

# 村镇生活垃圾不同处置模式下温室气体排放潜力对比研究\*

## ——以湖北埠河镇为例

淦方茂<sup>1</sup>, 吴莉鑫<sup>2</sup>, 虞文波<sup>2</sup>, 胡广<sup>2</sup>, 惠二青<sup>1</sup>, 郭帅<sup>2</sup>

(1. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062; 2. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**【摘要】** 采用政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 清单指南联合生命周期评价 (LCA) 方法, 对我国村镇生活垃圾厌氧填埋、微好氧填埋、堆肥和焚烧 4 种处置工艺下的主要温室气体排放潜力进行对比分析。结果表明, 每吨村镇生活垃圾处置工艺的温室气体排放潜力从大到小依次为: 厌氧填埋 (1 324.72 kgCO<sub>2</sub>eq) > 微好氧填埋 (34.97 kgCO<sub>2</sub>eq) > 焚烧 (1.85 kgCO<sub>2</sub>eq) > 堆肥 (-106.03 kgCO<sub>2</sub>eq)。厌氧填埋的温室气体主要来自厌氧降解产生的 CH<sub>4</sub>; 微好氧填埋的温室气体主要来自厌氧-好氧降解产生的 N<sub>2</sub>O; 堆肥产生的温室气体主要来自生物降解过程产生的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O, 而堆肥产品的再利用能够有效抵消部分温室气体排放; 焚烧的温室气体主要来自焚烧过程化石碳转化生成的 CO<sub>2</sub> 和焚烧厂运行过程的间接排放, 上网发电能有效减少温室气体排放。

**【关键词】** 村镇生活垃圾; 处置工艺; 温室气体排放潜力; 政府间气候变化专门委员会 (IPCC); 生命周期评价 (LCA)

中图分类号: X799.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-8206 (2023) 01-0112-07

DOI: 10.19841/j.cnki.hjwsgc.2023.01.018

### Comparative Study on Greenhouse Gas Emission Potential of Different Disposal Modes of Rural Domestic Waste: A Case Study of Buhe Town, Hubei Province

GAN Fangmao<sup>1</sup>, WU Lixin<sup>2</sup>, YU Wenbo<sup>2</sup>, HU Guang<sup>2</sup>, HUI Erqing<sup>1</sup>, GUO Shuai<sup>2</sup>

(1. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan Hubei 430062; 2. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074)

**【Abstract】** The greenhouse gas (GHG) emission potential of four disposal processes of anaerobic landfill, micro-aerobic landfill, composting and incineration of rural domestic waste were compared and analyzed via the intergovernmental panel on climate change (IPCC) inventory guidelines combined with the life cycle assessment (LCA) method. The results showed that the GHG emission potential of per ton rural domestic waste disposal process from large to small was anaerobic landfill (1 324.72 kgCO<sub>2</sub>eq) > micro-aerobic landfill (34.97 kgCO<sub>2</sub>eq) > incineration (1.85 kgCO<sub>2</sub>eq) > composting (-106.03 kgCO<sub>2</sub>eq). The GHG of anaerobic landfill mainly came from CH<sub>4</sub> produced by anaerobic degradation. The GHG of micro-aerobic landfill mainly came from N<sub>2</sub>O produced by anaerobic-aerobic degradation. The GHG of composting mainly came from CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O produced by biodegradation, and the reuse of the compost product could effectively offset part of the GHG emissions. The GHG of incineration mainly came from CO<sub>2</sub> generated from fossil carbon conversion and indirect emission from incineration plant operation. On-grid power generation could effectively reduce GHG emission.

**【Key words】** rural domestic waste; disposal process; GHG emission potential; intergovernmental panel on climate change (IPCC); life cycle assessment (LCA)

## 1 引言

生活垃圾处置方式主要包括填埋、焚烧和堆肥等, 是温室气体排放的重要来源。其中, 填埋占据生活垃圾行业温室气体排放总量的 60% 以

上<sup>[1]</sup>。随着生活垃圾产生量的逐年增加和用地紧张问题加剧, 垃圾焚烧处置得到不断推广<sup>[2]</sup>。2019 年, 我国城市生活垃圾焚烧比例首次超过填埋比例, 而对于欠发达的村镇地区, 填埋仍然占据 80% 以上的市场<sup>[3]</sup>。得益于温室气体核算方法和工具的发展与成熟, 我国城市层面生活垃圾处置过程的温室气体排放研究取得了很大进展。Lou 等<sup>[4]</sup>采用政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 推

\*基金项目: 国家重点研发计划专项 (2018YFD1100604); 武汉市科技计划项目 (2020020601012277); 中国长江三峡集团有限公司科研项目 (202101356); 长江生态环保集团有限公司科研项目 (HB/ZB2021138)

