



生活垃圾填埋场开采再利用碳排放模型及其应用

俞金灵¹, 彭明清¹, 徐 辉¹, 刘文莉²

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 台州学院建筑工程学院, 浙江台州 318000)

摘 要: 采用碳排放因子法建立了生活垃圾填埋场开采再利用的全生命周期碳排放模型, 核算了单位质量填埋垃圾在保持原状、开采—材料再回收和开采—能源回收三种场景的碳排放量, 分析了开采再利用场景下碳减排主要驱动因素与碳减排量的影响规律, 探究了填埋场开采再利用相对于保持原状的碳减排潜力。结果表明: 开采—材料再回收场景的碳排放量少于开采—能源回收场景; 开采—材料再回收场景的碳减排量随塑料回收率的提高而增大, 开采—能源回收场景的碳减排量随垃圾衍生燃料热处理量的增加而增大; 简易填埋场在开采—材料再回收场景的碳减排潜力最大, 达 $-495 \text{ kgCO}_2 \text{ eq/t}$ 。该研究可为我国垃圾填埋场开采再利用的碳减排潜力评估提供一定的参考依据。

关键词: 城市生活垃圾; 单位质量填埋垃圾; 填埋场开采再利用; 材料和能源回收; 碳排放模型; 碳减排量

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2024) 03-0245-10

引文格式: 俞金灵, 彭明清, 徐辉, 等. 生活垃圾填埋场开采再利用碳排放模型及其应用[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(2): 245-254.

Reference Format: YU Jinling, PENG Mingqing, XU Hui, et al. A carbon emission model for domestic waste landfill mining and reuse and its applications[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(2): 245-254.

A carbon emission model for domestic waste landfill mining and reuse and its applications

YU Jinling¹, PENG Mingqing¹, XU Hui¹, LIU Wenli²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: A carbon emission model for the full life cycle of domestic waste landfills was constructed by using the carbon emission factor method. The carbon emissions of unit mass waste were calculated under three scenarios: 'keep do-nothing' scenario, 'waste to material' scenario and 'waste to energy' scenario. This model explored the primary factors driving carbon emission reduction and the influence of carbon emission reduction in mining and reuse scenarios, and investigated the potential for carbon emission reduction through landfill mining and reuse as compared to the preservation of the landfill in 'keep do-nothing' scenario. The above results show that the carbon emission of the 'waste to material' scenario is less than the 'waste to energy' scenario; the carbon emission reduction in the 'waste to material' scenario increases with the increase of the plastic recovery rate, and the carbon emission reduction in the 'waste to energy' scenario increases with the increase of the heat treatment amount of refuse derived fuel; the carbon emission reduction potential in the 'waste to material' scenario of the simple landfill is the best, up to $-495 \text{ kgCO}_2 \text{ eq/t}$. These conclusions can provide certain reference for the assessment of carbon emission reduction potential of landfill mining and reuse in China.

收稿日期: 2023-09-22 网络出版日期: 2023-12-13

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY21E080029)

作者简介: 俞金灵(1999—), 女, 浙江诸暨人, 硕士研究生, 主要从事固体废弃物碳排放方面研究。

通信作者: 徐 辉, E-mail: xuhui@zstu.edu.cn

Key words: municipal solid waste; per unit mass of landfill waste; landfill mining and reuse; material and energy recovery; carbon emission model; carbon emission reduction

0 引 言

我国城市生活垃圾(Municipal solid waste, MSW)的处置方式以填埋为主^[1]。截至 2020 年,在役生活垃圾填埋场数量约 6900 座,填埋垃圾存量超 80 亿 t^[2]。城市生活垃圾填埋产生的温室气体是垃圾处理领域碳排放的主要来源^[3-4]。垃圾填埋场开采再利用是指从填埋场挖掘矿化垃圾并进行资源回收和生态修复^[5],具有降碳减排的潜力。碳排放模型是用于评估填埋场开采再利用相对于持续填埋情况下的碳减排潜力的重要方式,可定量计算碳排放量并优选填埋场开采再利用路径^[6]。因此,构建垃圾填埋场开采再利用碳排放模型并以此进行碳减排核算具有重要的科学意义和工程价值。

