

填埋场甲烷排放因素分析及甲烷减排研究进展

郑有飞^{1,2,3} 周渭³ 尹继福³ 周兴³ 朱晶晶³

摘要

垃圾填埋场甲烷排放是全球人为温室气体排放的重要来源,对于整个大气中温室气体增加引起的气候效应的影响不容忽视,是世界各国现代化进程中迫切需要解决的一个严重的社会公害问题.文章从填埋场甲烷产生的相关因素、垃圾处理现状和填埋场甲烷减排技术等方面对国内外研究现状做了总结.甲烷的产生受填埋场中的垃圾特性、含水率、温度、pH值、填埋时间、渗滤液含量和其他因素影响.当前的填埋场减排技术包括原位减排、资源化利用和末端控制等,填埋场可以从多方面共同作用实现减排目标.

关键词

填埋场;甲烷;减排;垃圾处理

中图分类号 X705

文献标志码 A

收稿日期 2012-03-29

资助项目 中国第二次国家信息通报能力建设(CPR/08/G03);江苏省高校自然科学研究重大项目(09KJA170004);国家自然科学基金(41075114);江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX10B_291z)

作者简介

郑有飞,男,教授,主要从事臭氧与紫外辐射传输及其生物学效应、气候变化影响评估、农业气象、环境气象和气溶胶辐射强迫等领域的教学及科研工作. zhengyf@nuist.edu.cn

0 引言

随着社会的发展,城市生活废弃物的数量日益增多,成份日益复杂,处理日益困难,成为各国的重大环境问题.城市生活废弃物主要来源包括^[1]:生活垃圾、商业垃圾、灰烬、动物粪便、生物医药废弃物、建筑垃圾、工业固体废弃物、污水、可生物降解废弃物、不可生物降解废弃物和危险废弃物.目前,填埋处理固体废弃物仍然是最经济的处置形式^[2].生物质废弃物处理过程中排放的温室气体,有20%源自城市固体废弃物(MSW)处置.填埋场是温室气体较集中的排放源,具有较大的减少排放潜势^[3].垃圾填埋气(LFG)中包含45%~60%(体积分数,下同)甲烷(CH₄),40%~60%二氧化碳(CO₂),0%~0.2%氢(H₂),2%~5%氮(N₂),0%~1.0%硫化氢(H₂S)和0%~0.2%一氧化碳(CO)^[4],可严重污染大气、地下水和生态环境,并对全球气候变化产生影响.因此,由垃圾LFG引发的安全隐患和环境问题得到了社会各界的广泛关注.

垃圾填埋场是CH₄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产生含有大量CO₂和CH₄的LFG,据估计全球每年垃圾填埋场释放的甲烷为10~70 Tg,约占人为排放CH₄的11%,占总CH₄排放的8%^[5].随着垃圾填埋量的增加,填埋场排放的温室气体逐年增加,所以对填埋场的温室气体的减排就显得尤为重要.通过减排技术的应用可以减少填埋场温室气体的释放.LFG也是一种清洁的可再生能源,回收和利用垃圾LFG可实现环境、安全、能源、资源、经济多重效益.LFG中CH₄具有较高的热值,是一种利用价值较高的清洁燃料,如加以回收利用,既可以达到温室气体减排的目的,又可以缓解社会能源需求的压力^[6].本文从3个方面对国内外填埋场CH₄减排策略进行了总结,旨在为填埋场CH₄减排技术的应用提供参考.

1 影响填埋场CH₄产生的因素

城市生活垃圾厌氧消化的产气是体系中微生物作用的结果,其产气速率、CH₄体积分数的变化等几乎均与体系中产甲烷菌的阶段变化一致,沼气中CH₄体积分数的变化与产甲烷菌的变化之间存在着比例关系^[7].影响垃圾填埋场CH₄产生的因素主要包括:垃圾特性、含水率、温度、pH值、填埋时间、渗滤液处理等.

- 1 南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室,南京,210044
- 2 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京,210044
- 3 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

1.1 垃圾特性

垃圾中可降解有机物的含量及其纤维素、蛋白质和脂肪的构成比例,对 LFG 的产生起着决定性作用。淀粉、膳食纤维、蛋白质、脂肪和木质纤维类成分,厌氧发酵的 CH_4 产率差异较大^[8]。餐厨垃圾产沼利用、生活垃圾 LFG 收集利用的低碳化程度最高,分别为 93.7% 和 75.3%^[9]。易降解有机物含量越高,填埋场产气越快。

1.2 含水率

含水率是决定垃圾降解过程中 LFG 产生量的主要因素。水分的运动有助于营养物质和微生物的转移,同时有助于有机物的水解及微生物的吸收和利用^[10]。一般认为适于垃圾产气的含水率(质量分数)范围在 50% ~ 60%^[11]。填埋场中的含水率取决于自身含水率、填埋区降水量、填埋场覆盖层、场底防渗设施和管理方式(如渗滤液回灌、压实作业等)^[12]。

1.3 温度

温度决定了填埋场内微生物群落的空间分布和 LFG 的产气速率。多数产甲烷菌是中温菌,生长适宜温度为 15 ~ 45 °C^[13],且 40 °C 时垃圾的降解速度最快,此时气体的产生速率是 30 °C 时的 3 倍,但温度升高到 55 °C 时, CH_4 的产生就停止。垃圾填埋深度、垃圾密度、环境温度和微生物活性等因素均会影响垃圾的填埋温度^[12]。温度会影响废弃物降解的程度,高温能够加速废弃物降解和导致较大的渗滤液化学需氧量(COD)和氨氮浓度^[14]。Teclé 等^[15]的研究表明 CH_4 排放与土壤温度显示出良好的时间相关性。

