

生活垃圾填埋气体产量的现场测试及 IPCC 推荐模型的校验

罗钰翔, 王伟, 高兴保

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 为了获得深圳市玉龙坑垃圾填埋场封场后填埋气体的实际产量, 采用改进的现场抽气方法分别测定了填埋场内 4 口抽气井抽气影响区域内填埋气体的产量, 计算获得其产甲烷速率分别为 14.67×10^{-5} 、 9.46×10^{-5} 、 9.55×10^{-5} 和 $4.28 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{h})$ 。据此计算出 2005 年玉龙坑垃圾填埋场的甲烷产率为 $322 \text{ m}^3/\text{h}$, 表明该填埋场填埋气体在经济性上已经失去了回收利用价值。采用此实测数据对 IPCC 推荐模型进行校验, 发现垃圾降解的半衰期是影响 IPCC 推荐模型预测准确性的关键参数。我国城市生活垃圾中可降解有机物以厨余垃圾为主, 分解周期较短, 垃圾降解的半衰期短于 IPCC 模型的推荐取值范围。为了准确预测填埋气体的产量, 需要在充分调查我国生活垃圾特性的基础上, 确定模型参数的合理取值, 提高 IPCC 推荐模型在我国的适用性。

关键词: 填埋气体; 抽气实验; 产甲烷速率; IPCC 推荐模型

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0253-3301(2009)11-3427-05

On-site Measurement of Landfill Gas Yield and Verification of IPCC Model

LUO Yu-xiang, WANG Wei, GAO Xing-bao

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to obtain the accurate yield of landfill gas in Yulongkeng Landfill, Shenzhen, improved pumping test was conducted. The methane production rates of the influence region were figured out as 14.67×10^{-5} , 9.46×10^{-5} , 9.55×10^{-5} , and $4.28 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{h})$, respectively. According to the methane production rate, the whole methane yield of Yulongkeng Landfill in 2005 was $322 \text{ m}^3/\text{h}$, which indicated that Yulongkeng Landfill had went into stationary phase and the recycle of landfill gas was not valuable. IPCC model was verified by the measured data. Degradation half life of the waste was the key parameter concerned to the prediction accuracy of IPCC model. In China, the degradable waste in municipal solid waste was mainly kitchen waste leading to a short degradation period, which caused the degradation half life was shorter than the proposed value in IPCC model. For the improvement in prediction accuracy of landfill gas yield, the model parameters should be adopted reasonably based on a full survey of waste characterization in China, which will boost the applicability of IPCC model.

Key words: landfill gas; pumping test; methane production rate; IPCC model

垃圾填埋场中的生活垃圾在相当长一段时间内进行着各种生化反应, 填埋气体会持续产生。填埋气体中含有 40%~60% 的 CH_4 和 30%~50% 的 CO_2 , 热值约为 $7\sim 22 \text{ MJ}/\text{m}^3$ ^[1,2]。 CH_4 和 CO_2 均为重要的温室气体, 其中 CH_4 具有易燃易爆的特性, 需特别重视爆炸和火灾隐患。填埋气体的回收利用可实现温室气体控制、资源回收利用、填埋场安全防护等多重目的^[3]。在填埋气体利用项目的可行性论证阶段, 填埋气体产量的预测通常采用 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 推荐模型^[4]。由于我国城市生活垃圾的特性与国外相比, 最大的差异在于垃圾中易降解有机物含量较多(厨余类), 中等易降解有机物(纸张、纸板类)含量较少^[5,6], 这些差异导致 IPCC 推荐模型的计算结果与中国填埋气体排放的实际值情况存在较大差异^[7]。本研究以深圳市玉龙坑垃圾填埋场为例, 通过现场

测试填埋气体的产量, 论证玉龙坑垃圾填埋场填埋气体回收利用工程的可行性, 并利用实测数据校验 IPCC 推荐模型, 讨论模型关键参数的合理选取。

1 材料与方法

1.1 玉龙坑垃圾填埋场概况

玉龙坑垃圾填埋场位于深圳市二线外侧, 罗湖、福田两区北缘山地泥岗村北玉龙坑内, 是白芒岭下的一个三面环山的小山凹。该填埋场自 1983 年开始使用, 主要填埋罗湖区、福田区的垃圾, 后经 6 次扩容, 至 1998 年停止填埋。场区占地约 10 万 m^2 , 总容量约 370 万 m^3 , 填埋垃圾总量约 340 万 t, 填埋垃圾

收稿日期: 2009-01-04; 修订日期: 2009-02-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAC06B05); 北京市科技计划项目(D08040600350803)

作者简介: 罗钰翔(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生物质废物污染控制与资源化利用, E-mail: h0yx03@mails.tsinghua.edu.cn

的典型组分如表 1 所示, 历年生活垃圾填埋量统计 如表 2 所示.