垃圾填埋场开采再利用作为一种将填埋资源重新引入材料循环并减少环境负担的技术措施,以往研究主要集中于填埋垃圾的资源化利用技术^[7-8]。随着人们对温室效应和气候变化的日益关注,研究者们逐渐关注垃圾填埋场开采再利用产生的碳减排潜力。Cappucci 等^[9]构建了填埋场矿化塑料回收再利用的碳排放模型,对塑料再利用全生命周期的碳排放进行了核算,发现原材料生产塑料的碳排放量是矿化塑料回收再利用的 4.5 倍。Huang 等^[10]基于生命周期评价(Life cycle assessment, LCA),构建了填埋垃圾可燃材料制备垃圾衍生燃料(Refuse derived fuel, RDF)的碳排放模型,发现填埋垃圾仅采用能源回收是增加碳排放的过程。以上研究均局限于单一材料回收利用的碳排放量核算,如塑料再生利用、可燃材料热处理等,未对填埋场内全部矿化垃圾的回收处置展开碳排放研究。Jones 等^[11]首次提出了强化填埋垃圾开采路径的理念,强调通过优化材料和能源的回收路径来实现填埋场开采再利用项目的最大碳减排。Sankar 等^[12]采用 LCA 构建了填埋场材料和能源回收再利用的碳排放模型,核算发现,在生活填埋垃圾场中的 1 t 垃圾,通过金属回收和可燃材料焚烧发电,可实现 0.6 tCO₂eq 的碳减排。Danthurebandara 等^[13]构建了适用于比利时丹顿垃圾填埋场开采再利用项目的碳排放模型,核算了建筑材料二次利用和可燃材料热处理的碳减排量,研究表明填埋场开采再利用存在碳减排潜力。以上研究者通过建立垃圾填埋场开采

再利用的碳排放模型,核算了垃圾填埋场可回收材料和可燃材料综合利用的碳减排潜力。但目前在相关研究中,选择的材料和能源综合利用的方式仍较为单一,塑料和纸张一般归为可燃材料用于能源回收,缺乏对材料与能源多路径利用技术下的碳排放研究。

本文采用碳排放因子法构建了生活垃圾填埋场开采再利用的全生命周期碳排放模型,通过该模型核算填埋场单位填埋垃圾在保持原状场景(Keep do-nothing scenario, KDNS)、开采-材料再回收(Waste to material, WtM)场景和开采-能源回收(Waste to energy, WtE)场景的碳排放量,以分析生活垃圾填埋场开采再利用场景(Landfill mining and reuse scenario, LMRS)主要碳减排影响因素与其碳减排量的影响关系,得到填埋场相对于 KDNS 场景,采用 WtM 场景和 WtE 场景的碳减排量。本文建立的碳排放模型可用于核算生活垃圾填埋场低碳化利用技术路径的碳排放量,研究结论可为我国生活垃圾填埋场开采再利用的碳减排路径优选和碳减排潜力评估提供初步参考依据。

1 全生命周期碳排放模型

1.1 垃圾填埋场场景设立与技术流程概述

垃圾填埋场场景设立与技术流程如图 1 所示。根据本文的研究目标和技术实用性,设立了垃圾填埋场 KDNS 场景和 LMRS 场景, KDNS 场景和 LMRS 场景皆以填埋垃圾稳定化完成为开始节点。

1.1.1 KDNS 场景

生活垃圾填埋场 KDNS 场景中,填埋垃圾中的有机质通过厌氧食物链的协同作用持续产生 CH₄、CO₂ 等填埋气和渗滤液,填埋气回收发电或排放至大自然,渗滤液采用无害化处理后排放。KDNS 场景用于评估生活垃圾填埋场 LMRS 场景的碳减排潜力。

1.1.2 LMRS 场景

生活垃圾填埋场 LMRS 场景主要包括渗滤液处理、垃圾挖掘粗筛和细筛回收、材料加工处理、RDF 生产与热处理、危废物质处置、土地回填等过程。填埋场垃圾组分主要取决于填埋场类型、储存时间、降解程度和地理来源^[14],按利用途径分为 3 大类:建筑组分、可燃组分和细粒组分^[15]。卫生填

