

填埋场沼气发电的温室气体减排效益分析 *

阳 晶 马晓茜

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要 填埋场沼气是垃圾卫生填埋场产生的可利用资源。以深圳下坪垃圾填埋场为例, 定量分析垃圾填埋气体发电的温室气体减排效益。结果表明, 填埋场沼气发电具有很好的经济效益和环境效益, 可作为与发达国家进行 CDM (清洁发展机制) 项目合作的优先技术领域。

关键词 垃圾填埋气 沼气发电 基准线 减排效益

The benefit of landfill gas power generation to the reduction of the greenhouse gas emission Yang Jing, Ma Xiaoqian.
(College of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640)

Abstract: Landfill gas (LFG) is the usable resource generated from sanitary landfill for waste. This passage in the case of Shenzhen Xiaping Stuffing Garbage Spot, quantificationally analyzed the mitigation benefit of LFG power generation, the results indicate that LFG power generation has good economic and environment benefits, can become a prior technology for cooperation in CDM project with the developed countries.

Keywords: Landfill gas (LFG) LFG power generation Baseline Mitigation benefit

垃圾填埋气体 (LFG) 是在垃圾填埋场中垃圾所含的有机物被微生物厌氧消化、降解所生成的气体^[1]。据国外研究机构测算, 每吨垃圾在填埋场寿命期内约可产生 100 ~ 200 m³ 的 LFG。LFG 的主要成分为 CH₄ (约占 50 % ~ 60 %) 和 CO₂ (30 % ~ 40 %), 此外还有其他一些恶臭物质等。CH₄ 和 CO₂ 是主要的温室气体, CH₄ 的当量体积的温室效应潜在值是 CO₂ 的 21 倍。此外, 这些气体的释放对垃圾场周边环境也将造成不利影响, 且还存在燃爆的安全隐患。

另一方面, 在填埋气所含的各种组份中, CH₄ 含量约占 45 % ~ 60 %, 沼气热值约为 20 MJ/m³, 是一种利用价值较高的清洁燃料。对填埋气加以控制和利用, 已成为城市垃圾处理的组成部分和发展趋势。LFG 发电属于可再生能源发电技术, 具有双重的作用, 既减少了温室气体的排放, 又可创造可观的经济效益, 据美国环保署统计^[2], LFG 开发潜在能量可以满足美国 230 万家庭的需要, 使用 LFG 发电与常规能源发电相比每年可节省 128 762 美元。

根据京都议定书第 12 条中所确定的清洁发展机制 (CDM, Clean Development Mechanism), 由发达国家出资金和先进技术设备, 在发展中国家境内共同实施有助于缓解气候变化的减排项目, 由此获得经过公证的减排量, 作为其遵守《京都议定书》规定的量化限控和减排承诺的一部分贡献。在国

外, LFG 发电作为 CDM 项目已在巴西、南非等国家通过。我国是温室气体减排潜力较大的发展中国家之一, 开展 CDM 合作的市场前景广阔, 选择 LFG 发电作为与发达国家在 CDM 领域开展合作的潜在项目, 有广阔的技术推广应用前景, 目前我国有与荷兰合作的北京安定填埋场填埋气收集利用项目与南京天井洼垃圾填埋气发电项目已通过批准, 有较成熟的立项基础。

以下以深圳下坪垃圾卫生填埋场为例, 分析其 LFG 发电的碳减排量及减排成本, 为确定 LFG 发电作为 CDM 项目提供依据。

1 下坪垃圾填埋场 LFG 发电可行性分析

对 LFG 气量的预测, 有助于确定收集利用方式和收集利用装置的选择, 但要准确预测填埋气体逐年产气量及总产气量, 特别对占地较大且无有效覆盖的下坪垃圾填埋场更困难。因此无论是已有效覆盖或正在填埋阶段只能借助国外相关文献中的计算公式初估 LFG 量。

按 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Guidelines 1995 推荐的经验公式, 垃圾填埋场 CH₄ 排放的计算公式^[3] 如下:

$$E_{CH_4} = MSW \times \eta \times DOC \times r \times (16/12) \times 0.5 \quad (1)$$

