

合肥市垃圾焚烧发电温室气体减排潜力研究

王 斌, 王向前*

安徽理工大学经济与管理学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年9月12日; 录用日期: 2022年10月12日; 发布日期: 2022年10月24日

摘 要

通过对合肥市中节能公司垃圾焚烧发电项目的研究, 首先利用改进的CDM方法学计算2016~2021年该项目产生的温室气体排放量, 然后用灰色预测模型对2022~2035年该项目产生的温室气体减排潜力进行预测。预测结果显示: 该项目产生的温室气体减排量随着年份的增长不断增加, 其中, 基准线排放量总是高于垃圾焚烧发电的直接排放量; 垃圾焚烧发电的温室气体直接排放量为主要排放源, 间接排放和替代排放占比较小, 但总体作用使得减排总量呈现逐年上升的趋势, 说明未来存在一定的减排潜力。

关键词

垃圾焚烧发电, 温室气体, 减排潜力, CDM方法学

The Study on Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of Waste Incineration Power Generation in Hefei

Bin Wang, Xiangqian Wang*

School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Sep. 12th, 2022; accepted: Oct. 12th, 2022; published: Oct. 24th, 2022

Abstract

Based on the research of the waste incineration power generation project of Zhong Energy Saving Company in Hefei, the GHG emissions generated by the project from 2016 to 2021 were calculated by using the improved CDM methodology, and then the GHG emission reduction potential generated by the project from 2022 to 2035 was predicted by using the grey prediction model. The pre-

*通讯作者。

diction results show that the greenhouse gas emission reduction generated by the project increases with the growth of the year, and the baseline emission is always higher than the direct emission of waste incineration power generation. Direct greenhouse gas emissions from waste incineration and power generation are the main emission sources, while indirect emissions and alternative emissions account for a relatively small proportion. However, the overall effect makes the total emission reduction increase year by year, indicating that there is a certain potential for emission reduction in the future.

Keywords

Waste Incineration Power Generation, Greenhouse Gases, Emission Reduction Potential, CDM Methodology

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“低碳”问题是当今世界关注的热点，也是人类社会共同面临的挑战。不断加快的城市化进程导致城市生活垃圾越来越多，在城市生活垃圾的处理过程中会产生多种温室气体。其中甲烷和二氧化碳对温室效应的贡献都比较大，同时氮氧化物在大气中的停留时间可达上百年，这些气体的产生对地球的增温效应十分明显。传统的垃圾填埋处理及占用土地资源又容易造成土壤污染，而垃圾焚烧发电技术的提出能够有效解决土地浪费及土壤污染为题，同时垃圾焚烧产生的温室气体排放远小于填埋处理。

自 2017 年以来，国内的生活垃圾约为 2.1 亿多吨，人均生活垃圾约为 155 kg，并且随着城市生活水平日益增长，每年的生活垃圾排放量的增长速率约为 3.78% [1]。国内一线及二线城市均面临“垃圾围城”问题，且日益严重。我国垃圾处理方式目前以垃圾填埋为主，该处理方式通常不仅会占用土地资源，并且该处理方式降解产生的 CH_4 为温室气体，对生态环境存在较大影响。根据第三章分析情况来看，2021 年合肥市城市生活垃圾清运量高达 209.71 万吨，接近 2016 年清运量的 1.5 倍，人均年产量为 264.56 kg，城市生活垃圾清运量逐年增大。就清运量增长率来看，2016~2021 年间，合肥市城市生活垃圾清运量年均增长率为 7.77%，增长率总体呈逐年增长趋势。因此，合肥市的生活垃圾日益增长占用的土地资源与环境污染的问题亟需解决。为了有效控制城市生活垃圾处理产生的温室气体排放，本文以合肥市中节能公司为例，对城市生活垃圾焚烧发电项目的温室气体减排潜力进行研究。