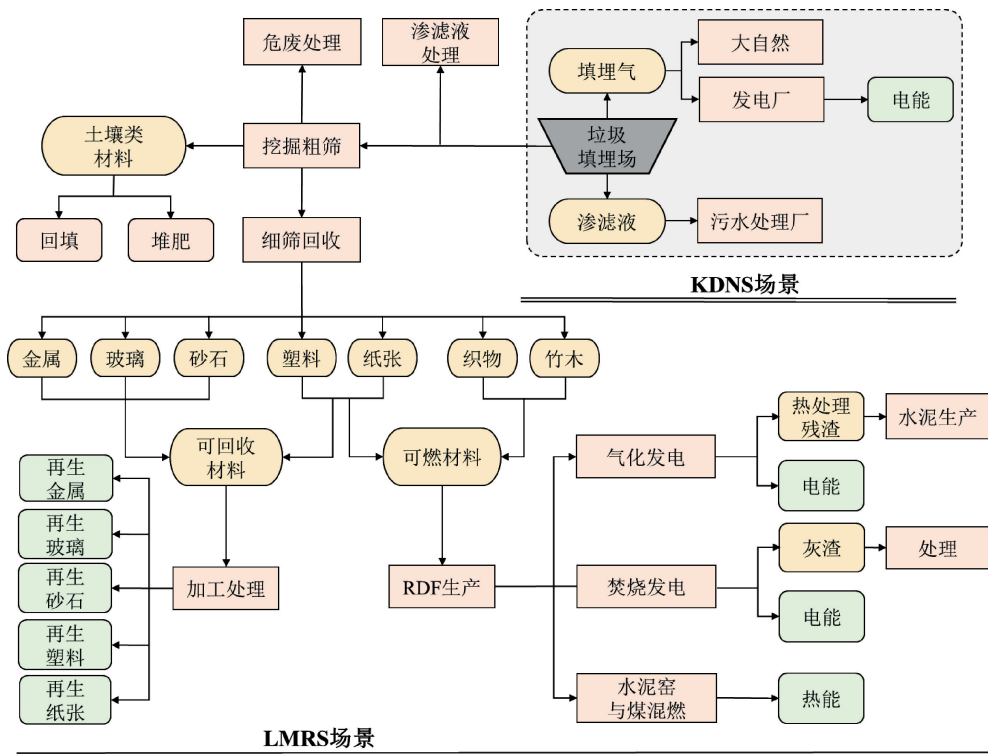


图 1 垃圾填埋场场景设立与技术流程图

埋场 (Sanitary landfill, SaL) 和简易填埋场 (Simple landfill, SiL) 矿化垃圾组分占比见表 1。根据纸张和塑料的最终处置方式, LMRS 场景细分为 WtM 场景和 WtE 场景。WtM 场景以材料再回收为主, 塑料和纸张加工处理为再生塑料和再生纸张, 联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的第四次评估报告^[16] (AR4) 指出塑料和纸张的回收利用率缺省值为 80%~90%。WtE 场景以能源回收为主, 塑料和纸张用于生产 RDF。

| 表 1 生活垃圾填埋场矿化垃圾组分占比 | | |
|---------------------|------------|------------|
| 组分 | SaL 组分占比/% | SiL 组分占比/% |
| 易腐垃圾 | 52.51 | 48.03 |
| 灰土砖石 | 20.64 | 27.01 |
| 金属 | 1.11 | 1.09 |
| 玻璃 | 2.80 | 2.87 |
| 纸类 | 2.23 | 2.23 |
| 织物 | 2.87 | 2.35 |
| 塑料 | 9.24 | 8.01 |
| 竹木 | 3.02 | 4.60 |
| 混合垃圾 | 4.61 | 3.09 |
| 有害物质 | 0.30 | 0.07 |

1.2 碳排放模型构建

生命周期碳排放核算 (Life cycle carbon accounting, LCCA) 是量化碳排放变化趋势、研究碳排放影响因素和设计减排路径的基础。全生命周

期碳排放模型包括碳排放核算范围和核算方法。通过相关文献调研确定 KDNS 场景和 LMRS 场景各阶段碳排放源范围, 并绘制碳排放系统边界图。本文构建的碳排放模型采用《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[17] 推荐的碳排放因子法来计算 KDNS 场景和 LMRS 场景全生命周期各阶段的碳排放量。