收稿日期: 2022-09-02; 录用日期: 2022-11-10

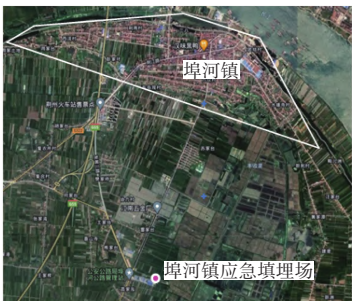
荐的一阶衰减（FOD）模型对 1949—2013 年我国城市生活垃圾处置温室气体排放情况进行了评估，结果显示温室气体总排放量由 0.36 MtCO<sub>2</sub>eq 增长至 72.4 MtCO<sub>2</sub>eq，主要排放源为垃圾填埋场。但该研究侧重于废物处理过程的温室气体直接排放，忽略了收集和运输过程产生的温室气体。Liu 等<sup>[5]</sup>通过 IPCC 计算方法分析了上海 2005—2015 年城市固体废物（MSW）处置过程的温室气体排放，发现焚烧处置的温室气体排放强度（以 MSW 计）为 0.147~0.177 kgCO<sub>2</sub>eq/kg，低于填埋和堆肥。Lee 等<sup>[6]</sup>对填埋气回收利用技术进行了生命周期评价（LCA）研究，当填埋气被收集用于发电时，能减少填埋过程中 44% 的温室气体排放。然而，村镇生活垃圾具有产生量小、产生地分散、难以收集等特点，因此在收运、处理工艺和处置规模等方面与 MSW 相比存在明显差异<sup>[7]</sup>。受限于数据获取难度大，村镇层面的生活垃圾处置过程的温室气体排放研究鲜有报道。

本研究以湖北省埠河镇垃圾处置为案例，采用 IPCC 清单指南结合 LCA 方法，对村镇生活垃圾厌氧填埋、微好氧填埋、堆肥和焚烧 4 种处置情景下的主要温室气体（CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O）产生来源及排放潜力进行对比研究，为我国村镇生活垃圾低碳处置提供数据基础，助力国家“双碳”战略目标的实现。

2 生活垃圾基本特性与温室气体排放计算方法

2.1 生活垃圾的基本特性

湖北省荆州市埠河镇位于我国中南部，濒临长江，总面积约 230 km<sup>2</sup>，户籍人口约 9.4 万人。当地生活垃圾清运量约为 30 t/d，大部分定期收运至当地应急填埋场进行填埋处置，部分垃圾集中外运至荆州市区焚烧厂进行处理，形成以填埋为主、焚烧为辅的垃圾处置模式。埠河镇及当地填埋场地理分布如图 1 所示。



注：图片来源于百度地图 [https://map.baidu.com/@12495169.67784272,3519071.4525271966,14.33z/maptype%3DB\\_EARTH\\_MAP](https://map.baidu.com/@12495169.67784272,3519071.4525271966,14.33z/maptype%3DB_EARTH_MAP)。

图 1 埠河镇地理位置  
Figure 1 The geographical location of Buhe Town

根据笔者团队前期研究<sup>[8]</sup>，得到埠河镇生活垃圾组成及相关特性（表 1）。

表 1 埠河镇生活垃圾特性  
Table 1 Characteristics of domestic waste in Buhe Town

| 物理组成 | 质量分数/% | 干物质    | 干物质   | 矿物碳    | 生物碳   |
|------|--------|--------|-------|--------|-------|
|      |        | 质量分数%  | 碳含量/% | 含量/%   | 含量/%  |
| 厨余   | 62.05  | 40.00  | 38.00 |        | 15.00 |
| 纸类   | 9.04   | 55.00  | 46.00 | 1.00   | 40.00 |
| 橡塑   | 15.95  | 65.00  | 75.00 | 60.00  | 39.00 |
| 纺织   | 5.76   | 72.00  | 50.00 | 20.00  | 24.00 |
| 木竹   | 1.07   | 82.00  | 50.00 |        | 43.00 |
| 灰土   | 0.62   | 91.00  | 3.00  | 100.00 |       |
| 砖瓦陶瓷 | 1.67   | 100.00 |       |        |       |
| 玻璃   | 1.92   | 99.00  |       |        |       |
| 金属   | 0.92   | 96.00  |       |        |       |
| 混合   | 0.78   | 97.00  |       |        |       |
| 其他   | 0.22   | 96.00  | 3.00  | 100.00 |       |

注：空白项表示无数据，在计算中取值为“0”。

2.2 各温室气体排放量计算方法

本研究的基准为单位质量（1 t）村镇生活垃圾的处置，包括处置过程中物质和能量的输入、输出及产生的污染物（图 2）。首先，通过 IPCC 清单指南对厌氧填埋、微好氧填埋、堆肥和焚烧 4 种垃圾处置方式下产生的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 3 种温室气体量进行计算。然后，借助 eFootprint 生命周期评价软件，计算全球变暖潜值（GWP，单位：kgCO<sub>2</sub>eq）指标，作为温室气体排放潜力的结果。在填埋和堆肥过程中，生物碳分解产生的 CO<sub>2</sub> 不纳入评价范围。填埋堆体稳定后储存于填埋场的未降解有机碳、堆肥和焚烧过程中产生的能源及可回用物质的温室气体排放潜力取负值。