第一作者: 阳 晶, 女, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为热能与动力工程。

* 广东省自然科学基金研究团队项目资助 (No. 003045)。

式中： E_{CH_4} 为垃圾填埋场的甲烷排放量；MSW 为城市垃圾量； η 为城市垃圾填埋率；DOC 为垃圾中可降解有机碳的含量，IPCC 推荐值发展中国家为 15%，发达国家为 22%，本文用 15%； r 为垃圾中可降解有机碳的分解百分率，IPCC 推荐为 77%（定为常数）。

按此公式计算 1 t 垃圾填埋产甲烷气的量为：

$$E_{CH_4} = 1 \times 100 \% \times 15 \% \times 77 \% \times (16 / 12) \times 0.5 = 0.077 \text{ t} \quad (2)$$

根据深圳市环卫部门提供有关资料，1998 年垃圾填埋量为 $60 \times 10^4 \text{ t}$ ，按照深圳市总体规划中人口增长率和人均垃圾量增长率推测，1998～2012 年的逐年垃圾填埋量见表 1^[4]。

表 1 逐年垃圾填埋量一览表

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
垃圾填埋量/($\times 10^4 \text{ t}$)	60	6 211	6 414	6 617	6 911	7 116	7 415	7 618
年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
垃圾填埋量/($\times 10^4 \text{ t}$)	7 916	8 215	8 514	8 815	9 117	8 510	9 814	

表 2 填埋场一期工程逐年产气量

填埋年限	年份	年产气量	小时产气量	年收集气量	小时收集气量
		/($\times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	/($\times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	/($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
第 1 年	1998	0	0	-	-
第 2 年	1999	1 320	0.150	-	-
第 3 年	2000	2 550	0.290	-	-
第 4 年	2001	3 690	0.421	738	842
第 5 年	2002	4 755	0.543	951	1 085
第 6 年	2003	5 760	0.657	1 152	1 315
第 7 年	2004	6 704	0.765	1 340	1 530
第 8 年	2005	7 604	0.868	1 520	1 730
第 9 年	2006	8 468	0.966	1 693	1 933
第 10 年	2007	9 310	1.062	1 862	2 125
第 11 年	2008	10 109	1.154	2 020	2 380
第 12 年	2009	10 890	1.243	2 178	2 486
第 13 年	2010	11 846	1.329	2 329	2 659
第 14 年	2011	12 081	1.379	2 416	2 758
第 15 年	2012	13 149	1.501	2 629	3 002
第 16 年	2013	13 844	1.580	2 768	3 160
第 17 年	2014	12 318	1.406	4 927	5 624
第 18 年	2015	10 936	1.248	4 374	4 993
第 19 年	2016	9 714	1.109	3 885	4 435
第 20 年	2017	9 580	1.085	3 803	4 341

根据式(2)，填埋场产 LFG 初估量详见表 2，表中 LFG 可收集率为：对填埋作业期间(2001～2013 年)取 20%，封场后取 40%^[4]。

基于深圳下坪垃圾填埋场的具体情况，发电是下坪垃圾填埋场 LFG 利用的首选方案。由表 2 可知产气量从 1999 年后逐年增长，产气的高峰期在 2013 年，其可收集的 LFG 为 $3\,000 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，随后产气量逐年减少，为此，发电设备也应逐年增加，到达高峰期后逐年减少发电设备。

2 温室气体减排经济效益分析

2.1 项目描述

项目目标：引进先进的 LFG 发电技术，在深圳下坪垃圾卫生填埋场建设一座 LFG 发电厂，实现垃圾的减量化、无害化和资源化，并作为中国可再生能源领域实施 CDM 机制的示范项目。

项目简介：深圳市下坪城市垃圾卫生填埋场 LFG 发电规划技术指标为：4 台 3.5 MW 燃气轮发电机，4 台 15 t/h 余热锅炉，4 台 2 MW 蒸气轮发电机，沼气站占面积 $84\,000 \text{ m}^2$ ，电厂建筑面积 $5\,000 \text{ m}^2$ 。其基本参数见表 3。