表 1 玉龙坑垃圾填埋场垃圾的典型组分

Table 1 Typical components of the waste in Yulongkeng Landfill

组分	纸类	织物	塑料橡胶	竹木	厨余	陶土	金属	玻璃	含水率
质量分数/%	8.5	3.57	10.73	5.19	47.16	21.0	1.32	2.53	46.6

表 2 玉龙坑垃圾填埋场历年垃圾填埋量

Table 2 Annual disposal amount of the waste in Yulongkeng Landfill

年份	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
填埋量 × 10 ⁴ /t	3.88	5.51	9.40	10.36	8.28	5.62	11.27	14.06	25.48	29.83	40.64	42.06	40.79	44.68	47.88

1.2 现场抽气实验

测定垃圾填埋场填埋气体产量通常采用抽气实验法^[8], 该方法主要针对处于填埋阶段的垃圾填埋场. 本研究的对象玉龙坑垃圾填埋场已停止填埋多年, 并且完成了封场和场地绿化工程. 厚达 2m 的覆盖层阻断了垃圾填埋体内产生的气体与外界空气的通路, 使得传统抽气实验法以空气混入为判据的要求难以达到, 因此, 本研究针对封场后垃圾填埋场填埋气体产量的测定对抽气试验法进行了改进.

在抽气过程中, 填埋体内气体以水平方向迁移为主^[9], 良好的封场条件使空气难以穿透覆盖层进入填埋体, 且只要抽气影响范围未达到填埋体边壁, 空气亦难以通过填埋体边壁进入抽气影响范围, 此时, 影响抽气实验结果准确性的主要因素是封场后积存于填埋体内部的填埋气体. 为保证抽气实验结果的可靠性, 需满足以下条件: ①抽气影响范围控制在填埋体边壁以内; ②排出填埋体内部积存的填埋气体. 在满足上述 2 项条件并保持抽气流量稳定、气体浓度稳定的抽气条件下, 根据物质守恒定律, 可认为抽出的气体量与抽气影响范围内产生的填埋气体量相等.

根据上述分析, 针对玉龙坑垃圾填埋场设计现场抽气实验如下.

(1) 预抽气 采用大流量抽气泵对玉龙坑填埋场全部抽气井进行长时间抽气. 在抽气过程中, 填埋体内积存的填埋气体量减少, 空气通过填埋体边壁渗入, 填埋体内固体和液体中吸附的 CO₂ 释放, 这些因素共同导致抽气泵出口处 CH₄ 的浓度逐渐下降. 持续抽气至抽气泵出口处 CH₄ 浓度降至长时间 (不低于 4 h) 保持稳定, 填埋场内部达到动态平衡, 可进行正式抽气实验.

(2) 选定抽气井 玉龙坑垃圾填埋场填埋气体收集管网系统如图 1 所示. 为有效将抽气影响范围

控制在填埋体边壁以内, 本研究采用单井抽气实验方法分别测定不同区域的填埋气体产量. 为使监测区域能够尽可能地布及全场, 同时考虑到现场抽气的可操作性, 选择 W06、W12、W14、W47 共 4 口井作为抽气井进行 4 组平行实验, 其余未抽气的井作为抽气实验过程的监测井, 考察抽气的影响范围.