我国主要的垃圾处理方式为堆肥、垃圾填埋、垃圾焚烧发电，学者 Murray 等[2]研究表明对垃圾进行“压榨预处理 + 干组分焚烧 + 湿组分厌氧发酵”的综合处理方式，可以得到的温室气体减排潜力最大。但该种方式需要对垃圾进行充分的分类，成本较高，目前不适用于我国。朱文婷[3]将垃圾填埋和垃圾焚烧发电的温室气体减排角度进行比较，得出应提高垃圾焚烧发电的使用比例。此外，我国学者还通过不同方面、不同角度对垃圾焚烧发电的温室气体减排进行研究。夏树林等[4]将垃圾焚烧发电厂分为多个层次，对不同层次的减排潜力进行研究，结果表明渗透液处理工艺的温室气体减排潜力最大；潘玲阳[5]通过层次分析法对不同城市化阶段的垃圾处理方式和温室气体减排进行研究，城市化后期和中期阶段的城市适合采用垃圾焚烧发电技术的综合管理体系；于涛等[6]以垃圾焚烧厂为例，对固定设施排放源的直接排放、间接排放和避免排放进行核算，研究认为降低塑料类生活垃圾入炉比例是减少垃圾焚烧发电温室气体排放的关键因素之一。与此同时，我国学者还通过多种方法对垃圾焚烧发电引起的温室气体减排量

进行计算。杨卫华等[7]分别用 CDM 方法学和 LCA 方法对垃圾焚烧发电的温室气体减排量进行核算, 得出 LCA 在我国发展较迟, 我国没有还没有建立完善的数据库, 因此, CDM 方法学更适合我国研究的结论; 何晶晶等[8]采用 UOD 表格法分析了垃圾焚烧发电不同环节的温室气体减排贡献和影响其排放的主要因素, 生活垃圾中化石碳对减排量的贡献最大, 降低生活垃圾的含水率、提高垃圾可发电量是我国通过垃圾焚烧发电进程温室气体减排的关键途径。

通过对国内外相关文献的回顾, 不能直观的反映垃圾焚烧发电所带来的温室气体减排量; 我国对于垃圾焚烧发电的温室气体减排潜力研究较少, 研究垃圾焚烧发电的温室气体减排潜力, 对提高垃圾焚烧发电技术带来的温室气体减排效果有重要的意义。基于此, 本文在垃圾焚烧发电对温室气体减排的潜力进行研究, 不仅弥补了缺少对垃圾焚烧发电单方面研究的缺陷, 同时还为未来能源的可持续发展提供参考。

2. 研究方法

本文所采用的减排潜力模型是结合 UOD 表格法的理念进行改进的 CDM 方法学, 即将温室气体减排量分为基准线情景下的排放量、间接排放、直接排放和替代排放四个部分, 避免间接排放在垃圾焚烧发电项目过程中的重复计算, 然后将基准线情景下的温室气体排放与垃圾焚烧发电的温室气体排放的直接排放、间接排放和替代排放量相比较得到垃圾焚烧发电导致的温室气体减排量[9]。其中垃圾焚烧发电项目边界中所包含的温室气体如表 1 所示。

Table 1. GHGS contained in the boundaries of waste incineration power projects

表 1. 垃圾焚烧发电项目边界中所包含的温室气体

	来源	气体名称	是否包括	理由
基准情景	填埋场分解	CH ₄	是	填埋产生的主要排放源
		CO ₂	否	生物质焚烧或降解产生的 CO ₂ 量少, 不作为温室气体
		N ₂ O	否	少量, 简化计算
间接排放	电力消耗	CH ₄	是	主要排放源
		CO ₂	否	少量, 简化计算
		N ₂ O	否	少量, 简化计算
	辅助燃料	CH ₄	否	少量, 简化计算
		CO ₂	是	垃圾焚烧炉启动需要添加一定量的辅助燃料, 化石燃料在燃烧过程中产生碳排放
		N ₂ O	否	少量, 简化计算
直接排放	垃圾焚烧	CH ₄	是	如有产生则计算入内
		CO ₂	否	不计入
		N ₂ O	否	少量, 简化计算
替代排放	替代发电	CH ₄	是	可能会产生少量 CH ₄
		CO ₂	是	焚烧过程产生大量 CO ₂
		N ₂ O	是	可能会产生少量 N ₂ O
替代排放	替代发电	CH ₄	否	少量, 简化计算
		CO ₂	是	主要排放源
		N ₂ O	否	少量, 简化计算