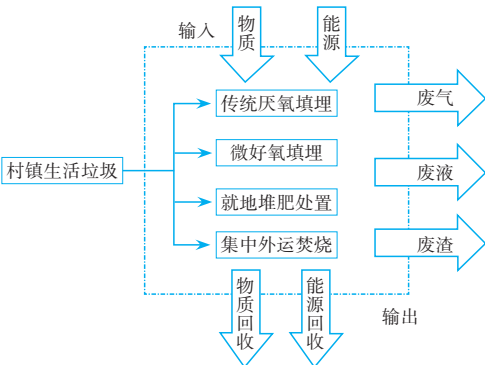


图 2 村镇生活垃圾处置过程的系统边界  
Figure 2 System boundary of rural domestic waste disposal process

2.2.1 垃圾填埋处置温室气体排放计算

本研究中填埋方式包括厌氧填埋和微好氧填埋两种。其中，微好氧填埋是一种在较低通风量条件下实现生活垃圾无害化的处置技术。微好氧

填埋堆体内部存在厌氧区、好氧区和兼氧区, 相较厌氧填埋处置效率提高, 相对好氧填埋建运成本降低<sup>[9]</sup>。

#### 1) 填埋场温室气体排放。

以单位质量 (1 t) 村镇生活垃圾为基准, 根据埤河镇生活垃圾特性, 通过 IPCC 推荐的计算方法对垃圾填埋生物降解过程中 CH<sub>4</sub> 排放量进行计算, 详见公式 (1) 和公式 (2), 部分参数参考 IPCC 缺省值<sup>[10]</sup>。

$$E_{\text{CH}_4} = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \times F \times \frac{16}{12} \times (1 - R_i) \times (1 - \text{OX}) \quad (1)$$

$$\text{DOC} = \sum \text{DOC}_i \times f_i \quad (2)$$

式中:  $E_{\text{CH}_4}$  为甲烷排放量, t;  $W$  为生活垃圾质量, t;  $\text{DOC}$  为垃圾可降解有机碳, t;  $\text{DOC}_i$  为垃圾成分  $i$  的可降解有机碳, t;  $f_i$  为垃圾成分  $i$  的比例, %;  $\text{DOC}_f$  为可分解的  $\text{DOC}$  比例, %, 缺省值为 50%;  $\text{MCF}$  为 CH<sub>4</sub> 修正因子;  $F$  为填埋气中 CH<sub>4</sub> 比例, %;  $R_i$  为 CH<sub>4</sub> 回收率, %;  $\text{OX}$  为氧化因子; 16/12 为 CH<sub>4</sub> 与 C 的分子量比率。厌氧填埋情景下,  $\text{MCF}$  取 0.8,  $F$  取 50%; 微好氧填埋情景下,  $\text{MCF}$  取 0.5,  $F$  取 2%,  $R_i$  和  $\text{OX}$  在两种情景下均取 0。其余参数 ( $\text{DOC}$ 、 $\text{DOC}_i$  和  $f_i$ ) 根据中试填埋现场垃圾组分实测数据进行计算<sup>[8,11]</sup>。

#### 2) 填埋场碳固存。

垃圾中的有机碳部分会通过生化反应降解为 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>, 未降解部分将长期储存于填埋场中, 后者称为碳固存 ( $\text{DOC}_{\text{se}}$ ), 固存量计算如公式 (3) 所示<sup>[10]</sup>:

$$\text{DOC}_{\text{se}} = W \times \text{DOC} \times (1 - \text{DOC}_f) \times \text{MCF} \quad (3)$$

### 2.2.2 垃圾堆肥处置温室气体排放计算

垃圾堆肥过程产生的 CO<sub>2</sub> 属于生物碳, 因此不纳入温室气体总量计算中。堆肥过程产生的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 气体量计算如公式 (4) 和公式 (5) 所示<sup>[10]</sup>:

$$E_{\text{CH}_4} = \sum (M \times \text{EF}_i) - R \quad (4)$$

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = \sum (M \times \text{EF}_i) \quad (5)$$

式中:  $M$  为有机固废质量, t;  $\text{EF}_i$  为排放因子, kg/t;  $R$  为清单报告年回收 CH<sub>4</sub> 总量, t。根据 IPCC 缺省值, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放因子分别取 4 kg/t ( $\text{EF}_1$ , 以 CH<sub>4</sub> 计) 和 0.3 kg/t ( $\text{EF}_2$ , 以 N<sub>2</sub>O 计),  $R$  取 0。

### 2.2.3 垃圾焚烧处置温室气体排放计算

垃圾焚烧过程中各温室气体排放计算如公式

(6)~公式 (8) 所示<sup>[10]</sup>:

#### 1) CO<sub>2</sub> 排放量。

$$E_{\text{CO}_2} = \sum (\text{SW} \times \text{DM} \times \text{CF} \times \text{FCF} \times \text{OF}) \times \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中:  $\text{SW}$  为废弃物质量, t;  $\text{DM}$  为废弃物中的干物质含量, %;  $\text{CF}$  为干物质中的碳含量, %;  $\text{FCF}$  为总碳中的化石碳含量, %;  $\text{OF}$  为氧化系数, %, 缺省值为 95%; 44/12 是 CO<sub>2</sub> 和 C 的分子量比率。