1.4 pH 值

pH 值通过影响微生物活性来决定垃圾降解速度,多数产甲烷菌是中性菌,LFG 产生的最佳 pH 值范围为 6.5 ~ 7.5^[16]。Nikiema 等^[17]认为最适于垃圾发酵的 pH 值为 6.8 ~ 7.2。过酸或过碱都会抑制 LFG 的产生^[18]。甲烷氧化菌氧化 CH_4 的最适 pH 值为 7.0 左右的中性环境^[19]。

1.5 填埋时间

生活垃圾降解可以分为 5 个阶段:调整阶段、过渡阶段、酸化阶段、产 CH_4 阶段和稳定阶段^[20-22],不同的发酵阶段各因子对 CH_4 产率的影响程度也不尽相同。调整阶段,填埋的垃圾密度低、孔隙大,废弃物与空气有一定的接触,此时的好氧降解速率快,释放

出 CO_2 、水汽和热量,生活垃圾堆体温度快速升高至 30 ~ 40 °C。过渡阶段,填埋场内部氧气耗尽后,形成厌氧条件,垃圾被转化为有机酸和其他中间产物,此时 CO_2 浓度升高,垃圾和渗滤液 pH 值下降。酸化阶段,pH 下降到 5.0 以下,过渡阶段产生的有机酸和气体中间产物被转化为低分子量的甲酸、乙酸和其他复杂的腐殖酸。产 CH_4 阶段,此阶段产酸和产 CH_4 过程同时进行,有机酸转化为 CH_4 和 CO_2 ,此时 pH 值会升高到 6.8 ~ 8.0 的中性范围内。稳定化阶段,可降解的组分基本分解完,LFG 体的主要成分依然是 CO_2 和 CH_4 ,但气体产率降低,渗滤液 COD 也含有大量的难降解物质。

1.6 渗滤液

渗滤液是一种高浓度有机废水,其成分复杂,水质水量变化幅度大^[23]。新鲜垃圾填埋层初期渗滤液 COD 大、挥发性脂肪酸(VFA)浓度高,经好氧预处理降低 COD、VFA 浓度后循环,可有效地加速新鲜垃圾填埋层进入稳定的甲烷化阶段进程^[24-25]。大多数在渗滤液样品中检测的参数如颜色、电导率等处,在高水平。渗滤液中 COD 在 3 250 ~ 6 125 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,有机负荷相当高。此外,BOD/COD(生化需氧量/化学需氧量)比值较低,说明大多数的有机物质是不容易进行生物降解的^[26]。适当的渗滤液回灌,能对填埋场的产气效率进行人为控制,有机碳的气相转化率可以达到甚至超过 80%^[24]。采用垃圾湿质量 5.3% 的渗滤液回灌至新鲜垃圾层,能显著加速填埋垃圾的水解、酸化和产气进程^[27]。Jayasinghe 等^[28]研究表明,可通过增加渗滤液与酶来加快难降解材料木质素废弃物材料的降解,且观察到用酶改良后反应器内产生的 CH_4 量较普通控制反应器的大,其中用酶改良后反应器内的木质素减少了 68.4%,减少量约为普通控制反应器(6.2%)的 11 倍。

1.7 其他

其他因素包括气象条件和填埋场管理方式等。气象条件对 LFG 的影响主要表现在温度、大气压和降雨等方面。

1) 填埋场表面 CH_4 排放速率与季节有关, CH_4 通量密度(E)和地面温度(T)之间存在指数关系^[29],在夏秋冬季分别为:

$$E_{\text{夏}} = 4.14 \times 10^{-19} \times \exp(1.615 \times T),$$

$$E_{\text{秋}} = 4.50 \times 10^{-9} \times \exp(0.970 \times T),$$

$$E_{\text{冬}} = 5.12 \times 10^{-4} \times \exp(0.782 \times T).$$

2) 气压变化能够改变进入填埋场的空气质量

和填埋场释放 LFG 能力。

3) 降雨可致使填埋场含水率升高,并通过减少覆盖层孔隙而阻碍 LFG 的释放^[12]。

4) 填埋场地质构造及环境地质条件影响垃圾 LFG 的释放途径^[22],因此,填埋场选址必须考虑以下 8 个因素:

- ① 填埋区的尺寸和容量;
- ② 地面岩层的渗透性;
- ③ 填埋场底部与地下水位的差距;
- ④ 覆土的来源和质量;
- ⑤ 填埋场的等级;
- ⑥ 填埋工程对附近居民的影响;
- ⑦ 供水的距离;
- ⑧ 建设和垃圾运输的成本^[30]。

5) 固体废弃物的生物降解在填埋场底部发生的程度更大,气体产生速率与填埋场深度成正比^[31]。

2 填埋场 CH₄ 减排的紧迫性

近年来,中国 MSW 排放量增长迅速,尤其是在南部、西南部和东部地区^[32]。城市生活垃圾产生量约以每年 10% 的速度迅猛增长,而垃圾处理能力发展相对滞后^[33]。目前我国城市人均年产生生活垃圾 440 kg,有 200 多个城市已经不同程度出现“垃圾围城”的局面,每年因垃圾造成的损失近 300 亿元,而将其综合利用却能创造约 2 500 亿元的效益^[34]。国内垃圾成分主要是高有机物和水分,厨余的含量占了垃圾清运量的最高比例(约 60%)^[35]。