1.2.1 KDNS 场景碳排放模型构建

垃圾填埋场 KDNS 场景的碳排放系统边界如图 2 所示。SaL 配备较完善的顶部覆盖系统和填埋气收集利用系统^[18], 一部分填埋气收集发电, 减少传统燃料的使用, 另一部分泄漏至大气中。SiL 一般情况下不配备填埋气收集系统, 导致填埋气直接向大气排放。此外, SaL 相较 SiL 具备更完善的渗滤液处理设备, 能最大限度地减少渗滤液的排放。由于生活垃圾填埋场达到稳定化后方可开挖, 因此 KDNS 场景计算填埋垃圾达到稳定化后保持填埋产生的碳排放量。即 KDNS 场景的总碳排放量等于填埋气排空、渗滤液处理和填埋气发电 3 个阶段的碳排放之和。

a) 填埋气排空碳排放。填埋气中的 CH₄ 是生活垃圾填埋场最主要的碳排放来源。IPCC 在 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*^[19] 推荐使用一级衰减动力学模型 (First-order kinetic, FOD) 估

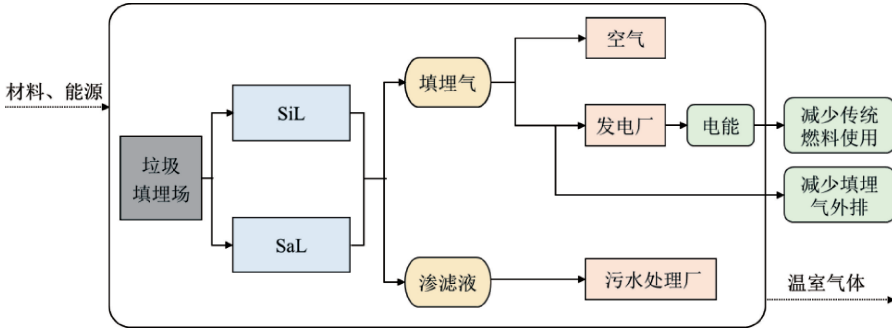


图2 垃圾填埋场 KDNS 场景的碳排放系统边界

算垃圾填埋场 CH_4 排放量。因此本文结合 FOD 模型和甲烷全球变暖潜势建立生活垃圾填埋场填埋气排空的碳排放量计算公式,参数取值来源于中国环境规划研究院、Cai 等^[20]。填埋气排空碳排放量可用式(1)计算:

$$C_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^4 H \times f_i \times D_i \times D_f \times e^{-(t-1) \times k_i} \times F \times \frac{16}{12} \times (1-R) \times (1-O) \times EF_g \quad (1)$$

其中: C_{CH_4} 为填埋垃圾填埋气排空碳排放量, tCO_2eq ; t 为垃圾填埋时间, 年; H 为 CH_4 的修正因子; f_i 为不同垃圾成分比例, %; i 为不同种类垃圾, $i=1$ 表示厨余垃圾, $i=2$ 表示纸张, $i=3$ 表示织物, $i=4$ 表示竹木; D_i 为 i 类垃圾可降解有机碳比例, %; D_f 为分解的 D_i 比例, %; k_i 为 CH_4 产生速率常数; F 为填埋气体中 CH_4 比例, 50%; R 为 CH_4 收集率, %; O 为 CH_4 氧化系数; EF_g 为甲烷全球变暖潜势值, 28 $\text{tCO}_2\text{eq/t}$ 。

b) 渗滤液处理碳排放。渗滤液的排放和处理过程会产生温室气体。渗滤液处理碳排放计算公式为 $C_1 = T_1 \times EF_f$, 其中: C_1 为渗滤液处理排放的碳排放量, tCO_2eq ; T_1 为垃圾渗滤液产量, t ; EF_f 为渗滤液处理的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq/t}$ 。

c) 填埋气发电碳排放。填埋气发电可替代传统燃料的使用, 从而间接产生碳减排。通过能源热值转换公式得到单位质量填埋气的发电量, 再使用碳排放因子法计算得到填埋气发电基于传统能源发电的碳减排量。填埋气发电的碳排放量可用式(2)计算:

$$C_r = T_{\text{CH}_4} \times R \times \frac{J_{\text{CH}_4} \times K \times 1000}{\rho \cdot a} \times (EF_{\text{el}} - EF_{\text{e2}}) \quad (2)$$