#### 2) CH<sub>4</sub> 排放量。

$$E_{\text{CH}_4} = \sum (\text{SW} \times \text{EF}_3) \quad (7)$$

式中:  $\text{EF}_3$  为 CH<sub>4</sub> 排放因子, kg/t, 缺省值为 0.2。

#### 3) N<sub>2</sub>O 排放量。

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = \sum (\text{SW} \times \text{EF}_4) \quad (8)$$

式中:  $\text{EF}_4$  为 N<sub>2</sub>O 排放因子, kg/t, 缺省值为 0.05。

公式 (1)~公式 (8) 部分出现变量的来源见表 2。

表 2 变量取值来源  
Table 2 Value source of the variables

| 变量             | 来源                             |
|----------------|--------------------------------|
| $\text{DOC}_f$ | IPCC 2006 缺省值                  |
| $\text{MCF}$   | IPCC 2006 缺省值                  |
| $F$            | IPCC 2006 缺省值、中试现场实测([8]、[11]) |
| $\text{EF}_1$  | IPCC 2006 缺省值                  |
| $\text{EF}_2$  | IPCC 2006 缺省值                  |
| $\text{OF}$    | IPCC 2006 缺省值                  |
| $\text{EF}_3$  | IPCC 2006 缺省值                  |
| $\text{EF}_4$  | IPCC 2006 缺省值                  |

## 3 村镇生活垃圾产生现状及处置工艺分析

### 3.1 厌氧填埋

居民日常生活垃圾投至附近垃圾桶/箱后, 由清运车收运至埤河镇应急填埋场, 进行厌氧填埋处置。填埋过程产生的渗滤液通过导排管进入渗滤液收集池, 定期用槽罐车外运至荆州市污水处理厂进行处置。填埋过程产生的填埋气体量较小, 从经济性和资源利用率等方面来看, 不适宜进行回收利用 (如回收发电、直接收集燃烧等), 因此填埋气体未经处置直接排放至大气中, 工艺流程如图 3 所示。

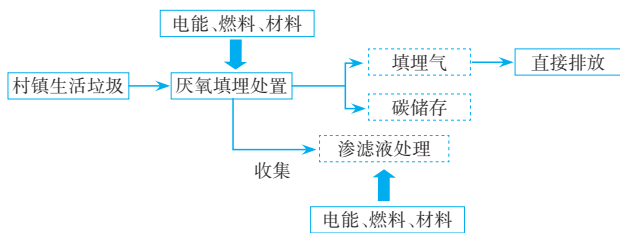


图3 村镇生活垃圾厌氧填埋处置工艺

Figure 3 Anaerobic landfill disposal process of rural domestic waste

### 3.2 微好氧填埋

微好氧填埋垃圾收运方式同厌氧填埋一致,通过小单元填埋模式与通风管实现自然通风环境,促进堆体稳定化,减少二次污染。产生的渗滤液和填埋气采取与厌氧填埋相同的处置方式。处置工艺流程如图4所示。

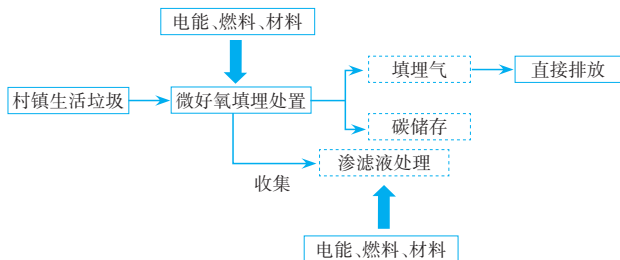


图4 村镇生活垃圾微好氧填埋处置工艺

Figure 4 Micro-aerobic landfill disposal process of rural domestic waste

### 3.3 堆肥

村镇生活垃圾清运收集至中转站后进行初步分选,分为干垃圾和湿垃圾,湿垃圾即易腐有机垃圾直接进入堆肥中心进行堆肥处理,干垃圾由分拣员按照可回收垃圾、有害垃圾和其他垃圾“三分类”法进行二次分拣,可回收垃圾定期收集外运进行回收利用,有害垃圾阶段性外运至危废处理厂进行处置,其他垃圾直接运至填埋场进行填埋处理,工艺流程如图5所示。根据埠河镇垃圾组成,湿垃圾、可回收垃圾、有害垃圾与其他垃圾的占比分别为62.05%、33.59%、0.78%和3.58%。

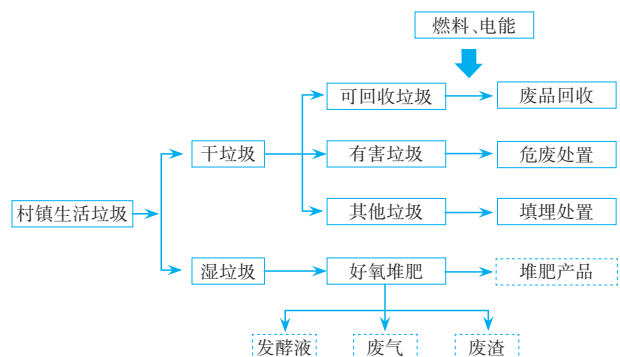


图5 村镇生活垃圾堆肥处置工艺

Figure 5 Composting disposal process of rural domestic waste

### 3.4 焚烧

村镇生活垃圾清运收集后集中转运至生活垃圾焚烧发电厂进行处置。混合垃圾在储料坑中完成预发酵后通过进料装置进入焚烧系统中进行处置。发酵产生的渗滤液输送至厂内渗滤液处理站处理,焚烧产生的飞灰通过螯合固化处置后外运至填埋场填埋,产生的废渣委托外运进行综合利用,烟气通过配套烟气净化系统处置,焚烧过程产生的能量发电再利用,工艺流程如图6所示。