2010 年,我国 654 个设市城市生活垃圾清运量为 1.57 亿 t,其中无害化处理率为 71%。全国在 567 座城市生活垃圾处理设施中,填埋场有 447 座,按生活垃圾清运量统计分析,填埋处理的比例占 56.6%^[36]。虽然我国拥有大量垃圾填埋场,但仍存在垃圾 LFG 发电应用范围小、利用率低等问题,且仍有 70% 的填埋场没有进行 LFG 的收集利用^[37]。2009 年,全国共建成并投入使用的 LFG 发电厂有 24 家,但全国各地的垃圾填埋场沼气发电项目分布不均,大部分集中在华东和东部沿海等发达城市,在偏远地区比例较小。同时,垃圾填埋量的增加导致 CH₄ 排放量呈上升趋势,进一步加剧了温室效应。根据目前生活垃圾的处理情况,估算我国每年生活垃圾处理过程将形成 CH₄ 排放超过 600 万 t,总碳排放约 1.5 亿 t,而如果实施低碳化处理策略,2015 年 CH₄

排放可减少至约 500 万 t,总碳排放可减少至 1.3 亿 t^[9]。近几年中国 MSW 的 CH₄ 排放量在全国范围内从东部到西部逐渐减少,但近 10 年年排放总量逐年增加^[38]。

目前,在国际碳市场中占据比较大的份额的项目是清洁发展机制(CDM)^[39]。截至 2011 年 1 月 27 日,国家发展和改革委员会批准的 CDM 项目有 2 888 个,其中垃圾填埋场 CH₄ 回收利用的项目为 58 个,且还会逐年增加。表 1(由《中国统计年鉴》及中国清洁发展机制网(<http://cdm.ccchina.gov.cn/web/index.asp>)数据整理而得)表明,2009 年实际上 CDM 项目总减排量还不到填埋场总排放的 10%,仍存在很大的减排潜力。

表 1 填埋场 CH₄ 排放量
Table 1 Landfill CH₄ emissions

年份	生活垃圾清运量/万 t	CH ₄ 排放/万 t CO ₂ 当量	CDM 项目估计年减排量/万 t CO ₂ 当量	CDM 项目减排占总排放比例/%
2006	14 841	7 056.524	199.705 4	2.83
2007	15 215	7 234.352	330.962 5	4.57
2008	15 438	7 340.383	452.941 2	6.17
2009	15 734	7 481.124	624.524 4	8.35

循环经济近年来发展迅速,而已成立的立法系统,包括废弃物管理领域的一系列价格和税收措施,更为循环经济的发展提供了法律保护。尽管这些措施为在循环经济模式下更好地管理废弃物提供了坚实的基础,但仍存在很多挑战。例如,法律系统需要包括更多高端的科学研究,而中国缺少能支持循环经济进一步发展的关键废弃物处理技术^[40]。目前,生活垃圾处理在我国城市管理和公共服务领域的重要地位日益凸显,在政府和市场等多重力量的共同努力下,我国生活垃圾处理事业得到了重大的发展并迎来良好的市场前景,但是,受到经济、技术、人口素质等多种因素影响,我国生活垃圾处理还面临着巨大的挑战^[41],主要体现在管理体制不利于生活垃圾管理、垃圾治理缺乏资金、收费制度尚未建立、垃圾减量化和资源化未引起重视、法规不健全以及全民环境卫生意识不高等方面^[42]。

国外一些国家对垃圾处理做了大量工作^[43]:一是实行垃圾分类收集和集中处理,通过垃圾分类,分成有机物、可燃物 and 无机物等;二是制定相关法规,限制对环境的污染;三是支持和鼓励垃圾资源化利用,开发各种垃圾处理新方法、新技术,支持和鼓励

垃圾资源化利用的新途径和新方法,推崇厌氧产沼处理垃圾技术。

废弃物是欧盟 27 个国家的第 4 大温室气体排放因素,占总温室气体排放的 2.8%。因此,欧盟于 2005 年要求各成员国垃圾填埋物中有机垃圾的总量不得超过 5%,其废弃物中排放的温室气体也已经在 1990 的 207 Tg 减少到 2008 的 138 Tg,减少了 33%^[44]。同时,欧盟各成员国还建立了大量的垃圾处理设施并广泛开展了相关技术研究。目前,瑞典有 200 余座厌氧产沼工厂,其中 30% 来源于有机物和垃圾填埋;比利时正在建造 5~6 座日处理 400 t 的混装垃圾综合处理厂,将垃圾中约 30% 的有机物用于厌氧产沼;法国 2003 年设计建造了 1 家有机废弃物再生处理中心,年处理生物废物 10 万 t,原料来源于家庭分类收集的有机物和庭院垃圾;德国已开展农场人畜粪便和可降解有机物的混合厌氧产沼工程研究。这些工程大幅降低了温室气体排放量,并带来了较好的经济效益。

美国 MSW 总量从 1990 的 2.09 亿 t 增加到 2008 的 2.94 亿 t,约有 1 800 个可控制的填埋场,2008 年美国的垃圾填埋场 CH₄ 排放约为 126.3 Tg CO₂ 当量,占人为排放的 22%,是美国的第 2 大温室气体排放源。从 1990 开始,美国从填埋场回收或燃烧 CH₄,到 2008 年,美国从填埋场排放的 CH₄ 减少了约 15%^[45]。