其中: C_r 为填埋垃圾收集的甲烷发电的碳减排量, tCO_2eq ; T_{CH_4} 为填埋垃圾甲烷产量, t ; J_{CH_4} 为甲烷热值, MJ/m^3 ; K 为甲烷发电效率, %; ρ 为甲烷密度, 0.72 kg/m^3 ; a 为能源转换系数, 3.6 MJ/MWh ;

EF_{el} 为甲烷发电的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq/MWh}$; EF_{e2} 为燃煤发电的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq/MWh}$ 。

1.2.2 LMRS 场景碳排放模型构建

垃圾填埋场 LMRS 场景的碳排放系统边界如图 3 所示。垃圾填埋场通过挖掘筛分将填埋垃圾回收处理成再生产品与 RDF, 再生产品生产可减少原材料的开采。RDF 热处理可替代传统燃料的使用, 本文根据我国热处理厂建设现状和实际需求, 将 RDF 产品以 3:2:5 的质量比投放至气化发电厂、垃圾焚烧厂和水泥厂。LMRS 场景的总碳排放量等于设备运行、物料运输、材料再利用、能源回收和土壤堆肥 5 个阶段的碳排放之和。

a) 设备运行碳排放。设备运行过程中消耗柴油和电力, 产生碳排放。设备运行主要包括填埋场渗滤液处理、挖掘粗筛、细筛回收、危废物质处置、土地回填、RDF 生产过程。设备运行的碳排放量可用式(3)计算:

$$C_m = T_m \times (y \times EF_{\text{e3}} + h \times EF_d) \quad (3)$$

其中: C_m 为设备处理物料产生的碳排放量, tCO_2eq ; T_m 为物料处理量, t ; y 为设备处理物料的耗电量, MWh ; EF_{e3} 为中国国家电网电能碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq/MWh}$; h 为设备处理单位质量物料的柴油耗量, t ; EF_d 为柴油使用的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq/t}$ 。

b) 物料运输碳排放。物料运送过程中柴油消耗产生 CO_2 排放。由于物料运输为单程运输, 故在运输过程中, 需考虑运输车辆空载对碳排放的影响, 空载时的环境负荷是满载时的 0.67 倍^[21]。本文忽略由材料状态(如土体松散状态)变化引起的物料质量改变。物料运输的碳排放量可用式(4)计算:

$$C_h = T_h \times L_h \times \frac{EF_h}{1000} \times k \quad (4)$$

其中: C_h 为物料运输导致的碳排放量, tCO_2eq ; T_h 为物料运输质量, t ; L_h 为物料运输距离, km ; EF_h 为柴油货运每千米每吨物料的碳排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq}/(\text{t} \cdot \text{km})$; k 为空载返回系数, 1.67。