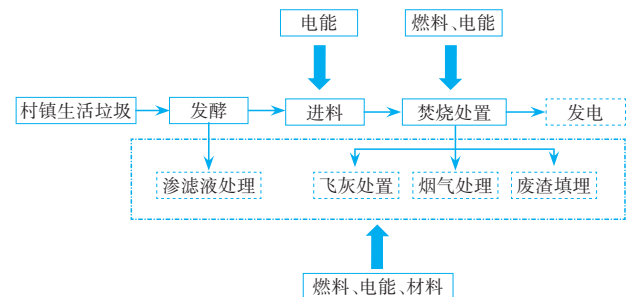


图6 村镇生活垃圾焚烧处置工艺

Figure 6 Incineration disposal process of rural domestic waste

本研究中村镇生活垃圾各处置方式的二次污染物输出如渗滤液、废水、废渣、可回收垃圾、有害垃圾、飞灰、炉渣等,采用 eFootprint 软件计算其 GWP,作为各二次污染物处理环节的碳排放结果。

## 4 结果与讨论

### 4.1 村镇生活垃圾不同处置工艺排放清单分析

#### 4.1.1 填埋处置清单分析

垃圾填埋处置过程的清单如表3所示,包括厌氧填埋和微好氧填埋两种模式。温室气体排放包括直接排放和间接排放,直接排放的温室气体主要来自垃圾生化降解产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ,间接排放主要来自填埋机械作业过程中所消耗的燃料,填埋后覆膜消耗的 HDPE 材料及填埋场运行维护过程所消耗的电能。填埋后渗滤液处置过程温室气体排放主要来自渗滤液运输及处置过程消耗的物料、燃料和电能。由于村镇小型简易填埋场未配备填埋气回收利用设备,故填埋气回收发电不纳入清单计算范围内。本研究中评价的微好氧填埋是通过在小单元填埋堆体内部设置通风管道,利用填埋场内外温差形成动力差,使外部空气主动进入堆体内部,以实现自然通风的微好氧环境,处置过程中的电能消耗与厌氧填埋保持一致。因此,计算时微好氧填埋的电能输入与厌氧填埋相同。处置过程排放数据来自埠河镇填埋场实测数据,填埋场运行能耗数据参考相关文献<sup>[12]</sup>。

表 3 单位质量(1 t) 村镇生活垃圾填埋处置清单  
Table 3 Landfill disposal inventory of unit mass(1 t) rural domestic waste

| 项目 |                     | 厌氧填埋   | 微好氧填埋  |
|----|---------------------|--------|--------|
| 输入 | 柴油/kg               | 2.09   | 2.09   |
|    | HDPE/kg             | 0.45   | 0.45   |
|    | 电能/kWh              | 1.76   | 1.76   |
| 输出 | CH <sub>4</sub> /kg | 55.96  | 0.50   |
|    | N <sub>2</sub> O/kg | 0.02   | 0.24   |
|    | 渗滤液/kg              | 92.84  | 47.65  |
|    | 碳固存/kg              | -83.95 | -52.47 |

4.1.2 堆肥处置清单分析

垃圾堆肥处置过程物质及能量输入输出的清单如表 4 所示。能源消耗及废弃物产生相关数据来自涪陵李渡镇生活垃圾堆肥化处理示范项目环评报告, 清单数据参考该服务区域近 15 年垃圾产生情况及实际运行数据。该示范项目采取仓式好氧堆肥工艺, 日处理生活垃圾 70 t。垃圾堆肥处置过程直接排放的温室气体主要来自生化反应产生的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O, 间接温室气体排放主要来自堆肥厂运行过程及垃圾分选后产生的有害垃圾、堆肥处置后产生的废水废渣的运输及处置过程所需能耗。

表 4 单位质量(1 t) 村镇生活垃圾堆肥处置清单  
Table 4 Composting disposal inventory of unit mass(1 t) rural domestic waste

| 项目 |                     | 数量      |
|----|---------------------|---------|
| 输入 | 电能/kWh              | 58.80   |
|    | CH <sub>4</sub> /kg | 4.00    |
| 输出 | N <sub>2</sub> O/kg | 0.30    |
|    | 堆肥产品/kg             | -198.43 |
|    | 废水/kg               | 487.14  |
|    | 废渣/kg               | 165.29  |
|    | 可回收垃圾/kg            | 335.90  |
|    | 有害垃圾/kg             | 7.80    |

