

# 生活垃圾分类对固体废弃物和温室气体协同减排的影响研究

## ——以浙江省为例

林成森, 陈丽君, 吴洁珍

(浙江省发展规划研究院, 杭州 310012)

**【摘要】**通过垃圾分类解决垃圾处理问题、促进资源循环利用已成为普遍共识,生活垃圾分类对垃圾处理过程温室气体减排的协同作用日益凸显。废弃物处理是浙江省温室气体排放尚未达峰的领域之一,因此废弃物处理领域特别是生活垃圾处理领域的温室气体减排,对浙江省温室气体排放全面达峰至关重要。本研究基于生活垃圾处理过程温室气体排放核算方法,设定到2022年浙江省未全面推进生活垃圾分类和全面推进生活垃圾分类两个情景,预测和比较两种情景下生活垃圾产生量、分类回收量及处理过程产生的温室气体排放量。结果显示,通过推进生活垃圾分类,生活垃圾处理过程温室气体排放量减少24%,且焚烧处理过程减排效果更明显,可促成生活垃圾处理温室气体排放的提前达峰。基于上述结论,本研究最后针对生活垃圾分类工作及末端处理方式提出了三点建议。

**【关键词】**生活垃圾分类;温室气体;协同减排

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1673-288X(2021)01-0090-05

DOI:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202101090

废弃物处理领域温室气体排放是温室气体排放的重要组成部分之一。在推动温室气体减排的政策背景下,进一步推进废弃物处理领域温室气体排放管控具有重要意义。相关研究显示,浙江省工业生产过程和农业活动两个领域的温室气体排放已出现历史峰值,并呈逐步下降趋势;能源活动排放随经济发展持续上升,尚未达到峰值;而废弃物处理领域排放量则呈波动上升状态。生活垃圾处理过程温室气体排放占废弃物处理领域的比例从2012年的51%增长至2016年的66%,占比逐年增加。因此,废弃物处理领域特别是生活垃圾处理的温室气体减排,对浙江省温室气体排放全面达峰至关重要。

## 1 浙江省生活垃圾产生及处理概况

### 1.1 生活垃圾产生清运情况

近年来浙江省全面部署坚决打赢垃圾治理攻坚战,城镇生活垃圾分类清运体系不断完善。根据《2018年浙江城市建设统计年鉴》,2017年全省城镇生活垃圾清运量为1729.72万吨,较2016年降低0.07%,生活垃圾清运量首次出现下降。

### 1.2 生活垃圾处理处置情况

根据《2018年浙江城市建设统计年鉴》,截至

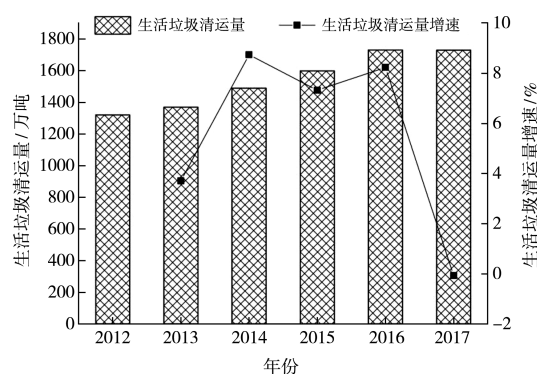


图1 浙江省历年城镇生活垃圾清运量及增速

2017年底,浙江省城镇生活垃圾无害化处理总量为1729.72万吨,其中焚烧处理933.21万吨,占比54.0%;卫生填埋处理量755.18万吨,占比43.6%;其它无害化处理量41.32万吨,占比2.4%。焚烧处理方式正逐步替代卫生填埋成为浙江省生活垃圾处理的最主要方式。

## 2 生活垃圾处理产生的温室气体排放测算方法

### 2.1 焚烧处理温室气体排放测算方法

《浙江省温室气体清单编制指南(2018年修订版)》(以下简称《指南》)推荐的废弃物焚化和

露天燃烧产生的二氧化碳排放量估算公式如下:

$$E_{\text{CO}_2} = \sum_i (IW_i \times CCW_i \times FCF_i \times EF_i \times 44/12)$$