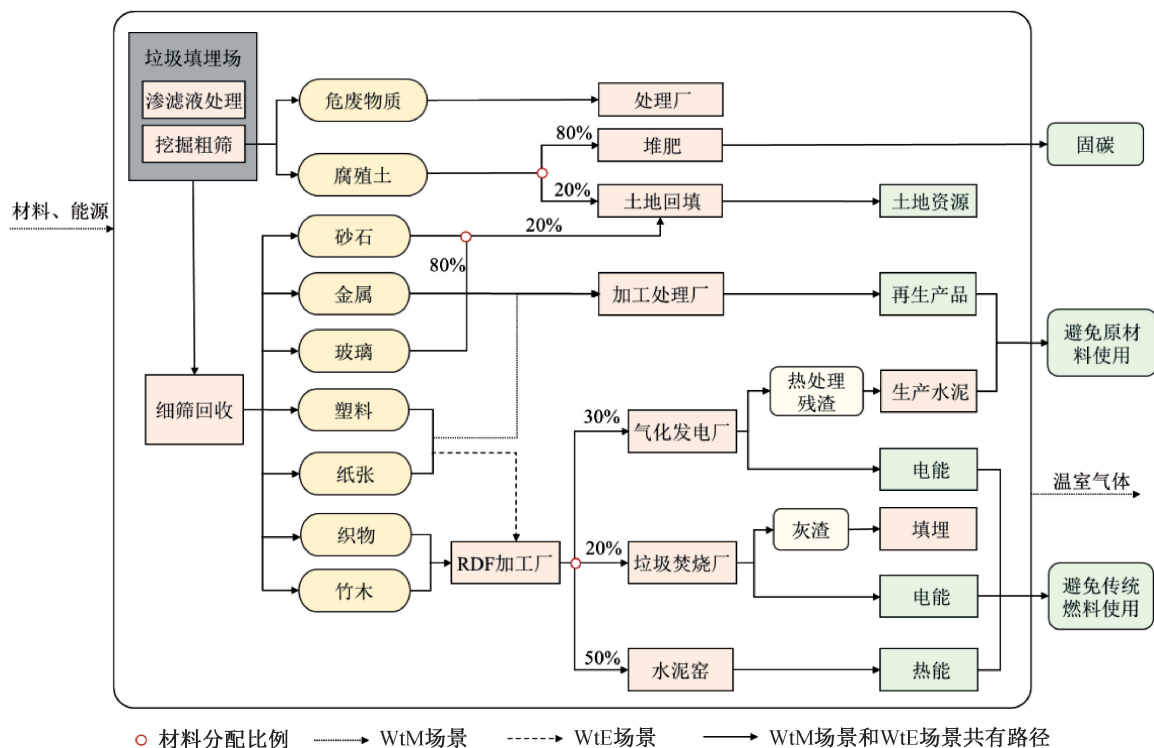


图3 垃圾填埋场 LMRS 场景的碳排放系统边界

c)材料再利用碳排放。矿化垃圾经筛分处理后可生产再生产品,减少原材料的开采,从而减少碳排放。材料再利用的碳排放量可用式(5)计算:

$$C_r = T_r \times (EF_m - EF_n) \quad (5)$$

其中: C_r 为二次材料利用产生的碳排放量, tCO_2eq ; T_r 为二次材料质量, t ; EF_m 为二次材料再利用的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{t}$; EF_n 为原材料初次开采的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{t}$ 。

d)能源回收碳排放。填埋垃圾中的高热值可燃物为RDF原料,RDF热处理产生的能源可减少传统燃料的使用,从而减少碳排放。RDF气化和焚烧发电路径的碳排放量计算公式为 $C_{s1} = -T_s \times EF_{e2} + T_r \times EF_r$,其中: C_{s1} 为RDF发电产生的碳排放量, tCO_2eq ; T_s 为RDF投入质量, t ; T_r 为底物处理量, t ; EF_r 为底物处理的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{t}$ 。RDF在水泥窑路径的碳排放量计算公式为 $C_{s2} = -T_s \times EF_{e2} \times J_{\text{RDF}}/J_c$,其中 C_{s2} 为RDF产热产生的碳排放量, tCO_2eq ; J_{RDF} 为RDF热值, $20 \text{ MJ}/\text{m}^3$; J_c 为煤炭热值, $25 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 。

e)土壤堆肥碳排放。研究表明土壤类材料堆肥时通过微生物作用,可将有机废弃物转化为稳定的腐殖质,同时固定有机碳^[13]。土壤堆肥的碳排放量计算公式为 $C_n = -T_n \times EF_p$,其中: C_n 为土壤堆肥产生的碳排放量, tCO_2eq ; T_n 为土壤堆肥的质量, t ;

EF_p 为单位质量土壤堆肥的固碳因子, $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{t}$ 。

