

# 城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例

于洋<sup>1 2</sup> 崔胜辉<sup>1 2\*</sup> 林剑艺<sup>1 2</sup> 李飞<sup>1 2</sup>

(1. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室 厦门 361021; 2. 厦门市城市代谢重点实验室 厦门 361021)

摘要: 城市废弃物处理是城市人为活动产生温室气体的来源之一. 参考 IPCC 国家温室气体清单指南 2006 推荐的方法建立了厦门市废弃物处理的温室气体排放计算模型,对厦门市 2005~2010 年废弃物处理的温室气体排放情况进行了估算,包括固体废弃物填埋、焚烧以及污水处理等过程. 结果表明,2005 年温室气体总排放量折合二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>e)为 406.3 kt,2010 年温室气体总排放量(以 CO<sub>2</sub>e 计)达到 704.6 kt. 随着废水处理工艺的提高和城市生活垃圾量的迅速增长,主要排放源由废水处理转变为固体废弃物填埋. 2005 年填埋产生的温室气体排放占固体废弃物处理排放量的 90% 左右,2010 年所占比例下降到 75%. 厦门市废水处理温室气体排放量 2007 年最高,以 CO<sub>2</sub>e 计达到 325.5 kt,化学原料及化学品制造业从 2005~2010 年一直是厦门市 CH<sub>4</sub> 排放量最高的产业,占工业废水处理 CH<sub>4</sub> 排放总量的 55% 以上.

关键词: 厦门市; 固废填埋; 固废焚烧; 污水处理; 温室气体

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3288-07

## Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System: A Case Study in Xiamen

YU Yang<sup>1 2</sup>, CUI Sheng-hui<sup>1 2</sup>, LIN Jian-yi<sup>1 2</sup>, LI Fei<sup>1 2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Xiamen Key Laboratory of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Waste disposal is one of the sources of greenhouse gas (GHG) emissions from urban human activities. According to the method recommended by IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006, a calculation model was established to assess GHG emissions of waste disposal in Xiamen. Then GHG emissions from waste disposal in Xiamen during the year of 2005–2010 were estimated, including solid waste landfill, solid waste incineration and wastewater treatment. The results showed that total GHG emissions quantified in carbon dioxide equivalents (CO<sub>2</sub>e) from waste disposal was 406.3 kt in 2005, and increased to 704.6 kt in 2010. Because of the improvement of wastewater treatment process and rapid increasing municipal solid waste (MSW), the main source of emissions was from wastewater treatment turning to solid waste landfill. GHG emissions from solid waste landfill accounted for about 90% of total emissions from solid waste disposal process in 2005, and the proportion decreased to 75% in 2010. GHG emissions (quantified in CO<sub>2</sub>e) from waste water treatment reached the highest value 325.5 kt in 2007. Chemical raw materials and chemical industry have been the highest CH<sub>4</sub> emission industry during 2005–2010, which accounted for more than 55% of total CH<sub>4</sub> emission from industrial wastewater treatment.

**Key words:** Xiamen; solid waste landfill; solid waste incineration; wastewater treatment; greenhouse gas(GHG)

随着城市化进程的发展,人类和社会活动产生的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体排放量的增加造成了全球气候变暖<sup>[1~5]</sup>. 我国城市废弃物产生量随着城市化进程不断增长,包括城市固体废弃物量和城市污水量的持续增加. 目前,全球年均垃圾增长量约为 100 亿 t·a<sup>-1</sup>,全球由于废弃物处理释放 CH<sub>4</sub> 约 2 000 万 t·a<sup>-1</sup>~7 000 万 t·a<sup>-1</sup><sup>[6~9]</sup>. 以美国为例,2006 年生活垃圾填埋产生 CH<sub>4</sub> 量是人为排放 CH<sub>4</sub> 总量的 23%,而我国城市生活垃圾处理 CH<sub>4</sub> 排放量也不容乐观. 江浙沪地区生活垃圾填埋产生的 CH<sub>4</sub> 量占到该区域 CH<sub>4</sub> 排放量的 19%,仅次于农业活动产生的 CH<sub>4</sub> 排放量<sup>[10,11]</sup>. 此外,污水处理会造成 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 等温室气体的排放. 我国城市污水量

随着用水量的增加而迅速增加,由 20 世纪 70 年代的 146 亿 m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup> 增加到 2010 年的 620 亿 m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup>,废水处理工程也成为持续而庞大的温室气体发生器<sup>[12~15]</sup>.