预计到 2030 年,世界范围内 MSW 总量将会翻倍。部分国家已经对进入填埋场的原料设立了非常严厉的限制,如禁止有机物质进入堆填区等^[46]。LFG 回收和利用方式应该因地制宜,但我国 LFG 利用缺乏回收和利用的经验,并且垃圾填埋场地理分布分散,还没有形成相应的产业化基础和商业运作模式^[47]。

3 填埋场减排策略

填埋场 CH₄ 减排技术主要可以分为填埋层原位减排技术、资源化利用技术和末端控制技术等 3 个方面^[19]。

3.1 原位减排技术

填埋层 CH₄ 原位减排技术可分为可持续填埋、好氧填埋和准好氧填埋等。可持续填埋是从源头对垃圾减量、回收利用,入场前进行预处理,使垃圾进入填埋场快速稳定化,以及在填埋场选址、防渗、填埋工艺、污染控制、终场修复、后续环境监测等各个

环节采取严格的控制措施,并在封场后对土地资源和矿化垃圾作为资源加以利用^[48]。可持续填埋技术将缓解填埋场用地紧张、可用资源浪费和环境污染等矛盾,为我国垃圾处置提出了新的方向^[49]。刘玉强等^[50]的实验表明传统厌氧填埋产生 CH₄ 的体积分数变化范围为 35%~50%,准好氧填埋结构下 CH₄ 的体积分数变化范围只有 7%~13%。准好氧填埋可以有效降低 70%~90% 的 CH₄ 气体排放^[51],在中国绝大多数没有设置 LFG 回收装置的填埋场采用准好氧填埋结构,对于减少填埋层气体中 CH₄ 的产生量,减缓温室效应具有较好的效果^[52]。

3.2 资源化利用技术

由于 LFG 具有热值高的特点^[53],资源化利用技术已经成为国内外竞相研究开发的热点,包括收集 LFG 用于供热或并网发电和作为管道气、动力燃料、化工原料等。CH₄ 在 LFG 排放总量中所占比例达 40%~60%^[54-56],是一种利用价值较高的可再生能源。LFG 可以用于生活供热以及其他用热途径^[57-58],也可以通过热电转换装置来发电^[59],这既可以能源回收利用,也是减少温室气体排放的有效方式^[60-62]。LFG 发电具有显著的 CO₂ 减排效益,其碳减排成本低于其他可再生能源发电技术,具有很强的竞争力^[63]。经过预处理手段,可以将垃圾 LFG 中的 CH₄ 体积分数提高到 95%,纯化的 LFG 体是优良的居民生活燃气,并且接入方便。其主要限制因素是净化和安全,以及输气距离和成本问题^[56]。压缩天然气作为汽车燃料目前正逐步为市场所接受^[64],LFG 用作车辆燃料具有热值较高,抗爆性好等优点^[65],但由于受到生产量的限制,很难达到商业化规模的经营^[56]。因为 CH₄ 的化学性质,转化 CH₄ 是很困难的^[66],在特定条件下,通过催化反应 LFG 中的 CH₄ 可以转化成芳烃^[66-67],或作为化工原料直接转化成芳烃和乙烯^[68]。填埋场 CH₄ 所能创造的价值是相当可观的,而我国绝大多数垃圾填埋场产生的 CH₄ 都自由排空,收集和利用填埋场中 CH₄ 对于能源相对短缺的今天具有重要的意义。

3.3 末端控制技术

末端控制技术包括火炬燃烧和覆盖层 CH₄ 氧化。因为单位质量 CH₄ 的温室效应在 100 年尺度上是 CO₂ 的 25 倍^[69],燃烧 CH₄ 生成 CO₂,可大幅降低 LFG 的温室气体排放强度。过去燃烧 LFG 使用的是简单的露天堆积燃烧,没有任何隔离,能看到很大的

火焰,而现在正逐渐被可控制温度的室内燃烧代替^[70]. 垃圾填埋场上方所设置的覆盖层对气体向外部释放有良好的抑制作用^[71],其受温度、含水率、有机质含量、厚度、孔隙度、pH 值、无机氮、植被和下层产生的 CH₄ 和 CO₂ 的体积比共同影响^[19,72],且含水率(质量分数)在 10% ~ 15% 和温度在 25 ~ 35 °C 时对 CH₄ 生物过滤系统中的清除能力的影响最大^[73]. Park 等^[74]在其研究中构建了 3 种不同填埋场覆盖层,结果表明不同覆盖层对 CH₄ 排放影响差异很大. Lu 等^[75]基于气体热力学原理,设计了一种多孔生物覆盖系统提高氧气的供应率和 CH₄ 氧化能力,对填埋场 CH₄ 排放减少具有巨大的潜力. 废弃物生物覆盖土壤作为填埋场覆盖材料对 CH₄ 氧化的最佳组成是 45% 的含水率和 ≤4 mm 的微粒尺寸^[76]. CH₄ 体积分数在 0.01% ~ 10% 范围内,CH₄ 氧化率增加迅速,并在 10% ~ 30% 时保持稳定^[77]. 填埋场表面覆盖系统增加了气体的压力,它能有效地抑制无序气体泄漏和提高气体流动速率,表面覆盖层和中间覆盖层的存在提高了 LFG 的储存能力,并且覆盖层减少了大气的影 响,提高了废弃物的生物降解能力^[78]. Hilger 等^[79]的现场实验表明通过优化自然土壤微生物过程可以高水平地清除 CH₄.