根据上述垃圾焚烧发电项目边界对温室气体的划分, 城市生活垃圾焚烧发电的温室气体减排量的计算公式如下:

$$E = BE - DE - IE + SE \quad (1)$$

式中 E (Emission reductions)表示城市生活垃圾焚烧发电的温室气体减排量[10], BE (Baseline displacement)表示基准情景下温室气体排放量, DE (Direct emissions)表示垃圾焚烧产生的直接排放量, IE (Indirect emissions)表示垃圾焚烧过程中产生的间接排放量, SE (Substitution emissions)表示焚烧发电活动项目替代发电的排放量。

1) 基准线排放量

基准线温室气体排放量是指城市生活垃圾在填埋情况下产生的 CH_4 排放量, 具体计算如公式(2)所示:

$$BE = \varphi \times (1 - f) \times GWP_{CH_4} \times MSW \times DOC \times DOC_f \times F_1 \times MCF \times \frac{16}{12} \times (1 - OX) \quad (2)$$

BE 表示城市生活垃圾进行填埋处理情况下甲烷排放量, φ 为模型修正系数, f 为垃圾填埋场中甲烷捕获率, GWP 为垃圾焚烧排放的温室气体 CH_4 全球变暖潜势值, MSW 表示城市生活垃圾处理量, DOC 表示城市生活垃圾中有机碳含量, 本项目中有机碳含量为 43%, DOC_f 表示垃圾中可降解有机碳含量比重, F_1 表示填埋产生气体中甲烷所占比重, MCF 为甲烷修正因子, OX 为氧化因子。

2) 直接排放量

直接排放量是指城市生活垃圾在焚烧过程中产生的温室气体排放量, 具体计算表达式为:

$$DE = PE_{COM-CO_2} + PE_{COM-CH_4-N_2O} \quad (3)$$

DE 为垃圾焚烧产生的温室气体直接排放量, PE_{COM-CO_2} 表示城市生活垃圾焚烧过程中二氧化碳排放量, $PE_{COM-CH_4-N_2O}$ 表示城市生活垃圾焚烧过程中甲烷和氮氧化物气体排放量。

$$PE_{COM-CO_2} = MSW \times (1 - \omega) \times DOC \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

$$PE_{COM-CH_4-N_2O} = MSW \times EF_{CH_4} \times GWP_{CH_4} + MSW \times EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O} \quad (5)$$

公式(4)中, ω 表示城市生活垃圾含水率, 本项目含水率为 25%。公式 5 中, EF 为城市生活垃圾焚烧过程中温室气体排放因子, GWP 为垃圾焚烧排放的温室气体全球变暖潜势值。本项目在焚烧后产生的 CH_4 温室气体量极少, 故在计算中可忽略不计。

3) 间接排放量

间接排放量是指垃圾焚烧发电项目在运行过程中消耗电力、辅助燃料等产生的温室气体排放量, 具体计算公式如下:

$$IE = PE_{FC} + PE_{EC} \quad (6)$$

公式(6)中, IE 表示城市生活垃圾焚烧过程中排放温室气体间接排放量, PE_{FC} 表示城市生活垃圾焚烧过程中消耗化石燃料产生的排放量, PE_{EC} 表示城市生活垃圾焚烧过程中消耗电力产生的排放量, 本项目焚烧使用的电量均来自自身发电, 故该排放量为 0。

$$PE_{FC} = M_{FC} \times NCV_{FC} \times EF_{FC} \quad (7)$$

式(7)中, M_{FC} 为化石燃料消耗质量, NCV_{FC} 为化石燃料燃烧热值, EF_{FC} 为化石燃料排放因子。本项目的辅助燃料为柴油和天然气。

4) 替代排放量

替代排放量是指不采用垃圾焚烧项目进行发电时, 所替代的化石能源发电产生的温室气体排放量, 计算公式为:

$$SE = GE \times EF_{EC} \times (1 + TDL) \quad (8)$$

式(8)中, SE 表示城市生活垃圾焚烧过程中排放温室气体替代排放量, 一般为负值, GE 表示城市生活垃圾焚烧发电上网量, EF_{EC} 表示电网排放因子, TDL 为输电线平均线损。