国内外学者对废弃物处理的温室气体排放的计算方法研究已取得不少成果. 目前,对废弃物填埋的 CH<sub>4</sub> 排放计算方法主要包括动力学模型和统计学模型 2 种类型,其中,统计学模型根据废弃物处理量计算可能产生的 CH<sub>4</sub> 量,而动力学模型则可得出

收稿日期: 2011-11-19; 修订日期: 2012-02-21  
基金项目: 国家自然科学基金项目(71003090); 环境保护公益性行业科研专项经费(201009055)  
作者简介: 于洋(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境管理与城市规划,E-mail: yyu@iue.ac.cn  
\* 通讯联系人,E-mail: shuei@iue.ac.cn

废弃物产气周期中的  $\text{CH}_4$  分布情况<sup>[16,17]</sup>。对于污水处理温室气体排放量的计算,出现了基于碳平衡的碳排算法以及美国提出的联邦碳排计算方法<sup>[12]</sup>。政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的国家温室气体清单指南 2006 总结了各地的温室气体排放计算方法,第五卷提供了废弃物处理的温室气体排放量的计算方法<sup>[18]</sup>。印度德里市采用 IPCC 国家清单指南和欧盟大气污染物和温室气体排放清单指导手册(EMEP/EFA)核算了包括废弃物处理部门的 GHG 排放情况,伦敦、纽约、北京等城市也依据清单指南分别进行过较为全面的 GHG 排放核算<sup>[19~21]</sup>。本研究在前人研究的基础上,参考了 IPCC 国家温室气体清单指南和我国省级温室气体清单编制指南中的方法和部分参数,结合厦门市的垃圾成分、工业发展特点,建立了厦门市固体废物处置和污水处理的温室气体排放计算模型,估算了厦门市 2005~2010 年废弃物处理的温室气体排放量,可为厦门市低碳城市的建设提供依据,并为其他城市的碳排放清单核算提供借鉴和参考。另外,由于在废弃物处理过程中需要消耗源于化石燃料的电能,有学者认为应将其纳入废弃物处理的碳排计算,但由于目前还没有统一、成熟的计算方法,且在城市温室气体排放清单编制中,此部分间接碳排应纳入能源部分进行核算,因此该部分不纳入本研究的计算。

## 1 研究区概况

厦门市地处  $118^{\circ}04'04''\text{E}$ 、 $24^{\circ}26'46''\text{N}$ ,位于我国东南沿海,背靠漳州、泉州平原,濒临台湾海峡。全市陆地面积  $1\,565\text{ km}^2$ ,海域面积  $390\text{ km}^2$ <sup>[22]</sup>。厦门市设 6 个行政区,本岛由思明区、湖里区构成,岛外包括海沧区、集美区、同安区、翔安区,共 21 个街道,15 个镇。随着社会、经济的快速发展,厦门市废弃物总量日趋增长,2000 年厦门市人均生活垃圾产生量为  $215.3\text{ kg}\cdot(\text{a}\cdot\text{人})^{-1}$ ,2010 年达到  $414.3\text{ kg}\cdot(\text{a}\cdot\text{人})^{-1}$ <sup>[23]</sup>。厦门市 2008 年以前城市固体废物全部进行填埋处理,危险、医疗废物进行焚烧处理,2008 年垃圾焚烧发电厂试运营,2009 年正式投入使用,部分城市生活垃圾、污泥等可进行焚烧处理,而填埋处理比例仍占 80% 左右。厦门市废水排放量快速增长,2005 年全市排放废水总量 17 203 万 t,2010 年增至 24 366 万 t,增幅达到 41.6%,全市运行的污水处理厂数量也相应由 7 座增长至 11 座。

## 2 数据来源与计算方法

本研究以厦门市行政边界(含郊区的农村)为核算边界,核算范围包括 2005~2010 年厦门市固体废物处理(包括城市生活固废、医疗固废、危险固废、污水污泥)、生活污水处理、工业废水处理过程产生的 GHG 排放。由于厦门市工业废弃物历年的综合利用率达 95% 以上,近些年更是达到 100%,剩余部分随生活垃圾一同处理,并无单独统计,因此在本研究中纳入城市生活垃圾计算。厦门市农村生活固废没有统一的垃圾清运系统,故本研究将农村生活固废处理的 GHG 排放以露天焚烧的方式进行核算,而农业活动产生的秸秆等作物焚烧不包含在本研究的计算中。

### 2.1 数据来源

固体废物填埋 GHG 排放量核算所需数据包括城市固体废物填埋量、污泥填埋量、城市固体废物(MSW)组成成分、填埋气回收量,通过厦门市市容环卫处调研获得;固体废物焚烧 GHG 排放量核算所需调研数据包括城市生活固体废物、危险废弃物、医疗废弃物、污泥的焚化量,通过厦门市市容环卫处和厦门市水务局调研获得,人口数据取自文献[22];废水处理 GHG 排放量计算所需数据包括生活污水有机物总量、污水处理厂去除有机物量、排入环境有机物量、工业各行业(饮料制造业、纺织业、化学原料制造业、金属制品业、橡胶制品业等厦门市工业污染源普查涵盖的 35 个行业)排放废水的有机物总量、以及就地处理去除的有机物量,取自文献[24],各工业行业废水  $\text{CH}_4$  修正因子及其他计算参数均采用文献[18,25]推荐的缺省值。