表 3 CDM 项目基本参数

主要参数	数值	主要参数	数值
年运行小时数/h	6 000	厂用电率/%	10
年发电量/($\text{万 kW} \cdot \text{h}$)	4 200	上网电量/($\text{万 kW} \cdot \text{h}$)	3 780
年初始投资/万元	152	年运行费/万元	56
年原料费/万元	-	贴现率/%	10
项目寿命/a	15	发电成本	0.375
		/($\text{元} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	

采用技术：LFG 发电厂生产流程包括填埋气体收集系统、气体处理系统、气体发电系统、送变电系统等 4 个部分，LFG 自垃圾填埋场收集系统收集后，经鼓风机加压，通过滤膜过滤除去大于 $5 \sim 10 \text{ nm}$ 的微粒，再经冷凝器、分离器去除其所含水分和

杂质,然后进入电网输出。采用 LFG 发电技术成熟,100 t 垃圾产生的 LFG 可发电 1 000 kW 左右。

2.2 基准线选取

该基准线是指温室气体的大气排放。该基准线方法学考虑到,为遵守有关规章或政府合同要求,或出于对安全或消除异味的考虑,由垃圾填埋场所产生的一部分甲烷将被收集和消除。

本项目基准线确定如下:替代考虑当地电源结构下发电所产生的温室气体排放量。当地的电源结构考虑两部分:自发电与外购电。对外购电考虑主要来源,自发电采用本地的电源结构。假设本地未来的电源结构与发电效率的变化是均匀的,因此取 CERs(Certified Emission Reductions,得到确认的减排量)获取时间期限的中点,根据未来的电源规划和发电效率来计算这部分基准线排放。确定减排效益所需的基准参数,见表 4。

表 4 基准线项目计算分析的主要参数

参数	当地电源结构
煤电	86.5%,302 亿 kW·h
油电	13.5%,47 亿 kW·h
发电煤耗	煤电:338 g/(kW·h) 油电:328 g/(kW·h)
发电成本	煤电:0.225 0 元/(kW·h) 油电:0.295 8 元/(kW·h)
发电平均成本	0.234 6 元/(kW·h)
发电用油	低位发热值:40.91 MJ/kg;含碳量:85%; 碳氧化率:98%
油电排放系数	0.163 kg/(kW·h)
发电用煤	低位发热值:24.49 MJ/kg;含碳量:65%; 碳氧化率:94%
煤电排放系数	0.303 kg/(kW·h)

2.3 成本有效性分析

评价沼气发电技术 CO₂ 的减排效益,主要目的之一是衡量其经济可行性。本文选取成本有效性分析方法对沼气发电技术减排温室气体的经济效益进行分析。成本有效性分析法^[5]是把减排温室气体而产生的社会、经济效益从价值量变成实物量,以温室气体减排量作为经济效益的目标,对所有能够实现这个温室气体减排量目标的对策方案进行成本分析,从中比较选择出成本最小的对策方案,其所用指标为减排增量成本。在此,将 LFG 发电 CDM 项目的 CO₂ 排放量设为零。

减排增量成本 C_i ,即表示相对于某个基准线技术的减排技术,当减少单位体积温室气体排放量时所增加的成本。其公式为:

$$C_i = (C_m - C_b) / (EM_b - EM_m) \tag{3}$$

式中: C_i 为 CDM 项目的减排增量成本,元/t; C_m 为 CDM 项目发电 1kW·h 电的总成本,元/(kW·h);

C_b 为基准线项目发 1 kW·h 电的总成本,元/(kW·h); EM_b 为基准线项目发 1 kW·h 电的 GHG 排放量,t/(kW·h); EM_m 为 CDM 项目发 1 kW·h 电的 GHG 排放量,t/(kW·h)。