式中,  $E_{\text{CO}_2}$  指废弃物焚烧处理的二氧化碳排放量(万吨/年);  $i$  分别表示城市固体废弃物、危险废弃物、污泥;  $IW_i$  指第  $i$  种类型废弃物的焚烧量(万吨/年);  $CCW_i$  指第  $i$  种类型废弃物中的碳含量比例;  $FCF_i$  指第  $i$  种类型废弃物中矿物碳在碳总量中比例;  $EF_i$  指第  $i$  种类型废弃物焚烧炉的燃烧效率;  $44/12$  指碳转换成二氧化碳的转换系数。

本研究只针对城镇生活垃圾进行测算, 不涉及危险废弃物、污泥等。

## 2.2 填埋处理温室气体排放测算方法

根据《指南》中推荐的质量平衡法, 该方法假设所有潜在的甲烷均在处理当年就全部排放完, 估算公式为:

$$E_{\text{CH}_4} = (MSW_T \times MSW_F \times L_0 - R) \times (1 - OX)$$

式中,  $E_{\text{CH}_4}$  指甲烷排放量(万吨/年);  $MSW_T$  指总的城市固体废弃物产生量(万吨/年);  $MSW_F$  指城市固体废弃物填埋处理率;  $L_0$  指各管理类型垃圾填埋场的甲烷产生潜力(万吨甲烷/万吨废弃物);  $R$  指甲烷回收量(万吨/年);  $OX$  指氧化因子。

其中:

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12$$

式中,  $MCF$  指各管理类型垃圾填埋场的甲烷修正因子(比例);  $DOC$  指可降解有机碳(千克碳/千克废弃物);  $DOC_F$  指可分解的  $DOC$  比例;  $F$  指垃圾填埋气体中的甲烷比例;  $16/12$  指甲烷/碳分子量比率。

## 3 浙江省推进生活垃圾分类的温室气体协同减排效益测算

### 3.1 生活垃圾分类现状

浙江省城镇生活垃圾分类工作稳步推进, 生活垃圾分类覆盖率不断提高。2017 年浙江省设区市城区生活垃圾分类收集覆盖面达到 70%, 生活垃圾无害化处理率达 99.96%, 各地城区累计建成省级高标准垃圾分类示范小区 184 个。

### 3.2 生活垃圾产生量及分类回收量预测

#### 3.2.1 生活垃圾产生量预测

##### (1) 人口预测

近年来浙江省常住人口呈现缓慢增长趋势,

增长率呈先升后降再反弹趋势。2015 年至 2017 年呈加速增长态势, 主要原因是受 2015 年“二胎”政策调整影响。考虑到未来生育政策仍有进一步放开的可能, 本研究基于近三年人口现状, 设定到 2022 年人口增速为略高于近三年增速的 1.4%。城市化率方面, 从 2006 年至 2017 年, 浙江省城市化率从 56.6% 增长到 68%, 年均增长率约为 1%, 2015 年至 2017 年增长率分别为 0.93%、1.2% 和 1.0%, 与年均增长率基本吻合。因此, 到 2022 年城市化率按照年均增长 1% 进行预测, 则到 2022 年, 浙江省城市化率将达到 73%。据此测算, 2018 年至 2022 年浙江省人口和城镇人口数据见表 1。

表 1 浙江省近年人口现状及人口预测情况

| 单位: 万人 |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 预测年度   | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 |
| 总人口    | 5539   | 5590   | 5657   | 5736   |
| 城镇人口   | 3645   | 3745   | 3847   | 3958   |
| 预测年度   | 2019 年 | 2020 年 | 2021 年 | 2022 年 |
| 总人口    | 5817   | 5898   | 5981   | 6064   |
| 城镇人口   | 4072   | 4188   | 4306   | 4427   |