### 2.2 计算方法

#### 2.2.1 固体废物填埋

固体废物填埋是  $\text{CH}_4$  的主要排放源之一,随着填埋的垃圾不断累积, $\text{CH}_4$  排放量也随之增长。由于产生的  $\text{CH}_4$  可以回收用于发电,排放量为产生量与回收量之差。本研究采用 IPCC 国家温室气体清单指南 2006 推荐的一阶动力衰减(FOD)方法,该方法考虑了历史填埋垃圾对填埋气体的贡献,而厦门市的垃圾填埋场 1997 年正式投入使用,因此该部分基于 1997 年以来的历史填埋垃圾数据进行核算,计算公式如下所示。

#### (1) DOC 和可降解 DOC 的计算

$$\text{DOC} = \sum_i (\text{DOC}_i \times W_i) \quad (1)$$

$$\text{DDOCm} = W \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \quad (2)$$

式中, DOC 为 MSW 可降解有机碳的百分比<sup>[18]</sup>;  $\text{DOC}_i$  各组分  $i$  中可降解有机碳的百分比<sup>[18]</sup>;  $W_i$  为各组分所占的百分比; DDOCm 为填埋场所累积的可降解 DOC 质量;  $W$  为填埋场累积的废弃物总质量;  $\text{DOC}_f$  为可分解的 DOC 比例, 取 0.5; MCF 为累积年份有氧分解的  $\text{CH}_4$  修正因子, 取 1.0.

### (2) $\text{CH}_4$ 排放量的计算

$$\text{DDOCma}_T = \text{DDOCmd}_T + (\text{DDOCma}_{T-1} \times e^{-k}) \quad (3)$$

$$\text{DDOCm}_{\text{decomp}T} = \text{DDOCma}_{T-1} \times (1 - e^{-k}) \quad (4)$$

$$E_{\text{CH}_4T} = (\text{DDOCm}_{\text{decomp}T} \times F \times 16/12 - R_T) \times (1 - \text{OX}_T) \quad (5)$$

式中,  $T$  为清单年份;  $\text{DDOCma}_T$  为  $T$  年末固体废弃物处理系统 (SWDS) 累积的 DDOCm;  $\text{DDOCma}_{T-1}$  为  $(T-1)$  年年终时累积的 DDOCm;  $\text{DDOCmd}_T$  为  $T$  年累积到 SWDS 的 DDOCm;  $\text{DDOCm}_{\text{decomp}T}$  为  $T$  年 SWDS 分解的 DDOCm;  $k$  为反应常量, 取值为 0.17;  $E_{\text{CH}_4T}$  为  $T$  年排放的  $\text{CH}_4$  量;  $F$  为垃圾填埋气体中的  $\text{CH}_4$  比例, 取 0.5;  $R_T$  为  $T$  年回收的  $\text{CH}_4$  量;  $\text{OX}_T$  为  $T$  年的氧化因子, 取 0.

### 2.2.2 固体废弃物焚烧

固体废弃物焚烧包含集中焚烧和露天燃烧两部分, 其中, 露天燃烧主要针对农村生活固废, 主要产生  $\text{CO}_2$  的排放, 还有少量的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放. 根据 IPCC 国家温室气体清单指南 2006 中推荐的温室气体核算分类, 城市废弃物处理部分不包含农业活动中秸秆等作物的焚烧, 因此秸秆等作物的焚烧不纳入本研究的露天焚烧部分.

#### (1) $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量计算

$$E_{\text{CO}_2} = \sum_i (\text{SW}_i \times \text{dm}_i \times \text{CF}_i \times \text{FCF}_i \times \text{OF}_i) \times 44/12 \quad (6)$$

式中,  $E_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  排放量;  $i$  为焚烧/露天燃烧废弃物类型, 包括城市固体废弃物、危险废弃物、医疗废弃物、污水污泥;  $\text{SW}_i$  为焚烧或露天燃烧的固体废弃物类型  $i$  的总量;  $\text{dm}_i$  为焚烧或露天燃烧的废弃物  $i$  中的干物质含量<sup>[18]</sup>;  $\text{CF}_i$  为  $i$  类废弃物干物质中的碳比例<sup>[18]</sup>;  $\text{FCF}_i$  为  $i$  类废弃物矿物碳在碳的总含量中的比例<sup>[16]</sup>;  $\text{OF}_i$  为  $i$  类废弃物焚烧的氧化因子.

$$E_{\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}} = \sum_i (\text{IW}_i \times \text{EF}_i) \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中,  $E_{\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}}$  为  $\text{CH}_4$  或  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量;  $\text{IW}_i$  为焚烧

或露天燃烧的固体废弃物类型  $i$  的量;  $\text{EF}_i$  为  $i$  类物质焚烧的综合排放因子<sup>[25]</sup>;  $i$  为焚烧或露天燃烧废弃物的类型, 包括城市固体废弃物、危险废弃物、医疗废弃物、污水污泥.

