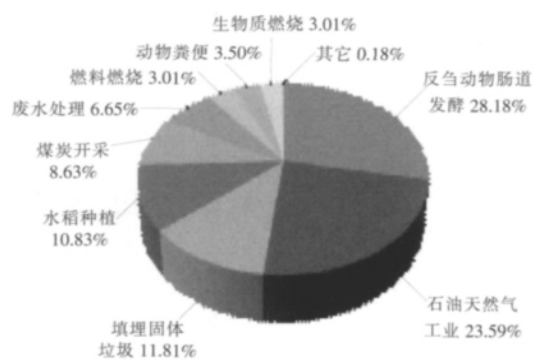


图1 全球人为源甲烷排放量构成图

Fig.1 The methane emission chart from human-related sources

气体的随意排放也是严重的浪费,填埋气可以被收集、转化并作为一种能源使用。对填埋气的利用不仅可以减少恶臭的产生和其他潜在威胁(易燃、易爆),而且阻止了甲烷向大气中的排放,具有显著的温室气体减排效果。目前填埋气的利用方式有发电、热电联产、替代燃料等,其中以发电为主。Willumsen 报告指出,到2001年全球共有955座垃圾填埋场回收填埋气,排在前3位的国家分别为美国、英国和德国^[6]。随着越来越多的人认识到这种“绿色”能源的经济价值和可行性,其他一些亚洲国家也逐渐开始开发垃圾填埋气,中国的多座城市也已经或准备建立填埋气发电厂。据初步统计,截至2010年底,我国已建成并投入使用的填埋气发电项目有35座,总装机容量超过80MW^[7]。垃圾填埋气作为一种非常规天然气,具有环保、经济、能源、资源、安全、社会等多重效益,已受到世界各国的广泛关注。

本文通过对统计年鉴数据和相关文献资料的查阅,估算了2005~2009年中国垃圾填埋气甲烷

排放总量、地区分布特点和现阶段利用情况。

1 中国城市生活垃圾概述

随着我国社会经济的发展、城市人口的增加和城市化进程的加快,城市垃圾产生量逐年增多。城市生活垃圾是指城市日常生活或为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律行政规定的视为城市生活垃圾的固体废物,包括居民生活垃圾、商业垃圾、集市贸易市场垃圾、街道清扫垃圾、公共场所垃圾和机关、学校、厂矿等单位的生活垃圾。

1.1 垃圾清运量和卫生填埋量

生活垃圾清运量是指收集和运送到各个生活垃圾处理厂(场)和生活垃圾最终消纳点的生活垃圾数量。我国生活垃圾的处理方式分为无害化处理和简易处理,无害化处理包括卫生填埋、堆肥和焚烧。图2显示了2005~2009年我国垃圾清运量、无害化处理量和填埋量变化趋势^[8]。

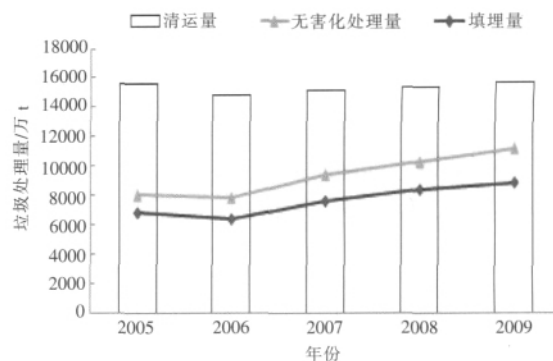


图2 2005~2009年中国城市生活垃圾清运量、无害化处理量和填埋量

Fig.2 Collection-transport, harmless treatment and landfill of MSWs in China from 2005 to 2009

2005~2009年,我国城市生活垃圾清运量在1.5亿~1.6亿t,无害化处理率由51.7%提高到71.4%。5年内填埋量增长了29.8%,2009年无害化处理中填埋率达79.2%。根据《城市生活垃圾处理及污染防治技术政策》,再加上填埋法投资少、处理运行费用低、处理量大、技术成熟等特点,在今后一段时间内填埋法仍会作为我国城市生活垃圾处理的主要方式和最终手段。

1.2 城市生活垃圾构成

城市生活垃圾的组分与城市燃料结构、生活水平 and 消费方式有密切的关系。不同城市(特别是南方与北方城市的差别较大),不同住宅区、不同

人群的生活垃圾组分也会不同。

从总体上看,我国城市垃圾的组分具有如下特点:垃圾水分较高,含水率一般在 30%~50%;有机物(菜叶、骨头等厨余)、包装物的比例较高,占干重的 50%以上;灰土含量较低,约占干重的 10%~20%,详见表 1^[9]。