### (2) 生活垃圾成分构成

根据《浙江省(2012 年)部分城镇生活垃圾成分调查》及《浙江省(2015—2016 年)部分城镇生活垃圾成分调查》, 浙江省生活垃圾组成以食品垃圾为主, 并呈现增长的趋势。同时, 随着浙江省推进生活垃圾分类, 生活垃圾中的纺织品、塑料、玻璃、金属、木材等可回收组分占比均有所下降。根据以往两次调查数据, 按照浙江省相关规划要求, 通过推进生活垃圾分类, 到 2022 年, 浙江省生活垃圾组分中纸张、纺织品、橡胶和皮革、塑料、金

表 2 生活垃圾成分估算

| 单位: %    |        |             |        |
|----------|--------|-------------|--------|
| 成分       | 2012 年 | 2015—2016 年 | 2022 年 |
| 纸张/纸板    | 8.87   | 8.85        | 3.54   |
| 纺织品      | 4.11   | 1.31        | 0.52   |
| 食品垃圾     | 44.02  | 56.58       | 67.13  |
| 木材       | 2.96   | 1.20        | 1.42   |
| 庭园和公园废弃物 | —      | 0.87        | 1.03   |
| 橡胶和皮革    | —      | 1.40        | 0.56   |
| 塑料       | 11.33  | 9.55        | 3.82   |
| 金属       | 1.03   | 0.93        | 0.37   |
| 玻璃       | 5.92   | 1.66        | 0.66   |
| 灰渣/砖瓦    | 19.69  | 17.64       | 20.93  |

属、玻璃等可回收组分将大幅下降。因此假定上述可回收组分按照 60% 的下降率减少,其他组分按比例增加,估算得到 2022 年生活垃圾成分数据如表 2。

### (3) 生活垃圾清运量预测

根据浙江省 2012—2017 年城镇人口及城镇生活垃圾清运量数据,计算得到历年人均生活垃圾产生量数据如下:

表 3 历年城镇人均生活垃圾产生量

单位:kg/人·天

| 年度    | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 人均产生量 | 1.046  | 1.067  | 1.142  | 1.202  | 1.266  | 1.232  |

从上表可以看出,2012—2016 年,人均生活垃圾产生量均呈现增长趋势,且 2013—2016 年增速较快,而 2017 年开始出现下降,但仍然处于较高水平。据此推算,2018—2022 年,在不考虑生活垃圾分类回收影响的情况下,人均生活垃圾产生量将基本维持在 1.2kg/人·天至 1.3kg/人·天之间。随着经济社会的发展,人均生活垃圾产生量将进一步增加,因此按照最高值 1.3kg/人·天估算,2022 年浙江省城镇生活垃圾清运量约为 2100 万吨。

### 3.2.2 生活垃圾分类回收量预测

根据 2015—2016 年浙江省生活垃圾调查组分情况,纸张、纺织品等可回收物占比为 23.7%。假定未全面推进生活垃圾分类情境下未来生活垃圾组分不变,按照 60% 的回收利用率,则通过生活垃圾分类至少可减少 14.22% 的生活垃圾,即 298.62 万吨,实际生活垃圾清运量预计为 1801.38 万吨。

### 3.3 生活垃圾分类协同减排效益测算

全面推进生活垃圾分类,对减少温室气体排放的作用主要是两个方面,一是削减生活垃圾焚烧或填埋量,直接减少处理过程中的排放量,二是降低生活垃圾组分中的矿物质碳含量,从而减少生活垃圾焚烧过程产生的二氧化碳排放。为避免两方面作用单独计算造成减排效益的重复计算,本文通过分别计算分类前及分类后生活垃圾处理产生的温室气体排放量,按照两者差值测算生活垃圾分类减排效益。根据浙江省生活垃圾处理相关规划目标,浙江省将坚持焚烧为主、填埋补充的

原则推进生活垃圾处理,生活垃圾焚烧所占的比重将逐步提升。因此,测算过程中生活垃圾焚烧处理比例采用 60%,卫生填埋比例采用 40%,其他处理方式忽略不计。同时,在测算过程中,不考虑甲烷回收量。