表 6 单位质量(1 t) 村镇生活垃圾不同处置工艺下温室气体排放潜力  
Table 6 Greenhouse gas emission potential of unit mass(1 t) rural domestic waste under different disposal processes

| 垃圾处置工艺  | 厌氧填埋/(kgCO <sub>2</sub> eq/t) | 微好氧填埋/(kgCO <sub>2</sub> eq/t) | 堆肥/(kgCO <sub>2</sub> eq/t) | 焚烧/(kgCO <sub>2</sub> eq/t) |
|---------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 处置直接排放  | 1 404.96                      | 84.02                          | 168.70                      | 300.02                      |
| 处置间接排放  | 3.11                          | 3.11                           | 40.75                       | 100.66                      |
| 渗滤液外运处置 | 0.60                          | 0.31                           | 1.36                        |                             |
| 碳固存     | -83.95                        | -52.47                         |                             |                             |
| 废弃物外运处置 |                               |                                | 3.16                        | 3.33                        |
| 堆肥产品    |                               |                                | -320.00                     |                             |
| 上网发电    |                               |                                |                             | -402.16                     |
| 合计      | 1 324.72                      | 34.97                          | -106.03                     | 1.85                        |

注: 空白项表示无数据, 在计算中取值为“0”。

村镇生活垃圾厌氧填埋处置温室气体排放潜

4.1.3 焚烧处置清单分析

生活垃圾焚烧处置清单如表 5 所示, 包括焚烧处置阶段和污染物处置阶段能源消耗和环境排放数据, 相关数据参考荆州市旺能焚烧发电厂环境影响评价报告。该焚烧厂位于荆州市公安县夹竹园镇前进村, 日处理生活垃圾 750 t, 处理装置为机械炉排炉, 配备 25 MW 凝气式汽轮发电机组, 同步建设焚烧炉灰渣处理、烟气处理系统及渗滤液处理站等环保设施。垃圾焚烧处理过程的直接排放主要为垃圾焚烧产生的 CO<sub>2</sub> 等, 间接温室气体排放主要来自焚烧厂运行消耗的煤、柴油等原料。

表 5 单位质量(1 t) 村镇生活垃圾焚烧处置清单  
Table 5 Incineration disposal inventory of unit mass(1 t) rural domestic waste

| 项目 |                     | 数量       |
|----|---------------------|----------|
| 输入 | 柴油/kg               | 0.50     |
|    | 标煤/kg               | 286.96   |
|    | 水/kg                | 2 615.53 |
|    | 消石灰/kg              | 10.96    |
|    | 活性炭/kg              | 0.46     |
|    | 氨水/kg               | 3.20     |
|    | 螯合剂/kg              | 0.67     |
| 输出 | CO <sub>2</sub> /kg | 286.90   |
|    | CH <sub>4</sub> /kg | 0.000 2  |
|    | N <sub>2</sub> O/kg | 0.05     |
|    | 飞灰/kg               | 33.30    |
|    | 炉渣/kg               | 233.80   |
|    | 电能/kWh              | -518.72  |

4.2 村镇生活垃圾不同处置情景下温室气体排放结果分析

根据清单数据, 将直接排放的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量换算为 CO<sub>2</sub> 当量进行统一计算, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 折算系数分别为 25 和 298<sup>[13]</sup>。各处置工艺下村镇生活垃圾的温室气体排放情况如表 6 所示。

力为 1 324.72 kgCO<sub>2</sub>eq/t, Yang 等<sup>[14]</sup> 计算得到的无

填埋气处置厌氧填埋场温室气体排放潜力为 998 kgCO<sub>2</sub>eq/t。Yay 等<sup>[15]</sup>研究得出,在未配备填埋气回收系统的情景下,单位垃圾温室气体排放潜力为 1 840 kgCO<sub>2</sub>eq/t。主要温室气体来源为垃圾厌氧填埋过程生物降解直接排放的 CH<sub>4</sub>,渗滤液运输、填埋场机械操作过程消耗的能源及材料产生的 GWP 仅为 0.60 kg CO<sub>2</sub>eq/t 与 3.11 kgCO<sub>2</sub>eq/t。此外,还有大量未降解生物碳固存于填埋场中,主要为不可降解或难降解物质。村镇生活垃圾微好氧填埋过程产生的总 GWP 为 34.97 kgCO<sub>2</sub>eq/t,较厌氧填埋减排量为 1 289.75 kgCO<sub>2</sub>eq/t。

村镇生活垃圾堆肥处理温室气体排放潜力为 -106.03 kgCO<sub>2</sub>eq/t,较厌氧填埋减排量为 1 430.75kgCO<sub>2</sub>eq/t。其中垃圾堆肥直接排放的温室气体总量为 168.70 kgCO<sub>2</sub>eq/t,而堆肥过程产生的堆肥产品能够抵消掉一部分生产过程产生的温室气体,起到显著的减排效果。堆肥预处理、废弃物处理等过程间接排放的温室气体总量为 45.27 kgCO<sub>2</sub>eq/t。