#### (2) 露天焚烧废弃物量计算

$$\text{MSW}_B = P \times P_{\text{frac}} \times \text{MSW}_p \times B_{\text{frac}} \times 365 \times 10^{-6} \quad (8)$$

式中,  $\text{MSW}_B$  为城市固体废弃物露天燃烧的总量;  $P$  为人口<sup>[22]</sup>;  $P_{\text{frac}}$  为燃烧废弃物的人口比例, 取值为农村人口占总人口比例<sup>[22]</sup>;  $\text{MSW}_p$  为人均每日废弃物产生量;  $B_{\text{frac}}$  为燃烧的废弃物量与废弃物处理总量的比例.

### 2.2.3 废水处理

废水若经厌氧处理或处置, 便会造成  $\text{CH}_4$  排放, 还会造成  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 废水的  $\text{CO}_2$  排放是生物成因, 不应纳入排放总量.  $\text{N}_2\text{O}$  排放可出现于处理厂直接排放, 或将废水排入水道、湖泊或海洋后产生的间接排放. 采用 IPCC 推荐的优良做法, 废水处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放部分计算所得为源自废水处理产生的间接  $\text{N}_2\text{O}$  排放量. 废水产生于各种生活、工业, 可以就地处理 (未收集), 可经由下水管道进入污水处理厂集中处理. 本研究将集中处置的工业废水纳入生活污水处理中计算, 就地处理的工业废水单独计算, 计算公式如式 (9)、(10).

#### (1) 生活污水处理 $\text{CH}_4$ 排放

$$E_{\text{CH}_4} = (\text{TOW} \times \text{EF}) - R \quad (9)$$

$$\text{EF} = B_0 \times \text{MCF} \quad (10)$$

式中,  $E_{\text{CH}_4}$  为生活污水处理  $\text{CH}_4$  排放总量;  $\text{TOW}$  为清单年份的生活污水中有机物总量;  $\text{EF}$  为  $\text{CH}_4$  排放因子;  $R$  为清单年份  $\text{CH}_4$  回收量;  $B_0$  指最大产  $\text{CH}_4$  能力 ( $\text{CH}_4/\text{BOD}$ ), 取  $0.282 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[25]</sup>;  $\text{MCF}$  指  $\text{CH}_4$  修正因子, 取 0.165<sup>[25]</sup>.

#### (2) 工业废水处理 $\text{CH}_4$ 排放

$$E_{\text{CH}_4} = \sum_i [(\text{TOW}_i - S_i) \times \text{EF}_i - R_i] \quad (11)$$

式中,  $E_{\text{CH}_4}$  为  $\text{CH}_4$  排放量;  $i$  为不同的工业行业;  $\text{TOW}_i$  为  $i$  行业废水中的可降解有机物总量, 由于工业废水经就地处理后, 一部分进入生活污水管道系统, 其余部分不经下水管道直接排入环境系统, 为不导致重复计算,  $\text{TOW}_i$  值采用各工业行业废水就地处理去除的 COD 量与直接排入环境的 COD 量之和<sup>[24]</sup>;  $S_i$  为  $i$  行业以污泥方式清除的有机物总量;  $\text{EF}_i$  为  $i$  行业废水处理的  $\text{CH}_4$  排放因子, 计算公式同 (10)<sup>[25]</sup>;  $R_i$  为  $i$  行业的  $\text{CH}_4$  回收量.

(3) 废水处理 N<sub>2</sub>O 排放

$$E_{N_2O} = N_E \times EF_E \times 44/28 \quad (12)$$

$$N_E = (P \times P_r \times F_{NPR} \times F_{NON-CON} \times F_{IND-COM}) - N_S \quad (13)$$

式中  $E_{N_2O}$  为 N<sub>2</sub>O 的年排放量;  $N_E$  为污水中的氮含量;  $EF_E$  为废水的 N<sub>2</sub>O 排放因子; 44/28 为转化系数;  $P$  为人口数;  $P_r$  为每年人均蛋白质消耗量<sup>[22]</sup>;  $F_{NPR}$  为蛋白质中氮含量, 取 0.16;  $F_{NON-CON}$  为废水中的非消耗蛋白质因子, 取 1.5<sup>[25]</sup>;  $F_{IND-COM}$  为共同排放到下水道系统的工业和商业废水中的蛋白质因子, 取 1.25<sup>[24]</sup>;  $N_S$  为随污泥清除的氮量。

3 结果与分析

3.1 固体废弃物处理温室气体排放量估算

厦门市 2005 ~ 2010 年城市生活垃圾成分变化如图 1 所示。厦门市城市生活垃圾成分中厨余所占比例相当大, 2005 年占总量的 38% 左右, 2008 年达到最高, 占总量的 67%。随后又有不同程度的下降, 2010 年厨余比例下降至 40% 左右。金属、橡胶、玻璃等垃圾所占比例很小, 三者之和不足总量的 5%。纸类等可回收垃圾所占比例, 由 2005 年的 5% 增长至 2010 年的 12%, 可见厦门市生活垃圾资源化潜