表 1 我国大中城市垃圾成分(干重)构成

Table 1 Wastes (Dry weight) constitute of large and

medium-sized cities in China								%
成分	有机物	塑料	纸类	玻璃	织物	砖石	金属	其他
比例	60.02	9.51	8.11	2.89	1.94	12.74	0.87	3.92

由表 1 可见,我国城市生活垃圾中厨余有机物、纸类、织物约占 70%,含水率在 40%左右。有研究表明^[10],垃圾含水率在 40%~45%时,可保证细菌在填埋场内最大范围的分布,从而达到最佳生物产气量。

2 垃圾填埋气甲烷排放量估算方法

填埋气是在厌氧条件下微生物对垃圾中有机质成分降解产生的,其主要成分见表 2^[11],厌氧降解产生的甲烷气除去溶于渗滤液中及氧化损失的部分后,一般体积分数占到 50%左右。

表 2 垃圾填埋气组成

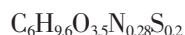
Table 2 The composition of landfill gas	
成分	平均浓度/%
甲烷 (CH ₄)	50
二氧化碳 (CO ₂)	45
氮气 (N ₂)	5
硫化氢 (H ₂ S)	<1
非甲烷有机质成分 (NMOC)	2 700×10 ⁻⁶

目前,关于填埋场甲烷产量估算方法有多种模型,大致可以分为动力学模型和统计模型两种。动力学模型可以很好地反映出固体废弃物随时间的降解过程,但需要的参数较为具体,需具体场地具体分析。对于全国范围的填埋气总量预测一般采用统计模型,主要有化学计量模型和 IPCC 模型。

2.1 化学计量模型

通过对城市生活垃圾进行原子分析,可推断出某些混合物质的分子结构式^[12]。

混合废弃食物和其他绿色废弃物分子结构:



混合废纸品分子结构: $C_6H_{9.6}O_{4.6}N_{0.036}S_{0.01}$

由上式可以看出, N 和 S 的含量非常少,

Themelis 认为,可以忽略 N 和 S,城市生活垃圾中混合有机物的分子式可简化为 $C_6H_{10}O_4$ ^[12]。厌氧降解的化学式如下:



从表 1 可知,城市生活垃圾中易降解混合有机物含量为 70%,含水率为 40%,按此计算每吨城市生活垃圾中含混合有机物 ($C_6H_{10}O_4$) 420 kg (2.88 kmol)。由方程(1)可得出每吨城市生活垃圾中有机物完全降解后可产出甲烷气 0.15 t 或 209.7 m³ (1 kmol CH₄ 体积为 22.4 m³)。

2.2 IPCC 缺省方法

1988 年联合国成立了政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,简称 IPCC),专门组织对全球温室气体排放清单进行及时调查,并对气候变化状况和影响进行评估。该模型最早由 Bingemer 和 Crutzen 于 1987 年提出^[13],IPCC 在其出版的《IPCC 国家温室气体清单指南(1995)》里将其确定为缺省方法学,后来在 IPCC《1996 年 IPCC 国家温室气体清单指南(修订本)》中对该缺省方法加以修改,给出了不同国家的 DOC 取值以及增加了 CH₄ 氧化因子。

IPCC 缺省方法是基于物质守恒定律最简单的填埋气产量预测方法,该模型没有考虑时间参数,而是假设垃圾填埋产气潜在在被填埋的那一年里全部释放出来。IPCC 缺省方法适宜于计算一个国家的填埋气产量,如果每年填埋垃圾量及垃圾组成稳定不变时,该模型能够提供一个较为合理的理论预测值。计算公式为

$$Q = MSW_T \cdot MSW_F \cdot MCF \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} \quad (2)$$

式中: Q 为甲烷产生量, t; MSW_T 为城市生活垃圾产量, t; MSW_F 为填埋垃圾占生活垃圾产量的百分比, %; MCF 为甲烷修正因子,取 1.0 (设定所有填埋场管理良好); DOC 为垃圾中可降解有机碳的含量, %, IPCC 推荐中国为 9.0%; DOC_F 为垃圾中可降解有机碳的分解百分率, IPCC 推荐值为 77.0%; F 为填埋气中甲烷含量 (取表 2 中值为 0.5); 16/12 为碳转化为甲烷的系数。