3. 模型构建

本文采用灰色预测模型对合肥市 2022~2035 年的城市生活垃圾产生量进行预测, 模型构建如下:

1) 设基本数据数列为 $X_t (t = 0, 1, 2, \dots, n)$, 对数列 X_t 进行累加, 得到新数列如下[11],

$$Y_t = \sum_{i=0}^t X_i \quad (9)$$

对公式进行均值化处理得公式(10):

$$Z_t = \frac{Y_t + Y_{t-1}}{2} \quad (10)$$

2) 用 Y_t 求得一阶线性微分方程并求解, 得灰色预测模型 GM(1,1)为:

$$\hat{Y}_t = \left(X_0 - \frac{\mu}{a} \right) e^{-a(k-1)} + \frac{\mu}{a}, (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

公式(11)中 μ 表示模型灰色作用量, a 表示发展灰数, 根据最小二乘法计算得出参数为:

$$\mu = \frac{\sum_{t=1}^n Z_t^2 \sum_{t=1}^n X_t - \sum_{t=1}^n Z_t \sum_{t=1}^n X_t Z_t}{n \left(\sum_{t=1}^n Z_t^2 \right) - \left(\sum_{t=1}^n Z_t \right)^2} \quad (12)$$

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n X_t Z_t - n \sum_{t=1}^n X_t Z_t}{n \left(\sum_{t=1}^n Z_t^2 \right) - \left(\sum_{t=1}^n Z_t \right)^2} \quad (13)$$

3) 计算 X_t 的估计值为:

$$\hat{X}_t = \hat{Y}_t - \hat{Y}_{t-1} \quad (14)$$

当预测误差不大于 5% 时即模型的预测精度大于 95%, 说明预测精度很好, 可使用公式(14)进行预测。

4. 实证研究

4.1. 项目选取及现状分析

本研究以合肥市活垃圾焚烧发电项目为例, 即中节能(合肥)可再生能源有限公司, 该项目是合肥市人民政府为改善和保护城市环境, 决定采用特许经营权方式建设的第一个大型垃圾处理项目, 项目于 2012 年主体工程开工, 2013 年 10 月底一期工程建成投产, 二期工程于 2015 年 9 月建成投产, 设计日处理生活垃圾近 2000 吨, 年处理约 66 万吨。本项目目前主要负责合肥市城区部分生活垃圾处理(在肥西项目、长丰项目、龙泉山项目投产前, 剩余生活垃圾处理方式均为填埋处理), 分别为合肥市蜀山区、瑶海区、包河区、庐阳区, 新站区, 垃圾进厂量由当地城管调配。

自 2016 年全面正式运行以来, 截止 2021 年底共计处理生活垃圾总量为 493.36 万吨, 脱水后的入炉垃圾焚烧量为 391.97 万吨, 年均处理量约为 82.23 万吨, 年均入炉焚烧量约为 65.33 万吨。具体各年份分布如表 2 所示。

Table 2. Municipal solid waste disposal volume of Hefei Zhong Energy Saving Company
表 2. 合肥市中节能公司城市生活垃圾处理量

年份	2016	2017	2018	2019	2020	2021
城市生活垃圾入厂总量(万吨)	85.6	82.9	86.6	85.6	85.0	83.0
城市生活垃圾焚烧总量(万吨)	68.6	67.7	68.7	67.5	68.3	64.4

根据有关部门统计,合肥市城区以及肥东县年均生活垃圾总量约为 180 万吨,本项目年平均垃圾入厂量占合肥全市垃圾总量 47.2%,垃圾脱水后的入炉焚烧量占全市生活垃圾产生总量的 37.5%。据统计,近年来本项目参与的城市生活垃圾平均含水率为 25%,其中城市生活垃圾内碳元素含量约为 43%。本项目为炉排炉,运行过程中不掺烧煤炭,只是在启炉和停炉及故障状态下才投入燃烧器助燃。

4.2. 城市生活垃圾产生量预测结果分析

基于合肥市 2016~2021 年城市生活垃圾产生量原始数据,利用灰色预测模型对合肥市 2022~2035 年的城市生活垃圾产生量进行预测,预测模型检验结果如表 3 所示。