4 结论

近年来世界各国越来越关注埋埋气体对全球气候变化的影响.《中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》中也把研究减少 CH₄ 的排放途径作为实施温室气体排放控制的目标之一. 废弃物的数量日益增多,填埋场排放的温室气体在整个大气中温室气体增加引起的气候效应不容忽视. 废弃物增多给环境带来很多问题,垃圾填埋处理仍然是最经济的处理方式. 埋埋气体的产生受到垃圾特性、含水率、温度、pH 值、埋埋时间、渗滤液和其他相关因素影响. 本文对国内外垃圾处理情况进行了分析,其中大部分埋埋场还没有进行 LFG 收集利用,我国垃圾处理还需加大力度,垃圾管理还需进一步完善. 埋埋场 CH₄ 减排的策略,可以从原位减排技术、资源化利用技术和末端控制技术等多方面实现 LFG 减排目的. 目前我国大量埋埋场缺乏 CH₄ 回收利用设施,急需有效的 CH₄ 抑制技术,需要进一步从技术和管理上加强 CH₄ 的管理,建立适合我国国情的减排技术体系,降低其带来的温室效应.

参考文献

References

- [1] Demirbas A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52 (2) : 1280-1287
- [2] Chen Y, Zhan T L T. Environmental geotechnics related to landfills of municipal solid wastes [M] // Chen Y M, Tang X W, Zhan L T. Advances in environmental geotechnics-Pro. Int Sym on Geoenviron. Hongzhou: Zhejiang University Press & Springer, 2009: 132
- [3] Luo Y X, Wang W, Wan X, et al. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from biomass waste in China: A case study in Hebei province [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53 (1) : 19-23
- [4] 王宗建, 何秀萍, 马齐佳, 等. 运用清洁发展机制 (CDM) 开展垃圾埋埋气体收集利用 [J]. 环境卫生工程, 2006, 14 (4) : 52-54
WANG Zongjian, HE Xiuping, MA Qijia, et al. Developing waste landfill gas collection and utilization applying CDM [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, 14 (4) : 52-54
- [5] Boeckx P, van Cleemput O, Villaralvo I. Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28 (10/11) : 1397-1405
- [6] 赵玉杰, 王伟. 埋埋场 CH₄ 排放量的预测 [J]. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2004 (4) : 63-65
ZHAO Yujie, WANG Wei. Study on methane generation from landfill site in China [J]. Journal of Qinghai Normal University: Natural Science Edition, 2004 (4) : 63-65
- [7] 蒲贵兵, 甄卫东, 张记市, 等. 城市生活垃圾厌氧消化中甲烷产量的生物动力学研究 [J]. 化学与生物工程, 2007, 24 (7) : 55-59
PU Guibing, ZHEN Weidong, ZHANG Jishi, et al. Study on methane output in biologic dynamics during anaerobic digestion of municipal solid waste [J]. Chemistry & Bioengineering, 2007, 24 (7) : 55-59
- [8] 李东, 袁振宏, 张宇, 等. 城市生活有机垃圾各组分厌氧消化产甲烷能力 [J]. 环境科学学报, 2008, 28 (11) : 2284-2290
LI Dong, YUAN Zhenhong, ZHANG Yu, et al. Anaerobic biochemical methane potential of organic fraction of municipal solid waste [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 28 (11) : 2284-2290
- [9] 李欢, 金宜英, 李洋洋. 生活垃圾处理的碳排放和减排策略 [J]. 中国环境科学, 2011, 31 (2) : 259-264
LI Huan, JIN Yiyang, LI Yangyang. Carbon emission and its reduction strategies during municipal solid waste treatment [J]. China Environmental Science, 2011, 31 (2) : 259-264
- [10] 刘富强, 唐薇, 聂永丰. 城市生活垃圾埋埋场气体的产生、控制及利用综述 [J]. 重庆环境科学, 2000, 22 (6) : 72-76
LIU Fuqiang, TANG Wei, NIE Yongfeng. Summarization on the generation, control and utilization of gases from municipal solid waste landfill site [J]. Chongqing Envi-