村镇生活垃圾焚烧处置温室气体排放总量为 1.85 kgCO<sub>2</sub>eq/t,较厌氧填埋减排量为 1 322.87 kg CO<sub>2</sub>eq/t。其中垃圾焚烧处置过程直接排放 300.02 kgCO<sub>2</sub>eq/t,焚烧厂运行过程中能源和物料投入产生的间接排放占比也不容忽视,排放量为 100.66 kg CO<sub>2</sub>eq/t。但由于垃圾焚烧发电厂可以利用处置过程产生的能源进行发电,上网发电部分抵消了绝大部分垃圾焚烧排放的温室气体,与 Nabavi-Pelesaraei 等<sup>[16]</sup>对 MSW 处置 LCA 所得结论基本一致。何晶晶等<sup>[17]</sup>也发现上网发电能够减少温室气体排放量。因此,将生活垃圾的处理方式由填埋改为焚烧是减少温室气体排放总量的有效措施。

4 种垃圾处置工艺中厌氧填埋温室气体排放潜力最高,其次是微好氧填埋,能够有效实现温室气体减排。焚烧和堆肥处置在物质和能源回收方面具有较强的优势,其中垃圾堆肥处置总排放潜力最低,提高堆肥产品的再利用率是提高该处置工艺适用性的重要环节。Wang 等<sup>[18]</sup>同样采用 IPCC 2006 方法计算了 2003—2012 年我国 31 个省份的 MSW 碳排放量,发现卫生填埋、简易填埋、焚烧、堆肥的碳排放量分别为 1.16、0.79、0.51、0.30 kgCO<sub>2</sub>eq/kg。上述结果与本研究相似,但 MSW 由于化石碳含量较高,其产生的碳排放也高于本研究村镇生活垃圾所产生的碳排放。微好氧填埋直接温室气体排放量最小,由于不具备能源

回收系统,导致净排放量较焚烧和堆肥处置更高。未来若开发村镇生活垃圾填埋气的 CO<sub>2</sub>分离与提质技术,提质后的填埋气可以作为当地天然气资源,对于温室气体减排具有积极意义。

## 5 结论与建议

依据 IPCC-LCA 方法,结合实际企业环评报告及实验所得数据,对比研究了村镇生活垃圾在厌氧填埋、微好氧填埋、堆肥及焚烧 4 种处置情景下的温室气体排放潜力,识别了各处置方式的关键碳排放项目,可为我国村镇生活垃圾治理、推进地区减污降碳提供指导,具体结论如下:

1) 每吨生活垃圾处置过程温室气体排放潜力由大到小依次为:厌氧填埋 (1 324.72 kgCO<sub>2</sub>eq) > 微好氧填埋 (34.97 kgCO<sub>2</sub>eq) > 焚烧 (1.85 kgCO<sub>2</sub>eq) > 堆肥 (-106.03 kgCO<sub>2</sub>eq)。

2) 厌氧填埋温室气体排放主要来自厌氧降解产生的 CH<sub>4</sub>;微好氧填埋温室气体排放主要来自厌氧-好氧降解产生的 N<sub>2</sub>O;焚烧温室气体排放主要来自焚烧过程化石碳转化生成的 CO<sub>2</sub>和焚烧厂运行过程的间接排放,垃圾堆肥过程温室气体排放主要来自生物降解过程产生的 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O。

3) 垃圾处置过程中能源和物质的再利用如上网发电、堆肥产品回收等能够有效抵消垃圾处置过程的温室气体排放。

## 参考文献:

- [1] ZHAO Z Y, BIAN R X, ZHAO F B, et al. Implications of municipal solid waste disposal methods in China on greenhouse gas emissions [J]. Environmental Process & Sustainable Energy, 2020, 39(3): 13372-13378.
- [2] LIAO N L, BOLDYARD S C, LYU F, et al. Can waste management system be a greenhouse gas sink? Perspective from Shanghai, China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106170.
- [3] CHAI F G, LI P Y, LI L, et al. Dispersion, olfactory effect, and health risks of VOCs and odors in a rural domestic waste transfer station [J]. Environmental Research, 2022, 209: 112879.
- [4] LOU Z Y, CAI B F, ZHU N W, et al. Greenhouse gas emission inventories from waste sector in China during 1949—2013 and its mitigation potential [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 157: 118-124.
- [5] LIU Y J, CHEN S Q, CHEN A J Y, et al. Variations of GHG emission patterns from waste disposal processes in megacity Shanghai from 2005 to 2015 [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126338.
- [6] LEE U, HAN J, WANG M. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166(10): 335-342.