Table 3. Gray prediction model test
表 3. 灰色预测模型检验

年份	实际值	预测值	残差	相对模拟误差
2016	144.30	-	-	-
2017	153.74	153.39	0.35	0.23%
2018	166.31	165.70	0.61	0.37%
2019	178.23	179.01	-0.78	0.44%
2020	192.97	193.38	-0.41	0.21%
2021	209.71	208.91	0.80	0.38%
平均模拟相对误差	-	-	-	0.33%

由表 3 和图 1 分析可知,2017~2021 年预测值与实际值之间的相对误差均小于 0.5%,平均模拟误差为 0.33%,平均预测精度为 99.67%,说明预测结果较为精确,具有一定可信度。

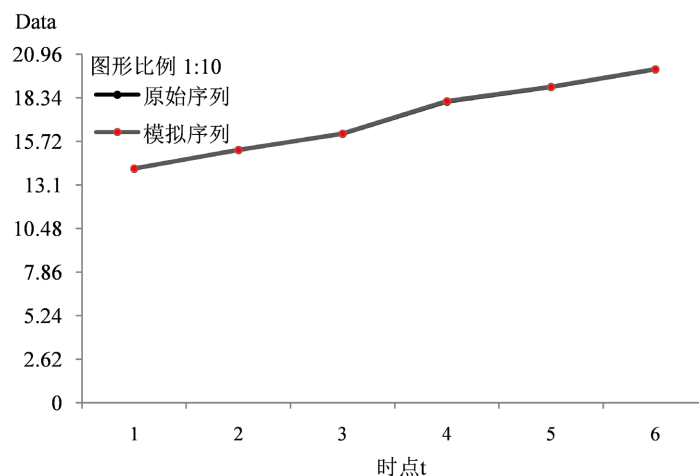


Figure 1. Graphical simulation of grey prediction data
图 1. 灰色预测数据图形模拟

根据预测结果深入分析可知,如图 2 所示,合肥市 2035 年城市生活垃圾产生量将会达到 621.01 万吨,与 2021 年相比增长了将近 2 倍,合肥市城市生活垃圾产生量总体呈现上升趋势,且年增长率起伏波动较大。2016~2021 年城市生活垃圾产生量的年均增长率为 7.77%,2022~2035 年年均增长率为 8.07%,预测年份总体垃圾增长率略高于基础年份年增长率。预测年份 2022~2027 年增长率较为平稳,总体呈上升趋势,其中 2027 年的增长率最高,为 9.26%,2027 年后增长率逐年下降,直至 2033 年略有回升。

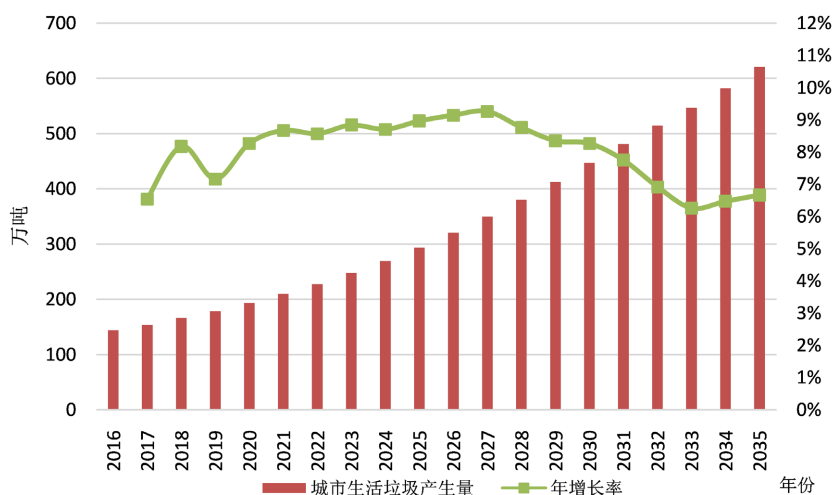


Figure 2. Future trend of municipal solid waste production in Hefei
图 2. 合肥市城市生活垃圾产生量未来趋势