- ronmental Science,2000,22(6):72-76
- [11] 李军.生活垃圾填埋气甲烷含量的影响因子[J].中国沼气,2001,19(3):27-30
LI Jun. Factors affecting the methane content of landfill gas[J]. China Biogas,2001,19(3):27-30
- [12] 张相锋,肖学智,何毅,等.垃圾填埋场的甲烷释放及其减排[J].中国沼气,2006,24(1):3-5
ZHANG Xiangfeng, XIAO Xuezhi, HE Yi, et al. CH₄ emission and its reduction from MSW landfill[J]. China Biogas,2006,24(1):3-5
- [13] 房怀阳,吴长振.城市生活垃圾填埋场甲烷气资源的产量估算及其利用[J].资源开发与市场,1999,15(6):330-331
FANG Huaiyang, WU Changzhen. The integrated using and yield estimation of methane resource from municipal solid waste landfill[J]. Resource Development & Market,1999,15(6):330-331
- [14] Wang Y, Pelkonen M. Impacts of temperature and liquid/solid ratio on anaerobic degradation of municipal solid waste: An emission investigation of landfill simulation reactors[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management,2009,11(4):312-320
- [15] Teclé D, Lee J, Hasan S. Quantitative analysis of physical and geotechnical factors affecting methane emission in municipal solid waste landfill[J]. Environmental Geology,2009,56(6):1135-1143
- [16] 王华,杨光,刘小刚,等.温度对沼气菌群产气能力的影响及菌群变化的研究[J].西北农业学报,2008,17(5):294-297
WANG Hua, YANG Guang, LIU Xiaogang, et al. The effect of temperature on biogas production capability and the change of microbial community[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica,2008,17(5):294-297
- [17] Nikiema J, Brzezinski R, Heitz M. Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: A review[J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology,2007,6(4):261-284
- [18] 丁维新,蔡祖聪.土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J].生态学报,2002,22(10):1672-1679
DING Weixin, CAI Zucong. Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(10):1672-1679
- [19] 岳波,林晔,黄泽春,等.垃圾填埋场的甲烷减排及覆盖层甲烷氧化研究进展[J].生态环境学报,2010,19(8):2010-2016
YUE Bo, LIN Ye, HUANG Zechun, et al. Methane emission reduction in msw landfills and methane oxidation in landfill covers: A review[J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(8):2010-2016
- [20] 杨玉江.填埋场生活垃圾降解与稳定化过程研究[D].上海:同济大学环境科学与工程学院,2007
YANG Yujiang. Degradation and stabilization process of refuse at landfill[D]. Shanghai: College of Environmental Science and Engineering, Tongji University,2007
- [21] 李颖.城市生活垃圾卫生填埋场设计指南[M].北京:中国环境科学出版社,2005:493
LI Ying. Guidelines for municipal solid waste sanitary landfill design[M]. Beijing: China Environmental Science Press,2005:493
- [22] 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,2000:802
NIE Yongfeng. Technical manual for waste treatment works: Solid waste volume[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2000:802
- [23] 刘疆雁,徐迪民,赵由才,等.大型垃圾填埋场渗滤液氨氮衰减规律[J].环境科学学报,2001,21(3):323-327
LIU Jiangying, XU Dimin, ZHAO Youcai, et al. Natural reduction of ammonia-N in leachate of large-scale landfill[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2001,21(3):323-327
- [24] 张晓星,何晶晶,邵立明,等.不同渗滤液循环方式对填埋层甲烷产生的影响[J].环境科学学报,2004,24(2):304-308
ZHANG Xiaoxing, HE Pinjing, SHAO Liming, et al. Effects on landfill methane production by different leachate recirculation operations[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2004,24(2):304-308
- [25] 邵立明,何晶晶,张晓星,等.添加污泥对渗滤液循环垃圾填埋层甲烷产生的影响[J].上海交通大学学报,2005,39(5):840-844
SHAO Liming, HE Pinjing, ZHANG Xiaoxing, et al. Effects of raw leachate recirculation combined with sewage sludge addition on municipal solid waste landfill methane production[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2005,39(5):840-844
- [26] Fatta D, Papadopoulou A, Loizidou M. A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area[J]. Environmental Geochemistry and Health,1999,21(2):175-190
- [27] 杨国栋,蒋建国,黄云峰,等.渗滤液回灌负荷对填埋场垃圾产气效能的影响[J].环境科学,2006,27(10):2129-2134
YANG Guodong, JIANG Jianguo, HUANG Yunfeng, et al. Impact of leachate recirculation loadings on efficiency of Landfill Gas (LFG) generation[J]. Environmental Science,2006,27(10):2129-2134
- [28] Jaysinghe P A, Hettiaratchi J P A, Mehrotra A K, et al. Effect of enzyme additions on methane production and lignin degradation of landfilled sample of municipal solid waste[J]. Bioresource Technology,2011,102(7):4633-4637
- [29] Ishigaki T, Yamada M, Nagamori M, et al. Estimation of methane emission from whole waste landfill site using correlation between flux and ground temperature[J]. Environmental Geology,2005,48(7):845-853
- [30] Cao L W, Cheng Y H, Zhang J, et al. Application of grey situation decision-making theory in site selection of a waste sanitary landfill[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2006,16(4):393-398
- [31] Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, Kumar S, et al. Solid waste characteristics and their relationship to gas production in tropical landfill[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2007,135(1/2/3):41-48
- [32] Xu X H, Yang Y P, Wang D H. CH₄ emission and recovery