某种发电技术的发电成本采用全寿命期平均发电成本,其公式为:

$$C_m = \frac{\sum_t [I_t + M_t + F_t] (1 + r)^{-t}}{\sum_t [G_t (1 + r)^{-t}]} \tag{4}$$

式中: C_m 为全寿命期平均发电成本; I_t 为 t 年的资本费用; M_t 为 t 年的运行和维修费用; F_t 为 t 年的燃料费用; G_t 为 t 年的发电量; r 为折现率。

2.4 减排增量成本计算

表 5 LFG 发电减排成本

名称	数值	单位
项目单位发电成本	0.375	元/(kW·h)
基准项目单位发电成本	0.234 6	元/(kW·h)
项目发电增量成本	0.140 4	元/(kW·h)
基准项目单位发电量平均碳排放量	0.285	kg/(kW·h)
项目单位碳减排成本	492.6	元/t
合成美元	59.5	美元/t

从表 5 可知,LFG 发电作为 CDM 项目,其单位碳减排成本约为 59.5 美元/t。与其他可再生能源发电项目比较,生物质气化发电项目:10~36 美元/t;垃圾焚烧发电项目:127.8~158.0 美元/t,风力发电项目:81~98 美元/t,太阳能热水器:287~402 美元/t,煤层气回收利用:95~207 美元/t^[6]。由此可见,LFG 发电作为 CDM 项目与其他可再生能源项目相比具有很好的竞争力。

3 温室气体减排环境效益分析

CO₂ 是主要的温室气体,其最大的危害是导致气候变暖,从而对人类和自然界产生不利的影响。确定 CO₂ 的污染损失是相当困难的,本文借鉴有关资料的内容,将 CO₂ 减排量作为一种特殊资源,假设有一个 CO₂ 的减排市场,以这个市场的均衡价格来评价减排 CO₂ 的环境效益的均衡价格利用 MIT 边际减排成本数据计算,为 208.5 元/t(以碳计)。

由于选取的可再生能源发电技术的 CO₂ 净排放量为 0,因此对 CO₂ 净减排量的计算,实际是确定以可再生能源替代火力发电的燃煤消耗量,进而得出燃煤的 CO₂ 排放量,其计算公式^[7]见式(5)。

该项目活动在给定年份“ y ”所实现的温室气体减排量(ER_y)是该年份实际消除掉或燃烧掉的甲烷气体数量($MD_{electricity,y}$)与无该项目情况下该年份应该消除或燃烧掉的甲烷数量($MD_{reg,y}$)之差(Reg 指按有关规章和政府合同所要求的),然后乘以甲烷

表 6 LFG发电项目的 CO₂ 减排效益

填埋年限	年发电量 /(万 kW · h · a ⁻¹)	EG _y /(t · a ⁻¹)	实际 CH ₄ 减排量 /(t · a ⁻¹)	合成 CO ₂ /(t · a ⁻¹)	总的减排量 /(t · a ⁻¹)	售 CERs 收入 /(万元 · a ⁻¹)
第 4 年	1 181	3 483	645	13 545	17 029	355
第 5 年	1 522	4 489	831	17 455	21 943	458
第 6 年	1 843	5 437	1 007	21 144	26 581	554
第 7 年	2 144	6 325	1 171	24 594	30 919	645
第 8 年	2 432	7 174	1 328	27 898	35 072	731
第 9 年	2 709	7 991	1 480	31 073	39 064	814
第 10 年	2 979	8 789	1 627	34 175	42 964	896
第 11 年	3 232	9 534	1 765	37 075	46 609	972
第 12 年	3 485	10 280	1 904	39 975	50 255	1 048
第 13 年	3 726	10 993	2 036	42 746	53 739	1 120
第 14 年	3 866	11 404	2 112	44 343	55 747	1 162
第 15 年	4 206	12 409	2 298	48 253	60 662	1 265
第 16 年	4 429	13 065	2 419	50 804	63 869	1 332
第 17 年	7 883	23 255	4 306	90 430	113 686	2 370
第 18 年	6 998	20 645	3 823	80 280	100 926	2 104
第 19 年	6 216	18 337	3 395	71 305	89 642	1 869
第 20 年	6 085	17 950	3 324	69 800	87 750	1 830
第 21 年	4 902	14 462	2 678	56 237	70 699	1 474
第 22 年	4 349	12 829	2 376	49 886	62 715	1 308
第 23 年	3 848	11 352	2 102	44 141	55 493	1 157
第 24 年	3 405	10 044	1 860	39 057	49 101	1 024
第 25 年	3 011	8 883	1 645	34 542	43 425	905
第 26 年	2 656	7 835	1 451	30 468	38 303	799
第 27 年	2 339	6 901	1 278	26 834	33 734	703
第 28 年	2 058	6 070	1 124	23 603	29 673	619
第 29 年	1 805	5 324	986	20 703	26 027	543
第 30 年	1 549	4 569	846	17 767	22 336	466
平均值	3 515	10 364	1 919	40 301	50 665	1 056