4.3. 项目温室气体减排量结果分析

根据上述改进的 CDM 方法学计算中节能(合肥)可再生能源有限公司的垃圾焚烧发电项目的温室气体减排量,具体减排量见表 4。

Table 4. Greenhouse gas emission reduction units of the project from 2016 to 2021 (ten thousand tons)
表 4. 2016~2021 年本项目温室气体减排量单位(万吨)

年份	BE	DE	IE	SE	E
2016	131.93	65.00	0.17	17.20	83.96
2017	140.56	69.26	0.17	18.33	89.47
2018	152.06	74.92	0.17	19.83	96.80
2019	162.95	80.29	0.17	21.25	103.74
2020	176.43	86.93	0.17	23.00	112.34
2021	191.74	94.47	0.17	25.00	122.10

由表 4 可知,城市生活垃圾进行填埋处理时产生的温室气体排放量最高,即基准线排放量远高于其它三部分排放量,并且 2016~2021 年基准线排放量随年份增长呈现上升趋势,年均增长速度为 7.77%,由此可见,若城市生活垃圾都进行填埋处理产生的温室气体排放量将不容小觑。

城市生活垃圾焚烧发电产生的温室气体直接排放量主要包括 CO₂、CH₄ 和 N₂O 气体的排放量,2016~2021 年的直接排放量整体是上升的趋势,根据计算公式可知变化趋势与城市生活垃圾产生量相同。

城市生活垃圾焚烧发电产生的温室气体间接排放量包含垃圾焚烧过程中所使用的辅助燃料燃烧时产生的温室气体排放量。本项目在焚烧过程中只使用柴油和天然气, 且垃圾焚烧炉启动所需的助燃能源不随垃圾焚烧量而改变, 而是根据项目技术水平而定, 研究期内技术水平未变, 故 2016~2021 年本项目的间接排放量保持稳定不变。

城市生活垃圾焚烧发电产生的温室气体替代排放量指的是垃圾焚烧发电项目中生产的电量替代化石燃料燃烧发电所产生的温室气体排放量。随着合肥市城市生活垃圾产生量的增加, 中节能公司焚烧发电项目生产的电量也在不断增加, 从而替代排放量在 2016~2021 年期间呈现稳定增长趋势。

综合上述, 中节能公司垃圾焚烧发电项目的减排量在 2016~2021 年期间整体呈现稳定上升的趋势。如图 3 所示, 可以更加直观的看出, 基准线排放量总是高于城市生活垃圾焚烧发电项目的温室气体排放量; 在城市生活垃圾焚烧发电项目产生的温室气体中直接排放为主要排放源, 占比最大, 间接排放和替代排放占比较小。虽然基准线排放量、直接排放和替代排放都逐年增加, 但温室气体减排量仍呈现上升的趋势, 即垃圾焚烧发电项目未来存在一定的温室气体减排潜力, 这对于我国未来实现节能减排、减少温室气体排放的目标提供了有效的途径和方法。

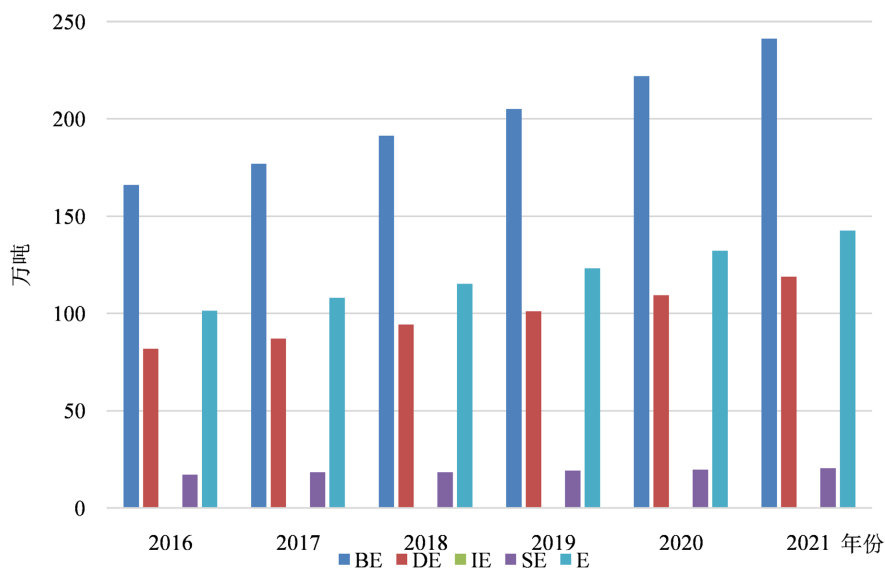


Figure 3. Trend change of GHG emission reduction of waste incineration power generation projects from 2016 to 2021