按照此式可推算出每吨填埋垃圾可产生甲烷气 0.046 2 t, 相当于标准状态下 60 m³ 的甲烷气。陈泽智也采用 IPCC 模型对填埋气中甲烷产量进行了预测,其产甲烷率为每吨垃圾可产甲烷气

0.077 t, 即 107.8 m^3 。陈泽智在 DOC 参数的选取上与本文有所出入, 其参考 DOC 值为 15%^[14], 而本文采用了 IPCC 设定的中国推荐值 9%, 更贴近我国实际情况。Nickolas J. Themelis 在对美国垃圾填埋气评估中采用的产气率仅为 $50 \text{ m}^3/\text{t}$, 估算过于保守^[15]。王伟采用 Marticorena 动力学模型对某城市生活垃圾样品 (60 g) 进行实验室测定, 得到垃圾产 CH_4 潜能为 $85 \text{ m}^3/\text{t}$ ^[16]。本文 2.1 中化学剂量模型是在有机物完全降解情形下的理论值, 但由于厌氧环境降解系数 DOC_F 和甲烷排放修正因子 MCF 的限制, 实际情况下每吨生活垃圾只能产生 $30\sim 70 \text{ m}^3$ 甲烷气^[17]。

综上所述, 本次评估采用 2.2 中 IPCC 缺省方法, 将城市生活垃圾的产甲烷率确定为 $60 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

3 结果与分析

3.1 甲烷产量

经计算得出, 2005~2009 年我国 (除台湾、香港、澳门) 垃圾填埋气甲烷资源量分别为 41.1, 38.4, 45.8, 50.5, 53.4 亿 m^3 (表 3)。除 2006 年比上一年略有下降, 总体呈增长趋势, 2009 年比 2005 年增长了 30%, 年增长率约为 6.8%。这种清洁能源的年产量是“十一五”期间煤层气年实际产量的 6 倍多^[18], 适当加以回收利用将带来巨大的经济效益。

表 3 2005~2009 年我国城市生活垃圾甲烷产量

Table 3 The methane production from landfills in China,

2005~2009

年份	垃圾清运量/万 t	垃圾填埋量/万 t	甲烷产量/万 m^3
2005	15 576.80	6 857.11	411 426.60
2006	14 841.30	6 408.20	384 492.00
2007	15 214.50	7 632.68	457 960.80
2008	15 437.70	8 424.01	505 440.60
2009	15 733.68	8 898.61	533 916.60

近年来, 我国沼气事业发展势头迅猛。据农业部统计, 截至 2010 年底, 全国户用沼气池已有 4 000 万户左右, 大中型沼气工程为 2.26 万处, 养殖小区和联户沼气工程为 1.99 万处, 年产沼气约 140 亿 m^3 。而填埋气作为垃圾填埋场的自然副产物, 无需专门建造厌氧发酵装置, 且每年垃圾填埋气中甲烷排放量就高达 50 多亿 m^3 , 换算成沼气后占我国户用沼气和沼气工程年产量的近 70%。另外, 2005~2009 年我国垃圾填埋气甲烷产量折天然气后占天然气生活消费量的比为 52.13%,

37.71%, 32.14%, 29.90% 和 30.25% (图 3), 即每年填埋气可替代我国 1/3 左右的天然气生活消费量。据统计资料显示^[19], 2009 年我国天然气净进口量也仅为 44.2 亿 m^3 , 填埋气基本可弥补该缺口。若按每 0.2 kgCH_4 可回收 1 kWh 的电计算, 则每年垃圾填埋气可产电能约 200 亿 kWh , 相当于 500 万用户一年的用电量。

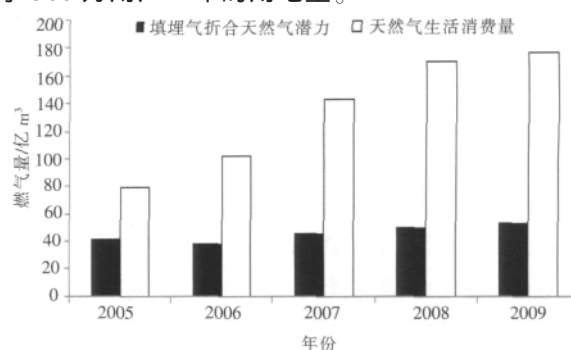


图 3 2005~2009 年中国天然气生活消费量及填埋气能源替代潜力

Fig.3 The Household consumption of natural gas and energy substitution potential of landfill gas of China from 2005 to 2009