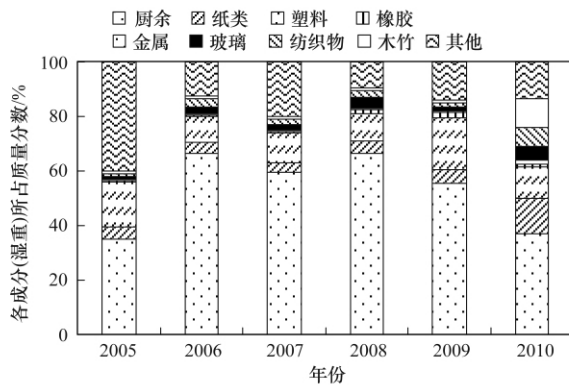


图 1 2005 ~ 2010 年厦门市生活垃圾成分

Fig. 1 Composition of Xiamen's MSW during 2005-2010

表 1 厦门市 2005 ~ 2010 年固体废弃物处理温室气体排放量 (以 CO<sub>2</sub>e 计) /kt

Table 1 GHG emissions (quantified in CO<sub>2</sub>e) from solid waste disposal during 2005-2010/kt

方式	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
填埋处理	160.0	185.8	253.1	316.4	371.7	366.8
集中焚烧	0.5	0.9	1.9	15.9	76.0	91.5
露天焚烧	27.4	20.0	26.5	25.6	30.4	29.9
总计	187.9	206.7	281.5	357.9	478.1	488.2

3.2 废水处理温室气体排放量估算

厦门市 2005 ~ 2010 年废水处理的温室气体排放情况如表 2 所示。2005 ~ 2010 年, 厦门市生活污

力较大。同时, 其他垃圾(灰土、砖瓦陶瓷等)所占比例与 2005 年相比均有不同程度下降。

厦门市 2005 ~ 2010 年固体废弃物温室气体排放情况如表 1 和图 2 所示, 表 1 折合二氧化碳当量 (CO<sub>2</sub>e) 的结果按照 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的增温潜势 (GWP) 分别为 CO<sub>2</sub> 的 21 倍和 310 倍计算得出, 图 2 为各温室气体的实际排放量, 以及固体废弃物处理总量, 由于 N<sub>2</sub>O 排放量极少, 没有纳入图 2 中。由表 1 可以看出, 填埋处理是温室气体排放的最主要来源, 2005 年占固体废弃物处理的 90% 左右, 2010 年由于垃圾焚烧发电厂的正式运营, 填埋处理的温室气体排放量所占比例下降到 75%。由于废弃物填埋处理成本较低、操作方便、处理量大, 厦门市固体废弃物填埋量巨大, 造成 CH<sub>4</sub> 排放量相对较高, 而 CH<sub>4</sub> 增温潜势远大于 CO<sub>2</sub>。

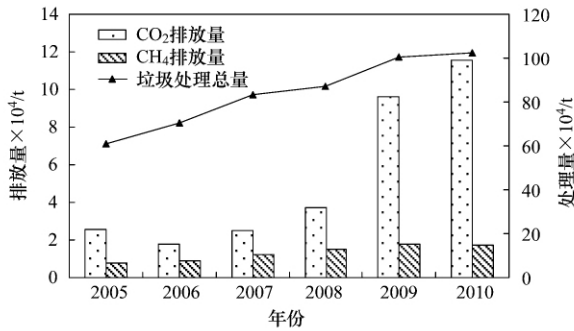
2005 ~ 2010 年, 厦门市生活垃圾处理量由 60.9 万 t 增加到 102.3 万 t, 年均增长率大约为 11.4%。2009 年之前, 填埋处理产生的温室气体排放量 (以 CO<sub>2</sub>e 计) 由 2005 年的 160.0 kt 增长到 371.7 kt, 2010 年又有所下降, 这主要是由于 2009 年以后, 厦门市垃圾填埋场安装了填埋气回收装置, 使部分 CH<sub>4</sub> 回收用于发电。2009 年和 2010 年, 厦门市分别回收 CH<sub>4</sub> 约 948 t 和 3 540 t, 一定程度上减缓了温室气体排放量的增长势头。同时 2009 年以后, 厦门市垃圾焚烧发电厂正式投入使用, 部分可燃垃圾以焚烧处理代替了原始的填埋处理, 使集中焚烧产生的温室气体排放量从 2008 年开始所占比例逐渐增大。露天焚烧产生的温室气体排放量变化不大, 但所占比例有所下降, 这可能由于虽然人均生活垃圾量增长, 但是垃圾清运范围有所增加以及农村人口比例有所降低, 导致露天焚烧的垃圾总量变化不大。而总体来看, 虽然固体废弃物处理的温室气体排放量呈增长趋势, 但由于填埋气回收、焚烧发电等手段的运用, 其增长速度呈放缓趋势。