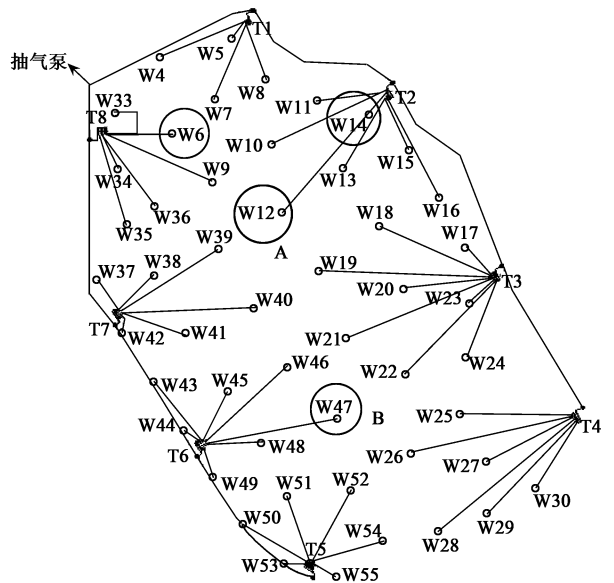


图 1 填埋气体收集系统管网布置

Fig. 1 Layout of landfill gas collection pipes

(3) 单井抽气实验 从步骤 (1) 全场抽气切换到单井抽气过程中, 垃圾产生的填埋气体将积存于填埋体内, 为进一步消除此部分积存气体的影响, 单井抽气实验首先采用 200 m³/h 左右的流量连续抽气 5 h 左右, 然后切换到 40 m³/h 的恒定流量抽气 6 h 左右, 记录以 40 m³/h 的恒定流量抽气过程中抽气泵出口处 CH₄ 浓度、抽气流量以及各监测井气压变化. 仅当 CH₄ 浓度与抽气流量保持稳定时, 监测数据有效. 为实现该抽气方案, 设计的抽气泵与管路的连接方式如图 2 所示.

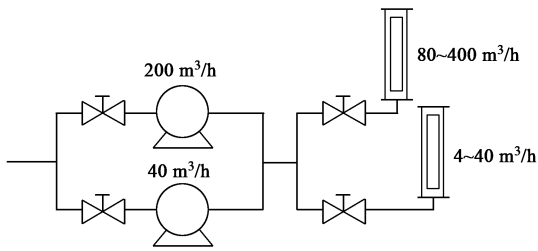


图 2 抽气实验管路连接示意

Fig. 2 Pipeline scheme of pumps and flow meters

(4) 确定抽气井的影响区域范围 抽气过程中, 抽气影响随着距离的增加而降低, 体现在监测井气压的变化上^[9]. 由于测量误差及其他不确定因素, 当抽气对气压的影响降低到一定程度以后, 就无法从气压的变化中判断是否到达影响边界^[10], 因此, 采用保守的计算方法, 将抽气影响的边界划定到距抽气井最近的、受抽气影响甚微的监测井处, 取不同方向上抽气影响距离的平均值作为抽气井的影响半径^[11, 12]. 在现场实验中, 首先监测不抽气时各监测井的气压随时间的变化情况, 作为基准情况. 然后监测抽气过程中各监测井的气压随时间的变化情况, 与基准情况进行比照, 确定抽气的影响边界. 由于测量误差以及环境因素的干扰, 不能保证抽气情况下的气压一定低于基准情况, 但如果受到抽气影响比较明显, 气压变化应表现出明显的差异, 反之, 气压

变化应表现出相同的趋势.

(5) 确定填埋气体产量 在步骤(3)的稳定抽气条件下, 抽气流量等于抽气井影响区域内填埋气体产量.

1.3 产气率计算

抽气影响距离的平均值作为抽气井的影响半径 r . 根据现场监测数据, 玉龙坑垃圾填埋场地下水水位较高, 所有井均贯穿至含水层, 因此无需考虑抽气井底部球冠状影响区域, 故按照圆柱体计算抽气井的影响空间范围, 设含水层以上垃圾填埋层高度为 h . 则影响区域总体积为 $V = \pi r^2 h$, 根据抽气流量 u 、甲烷含量 η 和垃圾密度 ρ 可计算出影响区域的平均产甲烷速率 v , 计算公式如式(1)所示.

$$v = u\eta / \rho V \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 抽气影响范围

抽气井连续抽气过程中气压变化和对应的基准情况如图 3 所示, W06、W12、W14、W47 等 4 口井进行抽气时, 位于影响边界的监测井气压变化情况如表 3 所示. 从井位图(图 1)上读出影响边界监测井到抽气井的距离, 取其平均值作为抽气的影响半径 r , 计算结果列于表 3.