### 3.3.1 分类前温室气体排放量测算

#### (1) 生活垃圾焚烧处理温室气体

生活垃圾焚烧处理温室气体排放相关数据见表 4。根据生活垃圾焚烧处理排放量计算公式,计算得到浙江省 2022 年生活垃圾焚烧处理排放量为 272.91 万吨。

表 4 2022 年焚烧处理温室气体排放相关数据

(未分类情景)

| 参数                      | 数值    | 数据来源                  |
|-------------------------|-------|-----------------------|
| 生活垃圾清运量/万吨              | 2100  | 测算值                   |
| 焚烧量/万吨                  | 1260  | 60%比例焚烧               |
| 废弃物碳含量 $CCW_i/\%$       | 20    | 《指南》推荐值               |
| 矿物碳在碳总量中的百分比 $FCF_i/\%$ | 31.09 | 采用 2015—2016 年数据,见表 7 |
| 燃烧效率 $EF_i/\%$          | 95    | 《指南》推荐值               |

#### (2) 生活垃圾填埋处理温室气体

生活垃圾填埋处理温室气体排放相关数据见表 5。根据生活垃圾填埋处理排放量计算公式,计算得到浙江省 2022 年生活垃圾填埋处理甲烷排放量为 35.28 万吨,折合二氧化碳当量 740.88 万吨。

表 5 2022 年填埋处理温室气体排放

相关数据(未分类情景)

| 参数                    | 数值   | 数据来源               |
|-----------------------|------|--------------------|
| 生活垃圾清运量/万吨            | 2100 | 测算值                |
| 填埋量/万吨                | 840  | 40%比例焚烧            |
| 甲烷修正因子 MCF            | 1.00 | 《指南》推荐值(全部为管理的)    |
| 可降解有机碳 DOC(千克碳/千克废弃物) | 0.14 | 采用 2015—2016 年数据计算 |
| 可分解的 DOC 比例 $DOC_F$   | 0.50 | 《指南》推荐值            |
| 垃圾填埋气体中的甲烷比例 $F$      | 0.50 | 《指南》推荐值            |
| 甲烷回收量 $R$             | 0.00 | 不考虑                |
| 氧化因子 $OX$             | 0.10 | 《指南》推荐值            |

### 3.3.2 分类后温室气体排放量测算

#### (1) 生活垃圾焚烧处理温室气体

生活垃圾焚烧处理温室气体排放相关数据见

表 6,浙江省城市生活垃圾矿物碳成分比例实测值及估算值见表 7。根据生活垃圾焚烧处理排放量计算公式,计算得到全省 2022 年生活垃圾焚烧处理排放量为 198.03 万吨。

表 6 2022 年焚烧处理温室气体排放  
相关数据(分类情景)

| 参数                      | 数值      | 数据来源    |
|-------------------------|---------|---------|
| 生活垃圾清运量/万吨              | 1801.38 | 测算值     |
| 焚烧量/万吨                  | 1080.83 | 60%比例焚烧 |
| 废弃物碳含量 $CCW_i/\%$       | 20.00   | 《指南》推荐值 |
| 矿物碳在碳总量中的百分比 $FCF_i/\%$ | 26.30   | 见表 7    |
| 燃烧效率 $EF_i/\%$          | 95.00   | 《指南》推荐值 |

表 7 浙江省城市生活垃圾矿物碳成分比例  
实测值及估算值

| 数据来源                | 塑料    | 织物   | 金属   | 玻璃   | 砖石/灰渣 | 合计    |
|---------------------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 2012 年调查数据          | 11.33 | 4.11 | 1.03 | 5.92 | 19.69 | 42.08 |
| 2015—2016 年<br>调查数据 | 9.55  | 1.31 | 0.93 | 1.66 | 17.64 | 31.09 |
| 2022 年预估值           | 3.82  | 0.52 | 0.37 | 0.66 | 20.93 | 26.30 |