水排放量由 13 289 万 t 增加至 19 908 万 t, 增长了近 50%。同时污水中有机物总量也由 7.58 万 t 增加至 8.22 万 t, 而生活污水处理的 CH<sub>4</sub> 排放量和废水处

表 2 2005~2010 年厦门市废水处理温室气体排放

Table 2 GHG emissions from wastewater treatment of Xiamen during 2005-2010

类别		2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
CH <sub>4</sub> 排放量/kt	生活污水	3.5	3.4	3.6	3.6	3.7	3.8
	工业废水	6.9	7.1	11.9	7.7	6.9	6.5
N <sub>2</sub> O 排放量/t	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	
合计(以 CO <sub>2</sub> e 计) /kt		218.4	220.5	325.5	237.3	222.7	216.4

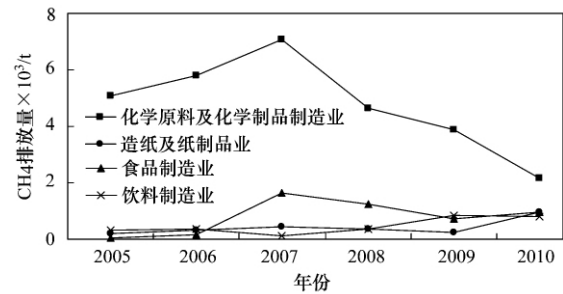
图 2 厦门市固体废弃物处理 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放量Fig. 2 CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from solid waste disposal

理的 N<sub>2</sub>O 排放总量均保持基本稳定,这可能是由于污水处理工艺提高,有机物、氮的去除率增加所致。工业废水处理的 CH<sub>4</sub> 排放量波动较大,2007 年排放量较高,可能与当年工业废水有机物产生量较高有关。

在工业废水处理方面,肉类加工等食品加工业、造纸业、化学品制造业,以及其他食品和饮料加工业会产生大量含有可降解有机质的废水。厦门市从事食品、饮料制造的企业约有 40 家,从事造纸及纸制品加工的企业 17 家,从事化学原料、化学制品制造业的企业 17 家,因此工业废水处理产生的 CH<sub>4</sub> 排放量高于污水处理产生的 CH<sub>4</sub> 排放量。通过对厦门市 35 个工业行业废水处理产生的 CH<sub>4</sub> 排放量进行计算,得出厦门市工业废水处理产生 CH<sub>4</sub> 排放量最高的 4 个产业为化学原料及化学品制造业、食品制造业、造纸及纸制品加工业、饮料制造业,如图 3 所示。化学原料及化学品制造业从 2005~2010 年一直是 CH<sub>4</sub> 排放量最高的产业,占工业废水处理 CH<sub>4</sub> 总排放量的 55% 以上,2007 年以后,该产业产生的 CH<sub>4</sub> 排放量逐步下降,这与得出的工业废水处理 CH<sub>4</sub> 总排放量的变化趋势一致;造纸业、饮料制造业废水处理 CH<sub>4</sub> 排放量 5 a 间比较稳定;食品制造业在 2007 年有较大增长,随后又有所下降。

### 3.3 厦门市废弃物处理温室气体排放特征

综合固体废弃物处理、废水处理的温室气体排放量,得到厦门市 2005~2010 年废弃物处理的温室气体排放情况,如图 4 所示。6 a 间,废弃物处理产

图 3 2005~2010 年厦门市工业废水处理 CH<sub>4</sub> 排放量较高行业Fig. 3 Industries of high CH<sub>4</sub> emission from wastewater

treatment in Xiamen during 2005-2010

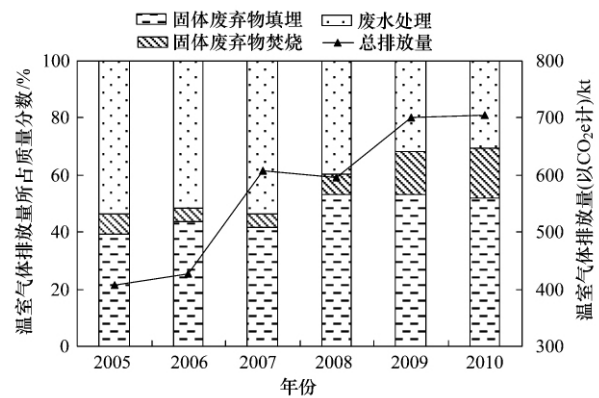


图 4 厦门市 2005~2010 年废弃物处理温室气体排放

Fig. 4 GHG emissions from waste disposal in

Xiamen during 2005-2010

生的温室气体排放量增长较为迅速,2005 年总排放量(以 CO<sub>2</sub>e 计)为 406.3 kt,2010 年总排放量(以 CO<sub>2</sub>e 计)已达到 704.6 kt,增长了近 73.4%。其中,2007 年增长幅度较大,一方面由于垃圾填埋量的增加,另一方面由于 2007 年工业废水有机物产生量达到最高,导致处理过程产生的 CH<sub>4</sub> 量较大,2008 年工业废水有机物产生量、处理过程的 CH<sub>4</sub> 排放量又有所下降,因此,温室气体总量增长不明显。2009 年以后,由于多种减排措施的实行,温室气体排放量增长速度大为减缓。2007 年以前,废水处理是废弃物处理部分温室气体最主要的排放源,随着废水处理工艺的提高,以及城市生活垃圾量的迅速增长,固体废弃物填埋成为最主要的排放源。同时,垃圾焚烧