表 3 抽气井影响边界和影响区域的产甲烷速率

Table 3 Influence sphere and relative methane production rate

抽气井	影响边界井	影响半径 /m	井深 /m	抽气流量 /m ³ ·h ⁻¹	CH ₄ 含量 /%	产甲烷速率 × 10 ⁻⁵ /m ³ ·(t·h) ⁻¹
W06	W35、W36、W10	50.09	25.5	39.5	57	14.67
W12	W09、W11、W42	62.04	28.4	40.0	62	9.46
W14	W09、W08、W16	71.33	18.7	40.0	54.5	9.55
W47	W40、W41、W44	85.53	29.3	40.0	55	4.28

2.2 填埋气体产率

根据式(1)计算出 W06、W12、W14、W47 等 4 口井抽气影响区域的产甲烷速率, 结果列于表 3 中.

结合图 1 和表 3, 可以看出 A 区的产甲烷速率明显大于 B 区, 与 B 区所填垃圾的年份比 A 区早相吻合. 由于 A、B 两区难以截然区分开, 从玉龙坑垃圾填埋场的历年填埋记录也难以统计得到 A、B 两区各自的垃圾填埋量, 因此对玉龙坑垃圾填埋场气体产生现状的评价只能采用表 3 得到的平均值对全填埋场进行计算. 根据表 2 统计所得玉龙坑历年垃圾填埋总量为 339.74×10^4 t. 则, 玉龙坑垃圾填埋场 CH₄ 产生速率为 $322 \text{ m}^3/\text{h}$.

3 讨论

填埋气体产量的准确预测对论证填埋气体利用项目的可行性意义重大. 填埋场抽气实验可以得出准确的填埋气体产量, 但往往在项目论证阶段只能采用模型进行预测. IPCC 推荐模型是 1996 年 IPCC 的工作和参考手册中提出的, 广泛应用于模拟单个填埋场填埋气体产生速率的变化趋势, 该模型在国际上普遍认可. 但是, 由于该模型的提出是基于欧美地区的生活垃圾特性, 在预测我国的垃圾填埋气体产生速率方面存在系统误差. 通过实测数据对 IPCC 推荐模型进行校验, 并结合我国生活垃圾的特性, 讨