若这些大量的甲烷气体直接流入大气, 其温室效应相当于每年排放超过 9 000 万 t 左右的 CO_2 。填埋气的排放如不能有效控制与回收, 还会引发各种爆炸事故, 近年来在我国已多次发生过此类事故。此外, 填埋气中除 CH_4 和 CO_2 以外的一些微量物质也会对人们的健康造成严重威胁。

无论是从能源回收利用角度还是从环境保护角度, 控制我国垃圾填埋气的排放已经到了刻不容缓的地步, 这也是实现我国城市生活垃圾资源化的一个重要途径。同时还可实施 CDM 交易机制, 该方法具有节能减排、经济性等多重功能, 应受到政府和民众的重视与支持。

注: 填埋气 (甲烷) 折天然气潜力采用等效热值法计算。甲烷低位热值取 $35\,822 \text{ kJ}/\text{m}^3$ ^[20], 天然气低位热值取 $35\,590 \text{ kJ}/\text{m}^3$ ^[21]。

3.2 地区分布

我国各地区垃圾填埋气产量主要取决于垃圾填埋量。由表 4 可看出, 人口多、经济较发达地区甲烷的排放量也相对较大。在全国范围内, 甲烷排放呈现东部地区最大, 中部地区次之, 西部地区最小的由东到西递减的趋势。2005~2009 年广东省、山东省、江苏省、北京市一直排在前几位, 青海省、海南省、宁夏回族自治区、西藏自治区产量显著低

于其他地区。

表 4 2005~2009 年中国各地区填埋气甲烷产量

Table 4 The methane production from landfill in China

	regions from 2005 to 2009				
	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
北京	24 426.0	28 098.0	32 104.8	35 930.4	32 884.8
天津	5 238.0	5 508.0	6 793.8	6 787.2	7 585.8
河北	13 983.0	13 884.0	16 674.6	18 160.8	20 917.8
山西	4 879.2	3 750.0	7 277.4	8 913.6	12 142.2
内蒙古	7 356.0	8 574.0	9 114.6	11 815.2	14 400.0
辽宁	19 614.0	20 940.0	23 970.6	26 385.6	27 027.0
吉林	13 014.0	5 070.0	12 027.6	10 044.0	9 933.0
黑龙江	20 392.2	14 676.0	13 275.0	13 725.0	15 403.8
上海	4 183.8	12 528.0	22 639.2	19 639.8	22 841.4
江苏	38 961.6	36 624.0	34 669.8	37 114.8	28 775.4
浙江	25 900.8	19 626.0	24 102.0	24 717.6	29 911.2
安徽	4 420.2	7 002.0	10 600.8	13 183.2	13 825.2
福建	12 897.6	7 464.0	10 051.8	11 713.2	13 731.6
江西	7 752.0	8 514.0	10 668.0	11 920.8	14 219.4
山东	34 322.4	40 524.0	39 776.4	39 952.8	43 316.4
河南	20 644.8	16 176.0	20 266.8	27 512.4	27 568.2
湖北	31 200.6	11 808.0	16 138.2	20 841.6	21 754.2
湖南	11 574.0	14 178.0	16 183.8	19 384.8	20 457.0
广东	39 741.0	38 736.0	44 136.0	47 223.6	51 632.4
广西	6 240.0	5 778.0	8 412.0	10 161.6	11 163.0
海南	3 099.0	2 952.0	3 000.0	3 112.2	3 218.4
重庆	6 234.6	6 084.0	6 661.8	9 000.0	10 354.2
四川	14 737.2	18 078.0	21 709.2	24 882.0	25 227.6
贵州	5 550.0	7 392.0	7 851.0	8 779.8	10 249.2
云南	9 561.6	4 518.0	11 586.6	13 016.4	10 477.8
西藏	0	876.0	876.0	0	0
陕西	8847.0	10 428.0	10 399.2	11 914.2	14 662.2
甘肃	3 078.0	3 102.0	4 104.0	5 083.2	5 119.8
青海	3 264.0	3 396.0	3 684.0	2 868.0	3 412.2
宁夏	2 912.4	3 234.0	3 458.4	3 243.0	1 773.0
新疆	7 401.6	4 968.0	5 747.4	8 413.8	9 932.4
合计	411 426.6	384 492.0	457 960.8	505 440.6	533 916.6