发电厂的投入使用减少了废弃物的填埋量,导致废弃物焚烧的温室气体排放所占比例有所提高。由于填埋处理的排放因子大于焚烧处理,且  $\text{CH}_4$  的增温潜势高于  $\text{CO}_2$ ,处理同样质量的城市生活固体废物,填埋产生的温室气体排放量(折合  $\text{CO}_2\text{e}$ )约为焚烧处理的 17 倍左右。尽管近几年厦门市垃圾填埋产生的  $\text{CH}_4$  有所回收利用,但回收率在 15% 左右,大量的  $\text{CH}_4$  气体仍排放到环境中,综合来看,推进可燃垃圾的焚烧处理总体上更利于温室气体的减排。

#### 4 不确定性分析

估算 GHG 排放量存在不确定性,包括方法的不确定性和数据的不确定性两方面。在估算固废填埋  $\text{CH}_4$  排放量时,采用 IPCC 推荐的一阶衰减法相对于其他方法能较为全面地考虑历史填埋垃圾对填埋气体的贡献,但对历史数据要求较高。另一方面,方法的不确定性还来自参数选取的不确定,IPCC 提供的缺省国家值可能与厦门地区的参数值不完全相符,如固体废弃物的可分解有机碳比例  $\text{DOC}_1$  和  $\text{CH}_4$  排放修正系数 MCF。估算废弃物焚烧、污水处理 GHG 排放量时采用的是排放因子法,主要的不确定性来自于排放因子的选取。由于城市清单的排放因子相对国家排放因子要求更具针对性,最好通过检测机构、调查资料等方法获得,但是由于目前国内大多数城市均未开展此类调查、检测,具体资料无法获得,故本研究的排放因子采用了省级温室气体清单编制指南和 IPCC 推荐的国家排放因子进行计算。另外,调研获得的统计数据也存在不确定性,主要由统计部门统计口径、调查程度的精确性决定。在估算露天焚烧温室气体排放时,不确定性较大,主要缘于不确定进行垃圾露天焚烧的具体人口数以及露天焚烧的生活废弃物总质量。估算废水处理温室气体排放量时,最大产  $\text{CH}_4$  能力等数据也存在不确定性。

为了降低计算结果的不确定性,本研究在计算时尽量采用厦门市的本地数据和参数,如各类废弃物处理量、MSW 组成成分、 $\text{CH}_4$  回收量、各行业工业废水可降解有机质量等数据均通过调研获得。此外,在计算填埋的  $\text{CH}_4$  排放量时,虽然 IPCC 国家温室气体清单中指出,可以用清单编制年份作为起始年份进行估算,但考虑到本研究的时间跨度较小,若采用 2005 年作为起始年份估算填埋的  $\text{CH}_4$  排放量误差较大,因此,本研究以填埋场 1997 年投入使用以来的历史数据为基础,估算了  $\text{CH}_4$  排放量,与实

际值更为接近。IPCC 报告中指出,采用不同的参数通过同样的方法计算得到的 GHG 排放量可能相差很多。因此,在对厦门市自然地理条件、废弃物管理方法、处置方式均进行了深入调研的基础上,选取了 IPCC 报告提供的适当参数值进行计算,包括  $\text{CH}_4$  排放修正系数 MCF、氧化因子  $\text{OX}_T$  等。此外,在计算废水处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放量时,本研究并没有采用国家水平的人均蛋白质消费量进行计算,而是根据不同年份的厦门市人均消费氮量进行计算,更具针对性。由于城市边界相对于国家边界更为模糊,有些城市自身产生的废弃物会在边界以外的其他地区进行处理,导致实际排放量高于估算量,而厦门市废弃物管理相对完善,自身产生的废弃物均在本地进行处理,避免了这一情况,加强了本研究计算结果的准确性。

#### 5 结论

(1) 计算了 2005 ~ 2010 年厦门市废弃物处理的温室气体排放情况,包括填埋、焚烧、污水处理 3 部分,计算结果折合  $\text{CO}_2\text{e}$ ,2005 年总排放量为 406.3 kt,2010 年总排放量达到 704.6 kt,随着废水处理工艺的提高和城市生活垃圾量的迅速增长,主要排放源由废水处理转变为固体废物填埋。由于废弃物填埋处理成本较低、操作方便、处理量大,厦门市固体废物填埋量巨大,造成  $\text{CH}_4$  排放量相对较高。2009 年,垃圾焚烧发电厂的投入使用减少了废弃物的填埋量,并且焚烧废弃物的温室气体排放比例有所提高,有助于减少  $\text{CH}_4$  的排放。化学原料及化学品制造业在 2005 ~ 2010 年一直是  $\text{CH}_4$  排放量最高的产业,占工业废水处理  $\text{CH}_4$  总排放量的 55% 以上。