- ery from municipal solid waste in China[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2003, 4(3): 352-357
- [33] 张英民, 尚晓博, 李开明, 等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 389-396
ZHANG Yingmin, SHANG Xiaobo, LI Kaiming, et al. Technologies status and management strategies of municipal solid waste disposal in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 389-396
- [34] 尹思南, 尹思艺, 张春霖. 生化降解: 生活垃圾处理新技术[J]. 城市开发, 2010(17): 70-71
YIN Sinan, YIN Siyi, ZHANG Chunlin. Garbage disposal technology: Biodegradation[J]. Urban Development, 2010(17): 70-71
- [35] Zhang D Q, Tan S K, Gersberg R M. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(8): 1623-1633
- [36] 中国环境保护产业协会. 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
CAEPI. China development report on urban domestic refuse disposal industry in 2010[J]. China Environmental Protection Industry, 2011(4): 32-37
- [37] 龙吉生, 欧远洋, 仝岩, 等. CDM 机制与填埋气回收利用[J]. 建设科技, 2010(15): 56-58
LONG Jisheng, OU Yuanyang, TONG Yan, et al. CDM mechanism and landfill gas recovery & utilization[J]. Construction Science and Technology, 2010(15): 56-58
- [38] 高庆先, 杜昊鹏, 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, 2007, 2(6): 269-272
GAO Qingxian, DU Wupeng, LU Shiqing, et al. Methane emission from municipal solid waste in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 2(6): 269-272
- [39] 王圣, 左漪. 我国垃圾发电 CDM 项目开发现状及问题[J]. 节能与环保, 2009(10): 20-23
WANG Sheng, ZUO Yi. Considerations of related issues and practice analysis for garbage power CDM project development in China[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2009(10): 20-23
- [40] Li J H, Yu K L. A study on legislative and policy tools for promoting the circular economic model for waste management in China[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2011, 13(2): 103-112
- [41] 李鸿雁. 我国生活垃圾处理: 挑战和机遇并存[J]. 商用汽车, 2011(6): 27-29
LI Hongyan. China home scrap processing: Challenges and opportunity are coexistence[J]. Commercial Vehicle, 2011(6): 27-29
- [42] 刘国才, 庞云杉, 徐婷婷. 论城市垃圾分类处理和资源化[J]. 中国城市经济, 2010(9): 284-285
LIU Guocai, PANG Yunshan, XU Tingting. Discussion on urban garbage classification and recycling[J]. China Urban Economy, 2010(9): 284-285
- [43] 徐庆元, 代以春. 欧盟 MSW 管理与有机废物厌氧产沼技术[J]. 四川环境, 2005, 24(4): 85-88
XU Qingyuan, DAI Yichun. European Union MSW management and bio-gas generation technology[J]. Sichuan Environment, 2005, 24(4): 85-88
- [44] European Environment Agency. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990—2008 and inventory report 2010[R]. 2010
- [45] EPA U S. Inventory of U. S. Greenhouse gas emissions and sinks; 1990—2008[R]. EPA 430-R-10-006, 2010
- [46] Castaldi M J, Themelis N J. The case for increasing the global capacity for Waste to Energy (WTE)[J]. Waste and Biomass Valorization, 2010, 1(1): 91-105
- [47] 魏宁, 李小春, 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
WEI Ning, LI Xiaochun, WANG Yan, et al. Resources quantity and utilization prospect of methane in municipal solid waste landfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1687-1692
- [48] Cossu R, Raga R, Rossetti D. The PAF model: An integrated approach for landfill sustainability[J]. Waste Management, 2003, 23(1): 37-44
- [49] 郭翠香, 石磊, 赵由才, 等. 可持续卫生填埋技术在我国的应用前景[J]. 环境卫生工程, 2006, 14(1): 50-53
GUO Cuixiang, SHI Lei, ZHAO Youcai, et al. Application prospect of sustainable sanitary landfill technology in China[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, 14(1): 50-53
- [50] 刘玉强, 王琪, 黄启飞, 等. 不同填埋工艺对填埋气产生动态变化的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2409-2412
LIU Yuqiang, WANG Qi, HUANG Qifei, et al. Dynamic variation of landfill gas production under different landfill treatment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12): 2409-2412
- [51] Matsufuji Y, Hanashima M. Characteristic and mechanism of semi-aerobic landfill on stabilization of solid waste[C] // Proceedings of the First Korea-Japan Society of Solid, 1997: 87-94
- [52] 董路, 刘玉强, 黄启飞, 等. 准好氧填埋结构 CH₄ 含量分布变化研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 20-23
DONG Lu, LIU Yuqiang, HUANG Qifei, et al. Study on distribution of methane content in semi-aerobic landfilling structure[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(3): 20-23
- [53] 王艳秋. 国内垃圾填埋气利用新途径: 压缩制汽车燃料气[J]. 中国沼气, 2004, 22(1): 33-34
WANG Yanqiu. A new way to utilize landfill gas at home: Converting to vehivle fuel after compression[J]. China Biogas, 2004, 22(1): 33-34
- [54] 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
- [55] 徐新华, 汪大辉. 城市垃圾甲烷气体排放及减排对策[J]. 四川环境, 1997, 16(1): 39-42
XU Xinhua, WANG Dahui. Calculation of CH₄ emission from domestic refuse and its mitigation countermeasures[J]. Sichuan Environment, 1997, 16(1): 39-42
- [56] 时景丽, 王仲颖, 胡润青, 等. 我国垃圾填埋场填埋气