2009 年填埋气甲烷排放量超过 3 亿 m^3 的有广东、山东、北京 3 个地区;浙江、江苏、河南、辽宁、四川、上海、湖北、河北、湖南的产量为 2~3 亿 m^3 ;1~2 亿 m^3 的有黑龙江、陕西、内蒙古、江西、安徽、福建。各地区填埋气甲烷排放量与其垃圾填埋量成正相关。

将各地区填埋气甲烷排放量与其天然气实际消费量比较后发现,某些省份垃圾填埋气的能源潜力十分可观,折合天然气后个别地区能源替代潜力甚至占到了该地区当年天然气消费量的一半

以上。如 2009 年江西省占到了 55.47%, 广西省为 92.86%; 占到 20% 以上的还有湖南、云南、贵州 3 省(图 4)。填埋气作为一种新型清洁能源,其开发利用可在一定程度上弥补常规油气资源的不足,在我国,尤其是天然气紧缺地区无论是工业用气还是民用气都有广阔的市场前景。

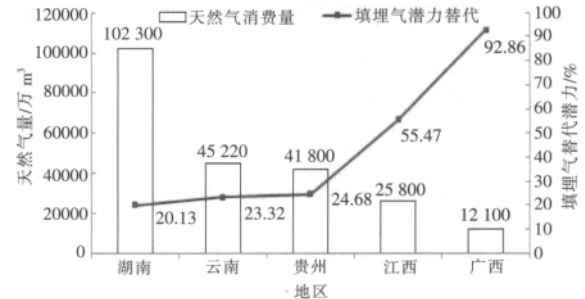


图 4 2009 年 5 省区天然气消费量与垃圾填埋气能源替代潜力

Fig.4 the Consumption of natural gas and the energy substitution potential of landfill gas in 5 Provinces 2009

注:5 省天然气消费量数据来源于《中国能源统计年鉴 2010》

4 利用现状

填埋气的利用方式主要有煤气联合发电,通过燃气发电机转换成电能;直接用作锅炉、窑炉等的加热燃料;净化后与城市天然气/煤气混合作为民用燃料;净化和压缩后作为汽车燃料;作化工材料、燃料电池^{[22]~[26]}。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,其利用模式主要以中小规模利用为主。

欧洲委员会的机构 EurObserv'ER 于 2010 年 11 月公布的“Biogas Barometer”报告显示,2009 年欧盟回收利用的填埋气相当于 300 万 t 标准油,发电量达 93.6 亿 kWh^[27]。英国填埋气占欧盟总产量的一半左右,发电量更是达到 49.5 亿 kWh,已成为英国可再生能源发电的重要组成部分。意大利、法国、德国、西班牙、荷兰也有大型垃圾填埋气发电项目在运行。美国现在有 558 座填埋场回收填埋气,其中 2/3 直接发电,总装机容量达 1 727 MW,另有 510 座填埋场被列为候选开发项目。目前我国填埋气回收利用还不普遍,据初步统计^[7],至 2010 年底在已有的 453 座垃圾卫生填埋场中,开展填埋气回收利用的仅有 35 座(不到 8%)。大量的填埋气直接流入大气,这部分潜力巨大的能源资源亟待开发利用。

5 结论

(1)对我国城市生活垃圾卫生填埋量进行分析研究,采用 IPCC 缺省法评估了 2005~2009 年中国垃圾填埋气甲烷总产量,分别为 41.1,38.4,45.8,50.5,53.4 亿 m^3 , 年增长率约为 6.8%。充分利用后,我国每年可替代生活用天然气消费量的 30%左右,在一定程度上弥补了我国天然气消费与生产的缺口。若全部用作发电,可年电能约 200 亿 kWh。

(2)各地区填埋气甲烷排放量与其垃圾填埋量成正相关,产量较大的省份基本为人口密度大、经济发达地区,如广东、山东、北京、浙江和江苏;青海、海南、宁夏、西藏地区的甲烷排放量显著低于其他地区。从地域分布上看,各地区甲烷排放量呈现由东到西递减的趋势。

(3)部分省份填埋气能源潜力十分可观,具备较大的开发价值。如 2009 年湖南、云南、贵州、江西、广西 5 省的垃圾填埋气能源潜力可替代上述地区当年天然气消费量的 20%以上,尤其是江西和广西,可分别替代 55.47%和 92.86%。