的全球变暖潜势批准值 ($GW P_{CH_4}$), 再加上该年份被替代的净电量 (EG_y) 乘其 CO₂ 排放强度 ($CEF_{electricity,y}$) (电网中被替代电量的排放因子应当由用于计算替代网电带来的减排量的方法学来确定)。

$$ER_y = (MD_{electricity,y} - MD_{reg,y} \times GW P_{CH_4} + EG_y \times CEF_{electricity,y} \tag{5}$$

式中: ER_y 的计量单位为吨 CO₂ 当量, $MD_{electricity,y}$ 和 $MD_{reg,y}$ 的计量单位为吨甲烷。第一承诺期甲烷全球变暖潜势批准值 ($GW P_{CH_4}$) 为 21 t CO₂ 当量每吨 CH₄。 EG_y 的计量单位为兆瓦小时, CO₂ 排放强度 $CEF_{electricity,y}$ 的计量单位为吨 CO₂ 当量每兆瓦小时。

当有关规章或政府合同要求中并不规定具体的 $MD_{reg,y}$ 量, 则引入一个调整因子“Adjustment Factor”(AF), 并根据项目的实情加以调整。

$$MD_{reg,y} = MD_{electricity,y} \times AF \tag{6}$$

本项目调整因子 (AF) 取 0.126, 按 1 m³ 沼气发电 1.6 kW · h, 计算数据如表 6 所示。

4 结 论

LFG 发电与当地电源结构下发电技术(以火力

发电为主) 相比, 虽其发电规模无法与火力发电相比, 但具有显著的 CO₂ 减排效益, 其碳减排成本为 59.5 美元/ t, 低于其他可再生能源发电技术单位发电成本(略高于生物质气化发电), 有很好的竞争力, LFG 发电可以作为同发达国家合作的 CDM 项目。

LFG 发电技术具有较好的环境效益, 装机容量为 7 MW 的 LFG 发电技术 CO₂ 减排量平均可达 50 665 t/a, 售 CERs 收入平均可达 1 056 万元/a。

参考文献

- Shin H C, Park J W, Kim H S. Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model. Energy Policy, 2005,33:1 261 ~ 1 270
- Goossens M A. Landfill gas power plants. Colorado USA: WREC, 1996.1 015 ~ 1 018
- 沈东升. 生活垃圾填埋生物处理技术. 北京: 化学工业出版社, 2003
- 阮建国. 深圳下坪垃圾卫生填埋场垃圾沼气收集与利用方式研究. 建筑热能通风空调, 2002,1:43 ~ 45
- 梁亚娟, 樊京春. 可再生能源发电技术温室气体减排效益分析. 可再生能源, 2004,1:23 ~ 25
- 胡秀莲, 姜克隽, 崔 成. 城市生活垃圾焚烧 CDM 项目案例分析. 中国能源, 2001,7:21 ~ 27
- UNFCCC. 经批准的垃圾填埋气项目的统一基准线方法学 ACM0001/ Version 1, Sectoral Scope: 13

责任编辑: 陈泽军 (修改稿收到日期: 2005-09-02)