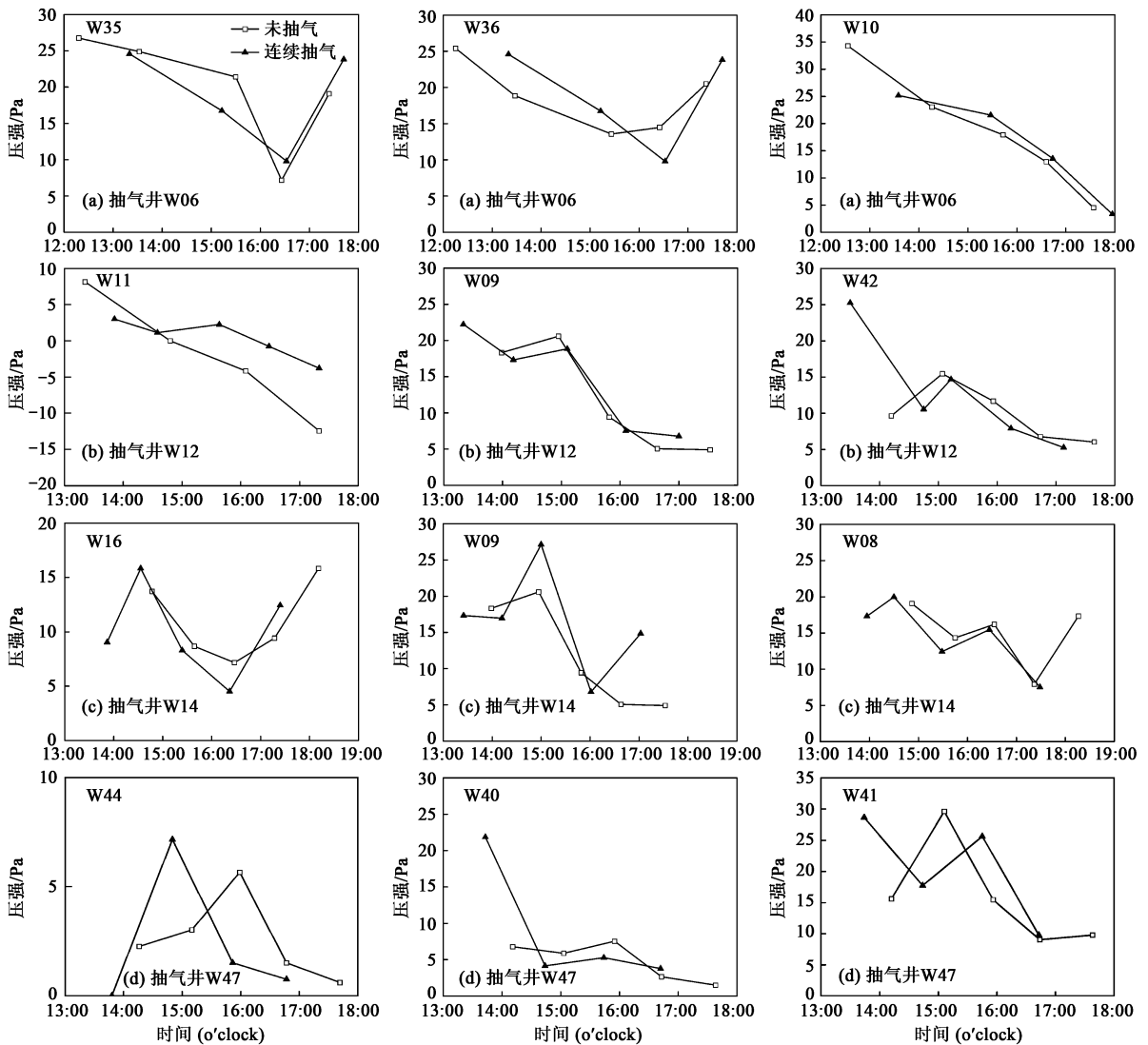


图 3 抽气井影响边界监测井的气压变化情况

Fig. 3 Air pressure of the observation well influenced by pumping

论模型参数的合理选取,对提高 IPCC 推荐模型预测的准确性具有重要意义。

填埋气体产量的主要影响因素是垃圾组成、填埋时间和含水率。我国城市生活垃圾的特性与国外相比,最大的差别在于我国城市生活垃圾中易降解有机物含量较大(厨余垃圾),而中等易降解有机物(纸张、纸板类)含量较少^[5,6]。这种组分上的差异决定了我国城市生活垃圾具有产气周期短、降解快、达到产气高峰后产气量迅速下降的特性^[14]。

在 IPCC 推荐模型中^[13],垃圾降解的半衰期是影响填埋气体产量变化趋势的关键参数,模型推荐的取值范围为 5~10 a。分别取垃圾降解的半衰期为 5.0 a 和 7.5 a,对玉龙坑垃圾填埋场的填埋气体产量进行预测,结果列于表 4。可以看出预测值远远高

于实测值,说明玉龙坑填埋场的垃圾降解速率较快,半衰期 < 5.0 a。垃圾降解半衰期的合理取值对准确预测填埋气体产量十分关键,当取垃圾降解的半衰期为 2.5 a,模型计算值(见表 4)与实测值能较好吻合。

为了考察我国生活垃圾填埋场的持续产 CH_4 时间,清华大学环境科学与工程系对北京市的 4 个短时间封场的垃圾填埋场进行了现场调查,填埋垃圾大约在 4~5 a 后其产甲烷过程即趋于结束^[14]。这一现象基本符合我国城市生活垃圾中可堆腐有机物以厨余垃圾为主,分解周期较短的特点。

为了提高 IPCC 推荐模型预测填埋气体产量的准确性,必须充分调查我国生活垃圾的特性,确定模型参数的合理取值,为填埋气体利用项目的开展提

表4 IPCC 推荐模型预测结果¹⁾/m³·h⁻¹
Table 4 Prediction results of IPCC model/m³·h⁻¹

年份	$t_{1/2} = 7.5 \text{ a}$	$t_{1/2} = 5.0 \text{ a}$	$t_{1/2} = 2.5 \text{ a}$
2005	846	766	366
2006	771	667	278
2007	703	580	210
2008	641	505	159
2009	585	440	121
2010	533	383	92
2011	486	333	69
2012	443	290	53
2013	404	253	40
2014	368	220	30
2015	336	191	23