- [7] CHEN C C. A performance evaluation of MSW management practice in Taiwan [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(12):1353-1361.
- [8] 吴莉鑫,薛映,虞文波,等.南方多雨地区村镇垃圾理化特性分析及对比研究[J].环境卫生工程,2021,29(6):59-66.  
WU L X, XUE Y, YU W B, et al. Analysis and comparative study on physicochemical characteristics of rural waste in rainy areas of Southern China[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(6):59-66.
- [9] 杨旭,刘岩.准好氧填埋场通风系统设计研究[J].环境卫生工程,2019,27(5):64-68.  
YANG X, LIU Y. Study on design of the air ventilation system in semi-aerobic landfill [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, 27(5):64-68.
- [10] BIAN R X, ZHANG T X, ZHAO F B, et al. Greenhouse gas emissions from waste sectors in China during 2006—2019: Implications for carbon mitigation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 161:488-497.
- [11] 关文义,金攀,卞士杰,等.南方多雨地区村镇垃圾填埋渗滤液产生量和水质特性研究[J].环境卫生工程,2021,29(5):81-87,93.  
GUAN W Y, JIN P, BIAN S J, et al. Study on the output and water quantity characteristics of landfill leachate of rural waste in the rainy area of Southern China [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(5):81-87,93.
- [12] 李楠,池涌,周昭志,等.易腐垃圾生物处置的典型案例与全生命周期评价[J].能源工程,2020(4):42-49.  
LI N, CHI Y, ZHOU Z Z, et al. Typical cases and life cycle assessment of biotechnology treatment of rotten garbage [J]. Energy Engineering, 2020(4):42-49.
- [13] 王芝麟,邹彬,张涵,等.南方红壤丘陵区不同土地利用方式土壤  $N_2O$  排放系数研究[J].南方农业学报,2021,52(8):2193-2201.
- WANG Z L, ZOU B, ZHANG H, et al. Differences in soil  $N_2O$  emission coefficients of different land use types in red soil hilly areas in Southern China [J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(8):2193-2201.
- [14] YANG N, ZHANG H, SHAO L M, et al. Greenhouse gas emissions during MSW landfilling in China: Influence of waste characteristics and LFG treatment measures [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129:510-521.
- [15] YAY A S E. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: A case study of Sakarya [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 94:284-293.
- [16] NABAVI-PELESARAEI A, BAYAT R, HOSSEINZADEH-BANDBAFHA H, et al. Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management: A case study in Tehran Metropolis of Iran [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148:427-440.
- [17] 何晶晶,陈森,杨娜,等.我国生活垃圾焚烧发电过程中温室气体排放及影响因素:以上海某城市生活垃圾焚烧发电厂为例[J].中国环境科学,2011,31(3):402-407.  
HE P J, CHEN M, YANG N, et al. GHG emissions from Chinese MSW incineration and their influencing factors: Case study of one MSW incineration plant in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2011, 31(3):402-407.
- [18] WANG Z H, GENG L W. Carbon emissions calculation from municipal solid waste and the influencing factors analysis in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104:177-184.

第一作者:涂芳茂(1986—),高级工程师,硕士,主要从事环境卫生工程及市政给排水项目设计、建设和运营管理等研究。E-mail: gan\_fangmao@ctg.com.cn。

通信作者:虞文波(1989—),副研究员,博士,主要从事有机固废处理处置与资源化研究。E-mail: yuwenbo@hust.edu.cn。

(上接第111页)

- chemical characteristics of MSW in Shanghai from 1986 to 2019 [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(3):20-25.
- [20] 杨娜,邵立明,何晶晶.我国城市生活垃圾组分含水率及其特征分析[J].中国环境科学,2018,38(3):1033-1038.  
YANG N, SHAO L M, HE P J. Study on the moisture content and its features for municipal solid waste fractions in China [J]. China Environmental Science, 2018, 38(3):1033-1038.
- [21] 王晋,李定龙,张凤娥.江苏省城市生活垃圾特征分析[J].环境科学与管理,2005,30(6):42-44.  
WANG J, LI D L, ZHANG F E. The character of municipal solid waste of Jiangsu Province [J]. Environmental Science and Management, 2005, 30(6):42-44.
- [22] 陈红霞.华南地区生活垃圾分类处理前后物理特性变化分析[J].低碳世界,2019,9(6):16-17.  
CHEN H X. Analysis of changes in physical characteristics before and after the classification and treatment of domestic waste in South China [J]. Low Carbon World, 2019, 9(6):16-17.
- [23] 黄静颖,张浩,谭钦怀,等.小型垃圾热解气化焚烧厂碳排放计算[J].环境卫生工程,2021,29(4):1-6.  
HUANG J Y, ZHANG H, TAN Q H, et al. Calculation of carbon emissions of a small scale waste pyrolysis-gasification incineration plant [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2021, 29(4):1-6.
- [24] 王龙,李颖.北京市生活垃圾焚烧发电厂温室气体排放及影响因素[J].环境工程学报,2017,11(12):6490-6496.  
WANG L, LI Y. Greenhouse gas (GHG) emissions and its influencing factors in Beijing municipal solid waste incineration power plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(12):6490-6496.
- [25] 邹昕.垃圾分类后焚烧厂碳排放变化情况研究[J].清洗世界,2022,38(4):85-86,160.  
ZOU X. Study on the change of carbon emissions of incineration plants after garbage classification [J]. Cleaning World, 2022, 38(4):85-86,160.
- [26] 冯玮.垃圾焚烧发电的温室气体减排潜力研究[D].太原:太原理工大学,2019.  
FENG W. Research on greenhouse gas mitigation potential of municipal solid waste incineration for power generation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

第一作者:孙雨清(1971—),高级工程师,主要从事生活固废管理工作。E-mail:1372568778@qq.com。

通信作者:储思琴(1996—),助理工程师,主要从事环境卫生监测、环保咨询工作。E-mail: sqchu96@163.com。