(2)生活垃圾填埋处理温室气体

生活垃圾填埋处理温室气体排放相关数据见表 8。根据生活垃圾填埋处理排放量计算公式,计算得到浙江省 2022 年生活垃圾填埋处理甲烷排放量为 27.24 万吨,折合二氧化碳当量 571.97 万吨。

表 8 2022 年填埋处理温室气体排放相关数据  
(分类情景)

| 参数                    | 数值      | 数据来源            |
|-----------------------|---------|-----------------|
| 生活垃圾清运量/万吨            | 1801.38 | 测算值             |
| 填埋量/万吨                | 720.55  | 40%比例焚烧         |
| 甲烷修正因子 MCF            | 1.00    | 《指南》推荐值(全部为管理的) |
| 可降解有机碳 DOC(千克碳/千克废弃物) | 0.126   | 采用生活垃圾组分预测数据计算  |
| 可分解的 DOC 比例 $DOC_F$   | 0.50    | 《指南》推荐值         |
| 垃圾填埋气体中的甲烷比例 F        | 0.50    | 《指南》推荐值         |
| 甲烷回收量 R               | 0.00    | 不考虑             |
| 氧化因子 OX               | 0.10    | 《指南》推荐值         |

3.3.3 温室气体减排效益

生活垃圾分类工作推进前后温室气体排放量测算结果如表 9 所示。从测算结果看出,通过生

活垃圾分类,对生活垃圾两种处理方式的温室气体排放量减排率均达到 20%以上,且焚烧处理减排效果更明显。与 2012—2017 年生活垃圾处理排放量数据(见表 10)进行分类比较可以看出,浙江省 2022 年生活垃圾处理温室气体排放总量将明显低于 2016 年和 2017 年,生活垃圾处理温室气体排放可以实现提前达峰。

表 9 分类前后生活垃圾处理温室气体排放量

| 单位:万吨二氧化碳当量 |         |        |        |       |
|-------------|---------|--------|--------|-------|
| 项目          | 分类前     | 分类后    | 减排效益   | 减排率/% |
| 焚烧排放量       | 272.91  | 198.03 | 74.88  | 27.40 |
| 填埋排放量       | 740.88  | 571.97 | 168.91 | 22.80 |
| 合计排放量       | 1013.79 | 770.00 | 243.79 | 24.00 |

表 10 浙江省历年生活垃圾处理温室气体排放量

| 单位:万吨二氧化碳当量 |        |        |        |        |        |        |                 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| 年份          | 2022 年 |        |        |        |        |        |                 |
|             | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 | (分类前/<br>分类后)   |
| 排放量         | 642.35 | 611.85 | 692.27 | 754.23 | 824.93 | 806.31 | 1013.79/<br>770 |

4 结论与建议

测算结果显示,通过推进生活垃圾分类工作,生活垃圾处理过程中的温室气体排放将下降约 24%,且焚烧处理比填埋处理的减排效果更明显,可促成浙江省生活垃圾处理温室气体排放的提前达峰。通过对测算过程中相关指标参数对最终排放量数据的影响分析,在进一步推进生活垃圾分类以及生活垃圾处理过程中,可从以下几方面加强管理,进一步降低生活垃圾处理过程中的温室气体排放量。

(1)加大对生活垃圾中可回收物的回收及灰渣综合利用

生活垃圾中的塑料、织物、金属、玻璃、砖石/灰渣等是矿物质碳的主要来源,也是生活垃圾焚烧处理过程中产生温室气体排放的主要因素。通过生活垃圾分类,塑料、织物、金属、玻璃等组分的大幅下降是温室气体减排的重要原因之一,因此需要继续加强对生活垃圾中上述组分的分离和回收。而目前砖石/灰渣组分未进行分类,这也是分类后矿物质碳的主要来源,因此建议未来在有条