图 3. 垃圾焚烧发电项目 2016~2021 年温室气体减排量趋势变化图

4.4. 城市生活垃圾焚烧发电的温室气体减排潜力预测

依据目前的发展政策和技术水平为标准, 维持现状, 不采取任何的行动措施进行预测而取得的结果如表 5。

如表 5 和图 4 所示, 城市生活垃圾焚烧发电温室气体在减排方面的数据分析中发现, 温室气体的间接排放对于减排的影响最小, 并且其基数在各项的排放指标中也是最小的, 在图 4 中其随着年份增长呈与年份坐标(横坐标)水平的演化趋势。根据图、表分析可知, 排放指标在 2021~2035 年间均为非线性增长, 并且基准线排放量和直接排放随着年份增长速率较大, 其年均增长率分别为 8.02% 和 8.44%; 由于在技术水平保持不变, 故 IE 在 2022~2035 年间增长率为 0; SE 随着年份增长其年平均增长速率为 8.03%, E 的增长年增长速率为 7.52%。排放潜力指标随着年份增长呈非线性增长, 因此合肥市在无任何政策与手

段的影响, 城市生活垃圾焚烧发电存在一定的减排潜力, 且其减排潜力在以每年 7.52% 的速度增长。

Table 5. GHG emission reduction forecast of the project from 2022~2035 under the benchmark scenario (ten thousand tons)
表 5. 2022~2035 年本项目温室气体减排预测值单位(万吨)

年份	BE	DE	IE	SE	E
2022	208.17	97.57	0.17	26.91	83.53
2023	226.57	111.63	0.17	29.07	85.70
2024	246.30	121.35	0.17	31.40	93.38
2025	268.38	132.23	0.17	33.92	102.06
2026	292.93	144.33	0.17	36.64	111.79
2027	320.06	157.70	0.17	39.59	122.61
2028	348.11	171.51	0.17	42.77	133.66
2029	377.18	185.84	0.17	46.20	144.98
2030	408.38	201.21	0.17	49.91	157.09
2031	440.03	216.80	0.17	53.92	169.14
2032	470.49	231.81	0.17	58.25	180.26
2033	499.96	246.33	0.17	62.92	190.54
2034	532.32	262.27	0.17	67.98	201.90
2035	567.78	279.75	0.17	73.44	214.43

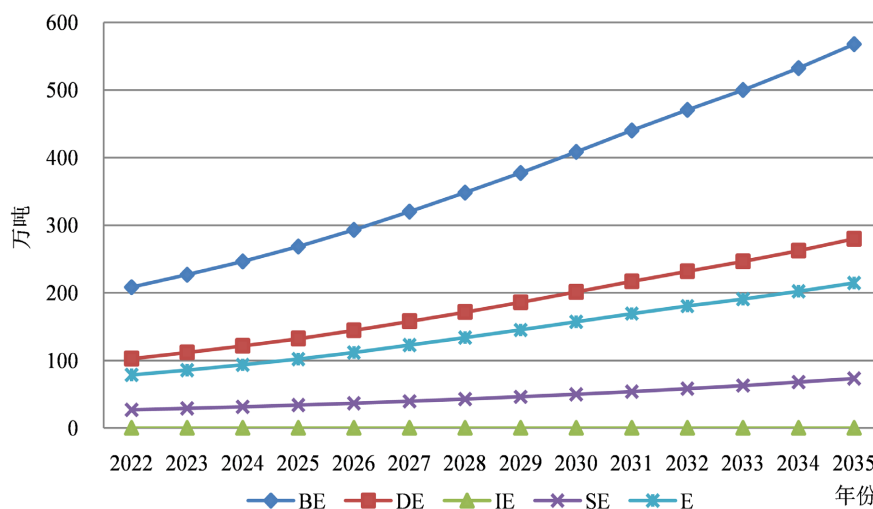


Figure 4. Trend change of GHG emission reduction of the project from 2022~2035 under the baseline scenario