1) 具体计算方法详见文献[13]; 根据 IPCC 提供的分类标准, 甲烷修正因子取值 1.0; 可降解有机碳的降解百分比的缺省值取值范围为 0.5~0.6, 选用中值 0.55; 填埋气体中 CH₄ 所占体积分数取缺省值 0.5

供准确的信息。

根据 IPCC 模型的预测值可以看出, 玉龙坑垃圾填埋场处于产甲烷阶段的中后期, 在今后的 10 a 内玉龙坑垃圾填埋场产生的填埋气体量将迅速减少^[15,16]。从填埋气体产生量情况来看, 玉龙坑垃圾填埋场将逐渐进入稳定期, 其填埋气体在经济性上已经失去了利用价值。但是, 从安全的角度考虑, 目前玉龙坑垃圾填埋场的甲烷排放量仍然较大, 爆炸和火灾的安全隐患仍然存在, 必须对其进行处理。

4 结论

(1) 通过现场抽气实验, 得出 2005 年深圳市玉龙坑生活垃圾填埋场的甲烷产率为 322 m³/h。玉龙坑垃圾填埋场将逐渐进入稳定期, 其填埋气体在经济性上已经失去了回收利用价值。

(2) 垃圾降解的半衰期是影响 IPCC 推荐模型预测准确性的关键参数。我国城市生活垃圾中可堆腐

有机物以厨余垃圾为主, 分解周期较短, 垃圾降解的半衰期与 IPCC 模型的推荐取值范围有一定的差异。为了准确预测填埋气体的产量, 需要在充分调查我国生活垃圾特性的基础上, 确定模型参数的合理取值, 提高 IPCC 推荐模型在我国的适用性。

参考文献:

- [1] 石磊, 赵由才, 唐圣钧. 垃圾填埋沼气的收集、净化与利用综述[J]. 中国沼气, 2004, 22(1): 14-17.
- [2] Hao X L, Yang H X, Zhang G Q. Trigereneration: A new way for landfill gas utilization and its feasibility in Hong Kong[J]. Eng Policy, 2008, 36: 3662-3673.
- [3] Nickolas J T, Priscilla A U. Methane generation in landfills[J]. Renew Energ, 2007, 32(7): 1243-1257.
- [4] 龚少鹏, 廖利, 陈惠凡. 深圳过桥窝垃圾填埋场填埋气体产量研究[J]. 安全与环境工程, 2007, 14(2): 53-55.
- [5] 杜吴鹏, 高庆先, 张恩琛, 等. 中国城市生活垃圾排放现状与成分分析[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 85-90.
- [6] 张宪生, 沈吉敏, 厉伟, 等. 城市生活垃圾处理处置现状分析[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(4): 60-64.
- [7] Scharff H, Jacobs J. Applying guidance for methane emission estimation for landfills[J]. Waste Manage, 2006, 26: 417-429.
- [8] Eden C. Combined landfill gas and leachate extraction system[R]. Coventry, England: UKPS Ltd., 1994. 2-5.
- [9] 彭绪亚, 余毅, 刘国涛. 垃圾填埋场竖井抽气条件下的填埋气压力分布[J]. 重庆大学学报, 2006, 26(1): 92-95.
- [10] 侯贵光, 陈家军, 陈济滨. 马鞍山市向山垃圾填埋场抽气实验研究[J]. 中国沼气, 2003, 21(4): 13-16.
- [11] 黄正华, 曾苏. 垃圾填埋气体收集现场试验与工程设计参数确定[J]. 中国沼气, 2004, 22(1): 11-13.
- [12] 刘磊, 梁冰, 薛强, 等. 垃圾填埋气体抽排影响半径的预测[J]. 化工学报, 2008, 59(3): 751-755.
- [13] IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories[M]. Hayama, Kanagawa, Japan: IGES, 2000. 5.6-5.11.
- [14] 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.
- [15] 袁光钰, 匡胜利, 曹丽云. 我国城市垃圾填埋场降解速率的分析[J]. 新疆环境保护, 2000, 22(1): 11-15.
- [16] 赵由才, 黄仁华, 赵爱华, 等. 大型填埋场垃圾降解规律研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(6): 736-740.