(2) 由于厦门市废弃物处理的温室气体排放量呈逐年增长趋势,建议通过生活垃圾分类收集、合理推进废品回收业发展,以提高废弃物回收利用率,减少废弃物处理量。同时,厨余垃圾厌氧消化处理、垃圾填埋气收集、垃圾焚烧发电等方法可以减少温室气体排放,并对缓解能源短缺有一定作用。此外,节约水资源、推行中水回用、改善污水处理工艺、推行污泥制肥、制砖,都可对厦门市温室气体减排有一定作用。

#### 参考文献:

- [1] Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, et al. Greenhouse gas emissions from global cities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(19): 7297-7302.

- [ 2 ] Vitousek P M , Mooney H A , Lubchenco J , *et al.* Human domination of earth's ecosystems [J]. *Science* , 1997 , 277 ( 5325 ) : 494-499.
- [ 3 ] 余国泰. 城市固废(生活垃圾)中甲烷排放量[J]. *环境科学进展* , 1997 , 5( 2 ) : 67-74.
- [ 4 ] Pan L Y , Lin T , Xiao L S , *et al.* Household waste management for a peri-urban area based on analyzing greenhouse gas emissions for Jimei District , Xiamen , China [J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* , 2010 , 17( 4 ) : 342-349.
- [ 5 ] 潘玲阳, 吝涛, 崔胜辉, 等. 半城市化地区家庭生活垃圾特征及低碳对策: 以厦门市集美区为例[J]. *环境科学学报* , 2011 , 31( 10 ) : 2319-2328.
- [ 6 ] Fadel M E , Massoud M. Methane emissions from waste water management [J]. *Environmental Pollution* , 2001 , 114( 2 ) : 177-185.
- [ 7 ] 徐新华, 王昕, 姜虹, 等. 江浙沪地区废物温室气体排放及减排措施[J]. *污染防治技术* , 1996 , 9( 3 ) : 38-40.
- [ 8 ] 罗婷文, 欧阳志云, 王效科, 等. 海口市生活垃圾碳输出研究[J]. *环境科学* , 2004 , 25( 6 ) : 154-158.
- [ 9 ] 陈操操, 刘春兰, 李铮, 等. 北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估[J]. *环境科学* , 2012 , 33( 1 ) : 208-215.
- [ 10 ] IPCC. Practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories [EB/OL]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> , 2011-09-30.
- [ 11 ] 徐新华, 汪大辉, 张清宇, 等. 江苏省温室气体排放研究[J]. *环境导报* , 1996 , 13( 2 ) : 4-6.
- [ 12 ] 王洪臣. 城镇污水处理领域的碳减排[J]. *给水排水* , 2010 , 36( 12 ) : 1-4.
- [ 13 ] 叶雯, 刘美南. 我国城市污水再生利用的现状与对策[J]. *中国给水排水* , 2002 , 18( 12 ) : 31-33.
- [ 14 ] 赵天涛, 阎宁, 赵由才. 环境工程领域温室气体减排与控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [ 15 ] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. *第四世纪研究* , 2006 , 26( 5 ) : 722-732.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 杜吴鹏. 城市固体废弃物( MSW ) 填埋处理温室气体——甲烷排放研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006. 1-83.
- [ 18 ] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 [R]. Institute for Global Environmental Strategies ( IGES ) . Tokyo , Japan , 2007. 1. 1-6. 29.
- [ 19 ] Gurjar B R , Van Aardenne J A , Lelieveld J , *et al.* Emission estimates and trends ( 1990-2000 ) for megacity Delhi and implications [J]. *Atmospheric Environment* , 2004 , 38 ( 33 ) : 5663-5681.
- [ 20 ] Dhakal S , Kaneko S , Imura H. CO<sub>2</sub> Emissions from energy use in East Asian mega-cities: driving factors , challenges and strategies [M]. Honolulu Hawaii: East West Center , 2004.
- [ 21 ] 陈操操, 刘春兰, 田刚, 等. 城市温室气体清单评价研究[J]. *环境科学* , 2010 , 31( 11 ) : 2780-2787.
- [ 22 ] 厦门市统计局. 厦门经济特区年鉴2001-2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2011.
- [ 23 ] 厦门市市容环境卫生管理处. 厦门市城市生活垃圾源头管理对策研究报告[R]. 厦门, 2010. 1-30.
- [ 24 ] 厦门市环境保护局. 厦门市环境统计及城考资料汇编2005-2010 [M]. 厦门, 2005-2010.
- [ 25 ] 中国发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南[R]. 北京, 2011. 84-105.