(4)目前填埋气的利用方式主要是转化为电能并入电网,全国垃圾填埋气发电项目总装机容量已超过 80 MW。但我国填埋气回收利用总体发展水平还不高,与欧美存在较大差距,大量填埋气毫无控制直排大气,不仅加剧了温室效应,更造成了能源资源的浪费。

由于各种因素,在今后的一段时间内填埋法仍然是我国垃圾无害化处理的主要方式,因此无论从环境保护角度,还是从能源回收利用角度考虑,控制填埋气的排放都迫在眉睫。国家需不断推进填埋气甲烷回收利用技术的研发,将其作为实现环保与能源双赢,可持续发展的一种重要手段。

参考文献:

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴 2010[M].北京:中国统计出版社,2010.
- [2] NASTEV M, THERRIEN R, LEFEBVRE R, *et al.* Gas production and migration in landfills and geological materials [J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2001, 52(1-4):187-211.
- [3] QIN W, EGOLFOPOULOS F N, TSOTSIS T T. Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation [J]. **Chemical Engineering**

Journal, 2001, 82(1-3):157-172.

- [4] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Emissions of greenhouse gases in the united states 2003, Comparison of global warming potentials from the IPCC's second and third assessment report.[EB/OL] <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrpt/global.html>, 2011-08-19.
- [5] U S EPA DRAFT. Global anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990-2030, EPA 430-D-003 [EB/OL]. http://www.epa.gov/climatechange/economics/downloads/EPA_NonCO2_Projections2011_draft.pdf, 2011-08-19.
- [6] WILLUMSEN H. Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide [EB/OL]. <http://www.lei.lt/Opet/pdf/Willumsen.pdf>, 2011-08-19.
- [7] 中国环境保护产业协会城市生活垃圾处理委员会.我国城市生活垃圾处理行业 2010 年发展综述[J].中国环保产业,2011(4):32-37.
- [8] 国家统计局.中国统计年鉴 2006~2009.[M].北京:中国统计出版社,2006-2009.
- [9] 李宇军.中国城市生活垃圾的现状与改进方向的探讨[A].首届中国环境社会学学术研讨会论文集[C].北京:中国社会科学院,2006.188-207.
- [10] 逢辰生.垃圾填埋气体的产生及其在国外的回收利用[J].北京节能,1996(4):42-45.
- [11] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, US DEPARTMENT OF ENERGY. Growth of the landfill gas industry [EB/OL]. <http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar/renewables/renewable.energy.annual/chap10.html>, 2011-08-19.
- [12] THEMELIS N J, KIM H Y. Material and energy balances in a large-scale aerobic bioconversion cell [J]. **Waste Management & Research**, 2002, 20(3):234-242.
- [13] BINGEMER H G, CRUTZEN P J. Production of methane from solid wastes [J]. **Journal of Geophysical Research**, 1987, 92(S2):2181-2187.
- [14] 陈泽智, 刘涛, 唐秋萍, 等.垃圾填埋气产量的估算与测试[J].太阳能学报, 2006, 27(3):255-258.
- [15] THEMELIS N J, ULLOA P A. Methane generation in landfills[J]. **Renewable Energy**, 2007, 32(7):1243-1257.
- [16] 王伟, 韩飞, 袁光钰, 等.垃圾填埋场气体产量的预测[J].中国沼气, 2001, 19(2):20-24.
- [17] 魏宁, 李晓春, 王燕, 等.城市垃圾填埋场甲烷资源量与利用前景[J].岩土力学, 2009, 30(6):1687-1692.
- [18] 胡向志, 王志荣, 张振伦.煤层气开发与“三软”矿区瓦斯抽采[M].郑州:黄河水利出版社, 2011.3-5.
- [19] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2010[M].

(下转第 99 页)