图 4. 2022~2035 年本项目温室气体减排量趋势变化图

综合分析, 减排潜力在 2022~2028 年增长速度最快, 年均增长 8.15%; 2029~2035 年增长速度相对较慢, 年均增长率为 6.74%。预测结果表明, 未来减排潜力会有大幅提升, 但之后减排潜力的增速是在降低的。研究结果表明, 在没有政策引导和效率改进的情况下, 垃圾焚烧发电的温室气体减排潜力在 2022~2028 年增速达到了最大值, 之后温室气体减排潜力的增长速度会减缓。但总体而言, 垃圾焚烧发

电的温室气体减排潜力是一直存在且上升的。

5. 结论

本文以合肥市中节能公司为例对城市生活垃圾焚烧发电项目产生的温室气体排放量进行了估算, 并对未来该项目在城市生活垃圾处理上的减排潜力进行了预测和分析。得出结论如下:

1) 合肥市城市生活垃圾焚烧项目, 不仅实现了城市生活垃圾的无害化和减量化, 改善了合肥市城市生活垃圾处理手段单一低效的现状, 还能减少火力发电厂和生活垃圾填埋场的温室气体排放, 该项目在 2016~2021 年之间的运行期间, 平均每年可发电 264751.98 MWh, 通过发电带来的年均碳减排效益将达到 59.87 万吨, 说明垃圾焚烧发电项目具有一定的减排潜力。

2) 与已有研究相比, 本文改进了 CDM 方法学用来计算各阶段温室气体排放量, 并利用灰色预测模型对未来城市生活垃圾产生量和垃圾焚烧发电项目产生的温室气体减排潜力进行预测。预测结果显示城市生活垃圾产生量总体呈现上升趋势; 城市生活垃圾焚烧发电项目产生的温室气体减排量也随着年份的增长不断增加。

3) 根据历史数据对中节能公司 2022~2035 年城市生活垃圾焚烧发电的温室气体减排量进行预测, 研究表明: 基准线排放量总是高于垃圾焚烧发电的直接排放量; 垃圾焚烧发电的温室气体直接排放量为主要排放源, 间接排放和替代排放占比较小, 但总体作用使得减排总量呈现逐年上升的趋势, 说明未来存在一定的减排潜力, 这对于我国实现节能减排、减少温室气体排放的目标有所助益, 对于温室气体减排研究提供了一定的参考。

基金项目

基金项目: 高校学科(专业)拔尖人才资助项目(项目编号: gxbjZD2021051)。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] Murray, M. (2005) *Econometrics: A Modern Introduction*. United States Edition. Pearson Schweiz AG, Zug, 3156-3160.
- [3] 朱文婷, 韦保仁. 苏州市生活垃圾处理碳足迹核查[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 828-834.
- [4] 夏树林, 李振山, 焦安英, 郭雪. 北京市生活垃圾焚烧厂耗能排污特征及节能减排潜力[J]. 地球与环境, 2014, 42(1): 102-109.
- [5] 潘玲阳, 吝涛, 肖黎姗, 杨德伟, 叶志隆. 不同城市化阶段生活垃圾处理技术选择研究: 以厦门市为例[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S1): 290-299.
- [6] 于涛, 黄涛, 潘膺希, 杨林海, 王龙. 基于 BP 神经网络和灰色关联度组合模型的城市生活垃圾清运量预测[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 94-97.
- [7] 杨卫华, 初金凤, 吴哲, 孟海燕, 李小立. 基于 LCA 和 CDM 方法学的垃圾焚烧发电过程中碳减排的计算研究[J]. 节能, 2013, 32(11): 20-23+2.
- [8] 何晶晶, 陈淼, 杨娜, 邵立明. 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.
- [9] 杜姣, 万玉秋, 张汉文. 清洁发展机制(CDM)实践及理论研究进展[J]. 环境保护科学, 2007, 33(4): 121-124.
- [10] 张婷. 合肥市生活垃圾处理的温室气体排放及减排策略[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [11] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 267-272.