- 体排放和回收利用现状分析[J]. 中国能源, 2002(8):27-29
- SHI Jingli, WANG Zhongyin, HU Runqing, et al. Status analysis of emission and recycle of LFG in China[J]. Energy of China, 2002(8):27-29
- [57] 高杰, 周刚. 南京轿子山垃圾填埋场买卖废气[N]. 中国环境报, 2006-07-18
- GAO Jie, ZHOU Gang. Nanjing Jiaozishan landfill emissions are trading[N]. China Environment News, 2006-07-18
- [58] 谢文岳, 任镭, 陈昆柏. 宁波大畚垃圾卫生填埋场填埋气的综合利用[J]. 能源工程, 2009(1):56-58
- XIE Wenyue, REN Lei, CHEN Kunbai. Comprehensive utilization of landfill gas in Da'ao refuse landfill in Ningbo[J]. Energy Engineering, 2009(1):56-58
- [59] 朱辰元, 薛飞, 汪海贵. 热气机在垃圾填埋气燃烧发电方面的研究和应用[J]. 能源技术, 2006, 27(5):216-219
- ZHU Chenyuan, XUE Fei, WANG Haigui. Development and application of stirling engine generation in use of landfill gas combustion[J]. Energy Technology, 2006, 27(5):216-219
- [60] 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
- [61] Shin H, Park J, Kim H, et al. Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model[J]. Energy Policy, 2005, 33(10):1261-1270
- [62] Qin W, Egolopoulos F N, Tsotsis T T. Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation[J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 82(1/2/3):157-172
- [63] 阳晶, 马晓茜. 填埋场沼气发电的温室气体减排效益分析[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(6):461-464
- YANG Jing, MA Xiaolian. The benefit of landfill gas power generation to the reduction of the greenhouse gas emission[J]. Environmental Pollution & Control, 2006, 28(6):461-464
- [64] 刘保华, 李家俊, 赵乃勤. 天然气用做汽车替代性燃料的储气方式研究[J]. 炭素, 2002(4):39-42
- LIU Baohua, LI Jiajun, ZHAO Naiqin. Research of storage methods on natural gas used as substitution for vehicle fuels[J]. Carbon, 2002(4):39-42
- [65] 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
- CHEN Jiajun, YU Yanxin, DONG Xiaoguang. The current situation of LFG recovery as vehicle fuel and its prospects[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2000, 13(2):14-16
- [66] Wang L S, Tao L X, Xie M S, et al. Catalytic synthesis of benzene directly from methane[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(9):790-791
- [67] Wang L S, Tao L X, Xie M S, et al. Dehydrogenation and aromatization of methane under non-oxidizing conditions[J]. Catalysis Letters, 1993, 21(1/2):35-41
- [68] 王林胜, 崔巍, 徐奕德, 等. 甲烷作为化工原料直接转化生成芳烃和乙烯新催化过程的研究. I: 甲烷在Mo/HZSM-5催化剂上的程序升温表面反应[J]. 自然科学进展, 1999, 9(3):46-50
- WANG Linsheng, CUI Wei, XU Yide, et al. Study on new catalytic processes of direct conversion of methane as chemical raw material and vinyl aromatics[J]. Progress in Natural Science, 1993, 9(3):46-50
- [69] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. IGES, Japan, 2006
- [70] Stachowitz W H, Dipl.-Ing. Landfill gas collection, treatment and utilization-20 years of experience in the field of landfill gas disposal standards, problems, solutions, and procedures[C]//1st Middle European Conference on Landfill Technology, Budapest, 2008
- [71] 刘磊, 薛强, 梁冰, 等. 垃圾填埋场封场后气体产出及释放规律研究[J]. 环境卫生工程, 2010, 18(1):19-21
- LIU Lei, XUE Qiang, LIANG Bing, et al. Landfill gas generation and emission in closed landfill sites[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2010, 18(1):19-21
- [72] 费平安, 王琦. 填埋场覆盖层甲烷氧化机理及影响因素分析[J]. 可再生能源, 2008, 26(1):97-101
- FEI Pingan, WANG Qi. Analysis on the mechanism and influence factors of methane oxidation in landfill soil covers[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1):97-101
- [73] Park S, Lee C, Ryu C R, et al. Biofiltration for reducing methane emissions from modern sanitary landfills at the low methane generation stage[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2009, 196(1/2/3/4):19-27
- [74] Park S, Brown K, W Thomas J C, et al. Comparison study of methane emissions from landfills with different landfill covers[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(5):933-941
- [75] Lu W J, Chi Z F, Mou Z S, et al. Can a breathing biocover system enhance methane emission reduction from landfill? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 191(1/2/3):228-233
- [76] Wang J, Xia F F, Bai Y, et al. Methane oxidation in landfill waste biocover soil: Kinetics and sensitivity to ambient conditions [J]. Waste Management, 2011, 31(5):864-870
- [77] Feng Q, Liu L, Xue Q, et al. Landfill gas generation and transport in bioreactor landfill[M]//Chen Y M, Tang X W, Zhan L T. Advances in environmental geotechnics-Pro. Int Sym on Geoenviron. Hongzhou: Zhejiang University Press & Springer, 2009:633
- [78] Garg A, Achari G. A comprehensive numerical model simulating gas, heat, and moisture transport in sanitary landfills and methane oxidation in final covers[J]. Environmental Modeling and Assessment, 2010, 15(5):397-410
- [79] Hilger H, Humer M. Biotic landfill cover treatments for mitigating methane emissions[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2003, 84(1/2):71-84

Methane emission factor analysis and methane emission reduction research in landfill: A review

ZHENG Youfei^{1,2,3} ZHOU Wei³ YIN Jifu³ ZHOU Xing³ ZHU Jingjing³

1 Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environmental Monitoring and Pollution Control,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,

Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Landfill methane emission is an important source of anthropogenic greenhouse gases. Its influence on the increasing global greenhouse gas emissions in the entire atmosphere which cause climate effects can not be ignored and it is a serious problem of public nuisance that needs to be solved urgently in the modernization process of the world. The paper summarizes the related formative factors of methane, the present status of waste disposal and methane emission reduction technologies at home and abroad. Methane production is affected by waste characteristics, moisture content, temperature, pH, time, leachate levels and other factors in landfill. The current landfill methane emission reduction technologies include the in situ reduction technique, resource utilization and end control technology. The landfill can achieve the goal of methane emission reduction from the combined effect of various aspects.

Key words landfill; methane; methane emission reduction; waste disposal