- 2011wunireport/, 2011-11-08.
- [2] 王睿坤, 刘建忠, 虞育杰, 等. 城市污泥特性及其干化技术[J]. 给水排水, 2010, 36(S1): 153-158.
 - [3] 丘锦荣, 吴启堂, 卫泽斌, 等. 城市污泥干燥研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 667-671.
 - [4] 郭淑琴, 孙孝然. 几种国外城市污水处理厂污泥干化技术及设备介绍[J]. 给水排水, 2004, 30(6): 34-37.
 - [5] 杨小文, 杜英豪. 国外污泥干化技术进展[J]. 给水排水, 2002, 28(2): 35-36.
 - [6] 朱南文, 徐华伟. 国外污泥热干燥技术[J]. 给水排水, 2002, 28(1): 16-19.
 - [7] 鲁瑞斌. 热干化技术在污泥处置中的工程应用[A]. 2010 污水处理厂污泥处理处置现场经验交流暨项目洽谈论文集(特刊)[C]. 郑州: 中国能源环境科技协会, 2010. 49-53.
 - [8] 于尔根·黑斯. 转盘式干燥机在污泥干化上的应用[A]. 2003 年污泥处理处置技术及装备会议[C]. 深圳: 中国土木工程学会, 2003. 357-365.
 - [9] 王璠, 柯尊忠, 田秀敏. 城市污泥干化技术研究[J]. 机电产品开发与创新, 2003, (2): 9-10.
 - [10] 王飞, 程刚, 蒋旭光, 等. 城市污泥干化和焚烧处理技术的研究[A]. 第二届中国绿色财富论坛暨科技创新与可持续发展研讨会论文集[C]. 玉溪: 中国环境科学学会, 2006. 148-160.
 - [11] BOYLES F. The vommi turbo dryer system. Seminar on the drying of sewage sludge[N]. Wakefield, 1993.
 - [12] 许洲. 上海石洞口污水厂污泥处置系统的调试[J]. 中国给水排水, 2005, 21(12): 98-99.
 - [13] 张健, 顾剑, 李童, 等. 清河污水处理厂流化床污泥干燥系统工艺的优化[J]. 给水排水, 2010, 36(12): 47-48.
 - [14] 马文. VOMM 涡轮干燥技术的特点[J]. 中国给水排水, 2002, 18(12): 44.
 - [15] ATEX95, Directive 94 /9 /EC of the European Parliament and the Council[S].
 - [16] ATEX137, Directive 1999/92 /EC of the European Parliament and of the Council[S].
 - [17] 王立彤, 陈君宏, 张春敏. 污水污泥干化工艺安全性的理论和实践[J]. 机械给排水, 2005(2): 32-36.
 - [18] 王峰, 刘建华, 乐国明, 等. 污泥干化焚烧工艺评估及设计要点 [A]. 2008 中国节能减排与资源综合利用论坛论文集 [C]. 上海: 中国资源综合利用协会, 2008. 115-121.
 - [19] 褚赞, 翁焕新, 章金骏, 等. 污泥干化过程中苯系物(BTEX)的释放及其致癌风险评价[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 777-785.

(上接第 88 页)

- cool climates [J]. **Plant, Cell and Environment**, 1995, 18(6): 641-650.
- [28] MUSTAFA ACAROGLU A, SEMI AKSOY. The cultivation and energy balance of *Miscanthus* $\times$ *Giganteus* production in Turkey [J]. **Biomass and Bioenergy**, 2005, 29(1): 42-48.
 - [29] HUISMAN W, VENTURE P, MOLENAAR J. Costs of supply chains of *Miscanthus* $\times$ *Giganteus* [J]. **Crops Prod**, 1997(6): 353-366.
 - [30] LEWNADOWSKI I, CLIFTON-BROWN J C, ANDERSON B, et al. Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes [J]. **Agronomy Journal**, 2003, 95(5): 1274-1280.
 - [31] CHRISTIAN D G, RICHEL A B, YATES N E. Nutrient requirement and cycling in energy crops[J]. **Sustainable agriculture for food, energy and industry**, 1997(2): 799-804.
 - [32] JORGENSEN U. Genotypic variation in dry matter accumulation and content of N, K and Cl in *Miscanthus* in Denmark [J]. **Biomass and Bioenergy**, 1997, 12 (3): 155-169.

(上接第 94 页)

- 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [20] 宋安东, 王风芹, 杜风光, 等. 可再生能源的微生物转化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 19-23.
 - [21] 温军英. 统一天然气热值的探讨 [J]. 煤气与热力, 2009, 29(2): 1-3.
 - [22] 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.
 - [23] 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.
 - [24] 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.
 - [25] 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]. 岩土力学与工程学报, 2003, 22(10): 1756-1759.
 - [26] BOVE R, LUNGHI P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies [J]. **Energy Conversion and Management**, 2006, 47 (11-12): 1391-1401.
 - [27] EUROSERVER. Biogas barometer 2010[EB/OL]. <http://www.euroserver.org/pdf/baro200b.pdf>, 2011-08-19.