件的情况下,对砖石/灰渣组分进行分离和综合利用,进一步降低生活垃圾中矿物质碳的含量。

### (2) 全面推进生活垃圾焚烧替代卫生填埋

通过测算,在分类前,单位生活垃圾焚烧处理和卫生填埋处理对应的二氧化碳排放分别约为0.22吨二氧化碳/吨垃圾(焚烧)和0.8吨二氧化碳/吨垃圾(填埋),两者差异明显。在分类后,单位排放量分别为0.18吨二氧化碳/吨垃圾(焚烧)和0.79吨二氧化碳/吨垃圾(填埋),分类对于焚烧处理的单位排放量降低效应更加明显。因此,全面推进生活垃圾焚烧替代卫生填埋将更有助于生活垃圾处理过程的温室气体减排。

### (3) 避免餐厨垃圾填埋处理,推进其独立处理

不管是分类前还是分类后,生活垃圾填埋处理均是温室气体排放的主要来源,而可降解有机碳DOC是生活垃圾分类影响填埋处理排放量的关键指标。从分类前的0.14千克碳/千克废弃物降低到分类后的0.126千克碳/千克废弃物,下降效果并不明显,主要原因是生活垃圾中的食品垃圾组分对该指标贡献明显。因此,应尽量避免对

餐厨垃圾进行填埋处理。在有条件的情况下应纳入独立的餐厨垃圾处理体系或就地资源化利用,一方面可以减少生活垃圾处理量,另一方面可以降低DOC指标,这都将有助于生活垃圾处理过程的温室气体减排。

### 参考文献:

- [1] 陈倩倩.宁波市不同区分类垃圾理化特性与温室气体排放特征研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [2] 潘玲阳,叶红,黄少鹏,等.北京市生活垃圾处理的温室气体排放变化分析[J].环境科学与技术,2010,33(09):116-124,172.
- [3] 浙江省人民政府.浙江省“十三五”控制温室气体排放实施方案[EB/OL].(2017-08-08).[http://www.zj.gov.cn/art/2017/8/9/art\\_37173\\_293920.html](http://www.zj.gov.cn/art/2017/8/9/art_37173_293920.html).
- [4] 浙江省人民政府.浙江省城镇生活垃圾分类实施方案[EB/OL].(2018-03-01).[http://www.zj.gov.cn/art/2018/3/1/art\\_41146\\_2269636.html](http://www.zj.gov.cn/art/2018/3/1/art_41146_2269636.html).
- [5] 浙江省住房和城乡建设厅.2013—2018年浙江城市建设统计年鉴[M].杭州:2013-2018.
- [6] 浙江省发展和改革委员会.浙江省温室气体清单编制指南(2018年修订版)[R].杭州:2018.

## Research on the impact of domestic waste classification on synergistic emission reduction of solid waste and greenhouse gases:a case study of Zhejiang Province

LIN Chengmiao, CHEN Lijun, WU Jiezheng

(Zhejiang Development and Planning Institute, Hangzhou 100029, China)

**Abstract:** It has become a common consensus to solve the problem of domestic waste treatment and promote resource recycling through domestic waste classification. The synergy effect of domestic waste classification on greenhouse gas emission reduction in waste treatment process is increasingly prominent. Waste treatment is one of the areas where greenhouse gas emissions in Zhejiang Province have not yet reached peak. Therefore, greenhouse gas emission reduction in the field of waste treatment, especially in the field of domestic waste treatment, is essential for the peak of greenhouse gas emissions in Zhejiang Province. The article is based on the greenhouse gas emission accounting method for domestic waste treatment process, and set up two scenarios in 2022, one is domestic waste classification has not comprehensively promoted, one is domestic waste classification has comprehensively promoted. Then the article predicts and compares the domestic waste output, the amount of classified waste, and the greenhouse gas emissions generated by the treatment process. The results show that by promoting the classification of domestic waste, the greenhouse gas emissions from domestic waste treatment process are reduced by 24%, and the emission reduction effect of incineration treatment process is more obvious, which can lead to the advance peak of greenhouse gas emissions from domestic waste treatment. Based on the above conclusions, the article concludes with three suggestions for the classification and treatment of domestic waste.

**Keywords:** domestic waste classification; greenhouse gas; synergistic emission reduction