2 垃圾填埋场场景的碳排放核算及其碳减排分析

2.1 垃圾填埋场碳排放核算过程

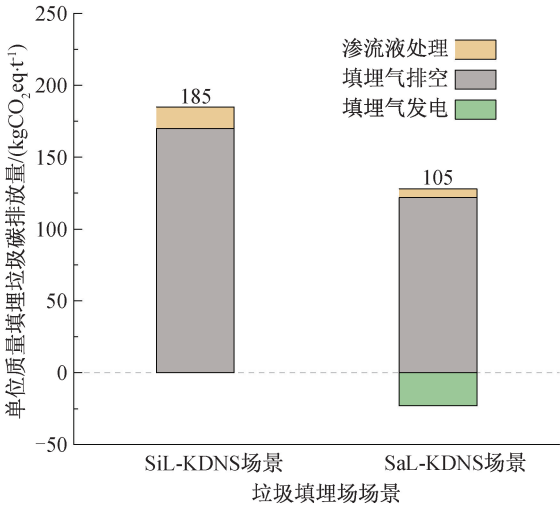
根据相关文献和统计资料绘制碳排放因子表,如表2所示。将碳排放因子和其他参数值代入生活垃圾填埋场 KDNS 场景和 LMRS 场景生命周期碳排放模型,对单位质量填埋垃圾在 KDNS 场景、WtM 场景和 WtE 场景各个阶段以及整个生命周期的碳排放进行计算,并根据计算结果分析 WtM 场景和 WtE 场景的主要碳排放和碳减排路径,探究其主要碳减排驱动因素与碳减排量的影响规律,最终确定单位质量填埋垃圾基于 KDNS 场景时,其在 WtM 场景和 WtE 场景的碳减排量。

2.2 垃圾填埋场碳排放量分析

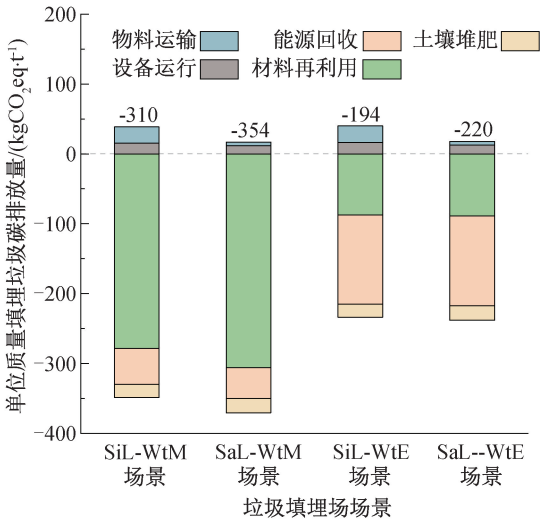
本节讨论了我国单位质量填埋垃圾在 KDNS 场景、WtM 场景和 WtE 场景的总碳排放量、主要碳排放和碳减排路径。总碳排放量是正值表示该场景为碳排放过程,总碳排放量是负值表示该场景为碳减排过程。单位质量 MSW 在 KDNS 场景的碳排放量如图4(a)所示。SiL 和 SaL 单位质量填埋垃圾在 KDNS 场景的总碳排放量分别为 $185 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{t}$ 和 $105 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{t}$,表明生活垃圾填埋场在 KDNS 场景会增加碳排放。单位质量 MSW 在 WtM 场景

表 2 碳排放因子汇总表

| 因子符号 | 符号含义 | 因子单位 | 因子值 |
|-----------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| EF_f | 单位质量渗滤液处理的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 0.11 ^[22] |
| EF_{e1} | 甲烷发电 1 MWh 的碳排放因子 | tCO ₂ eq/MWh | 0.39 ^[23] |
| EF_{e2} | 燃煤发电 1 MWh 的碳排放因子 | tCO ₂ eq/MWh | 0.92 ^[23] |
| EF_{e3} | 国家电网发电 1 MWh 的碳排放因子均值 | tCO ₂ eq/MWh | 0.58 ^[24-25] |
| EF_d | 单位质量柴油使用的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 3.15 ^[26] |
| EF_h | 单位质量物料通过重型货车货运 1 km 的碳排放因子 | kgCO ₂ eq/(t·km) | 0.05 ^[27] |
| EF_{m1} | 单位质量玻璃二次回收处理的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 0.35 ^[28] |
| EF_{m2} | 单位质量金属二次回收处理的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 0.72~1.53 ^[29-30] |
| EF_{m3} | 单位质量塑料二次回收处理的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 0.56 ^[10] |
| EF_{m4} | 单位质量砂石二次回收处理的碳排放因子 | kgCO ₂ eq/t | 2.50 ^[10] |
| EF_{m5} | 单位质量纸张二次回收处理的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 0.66 ^[13] |
| EF_{n1} | 单位质量玻璃原材料开采生产的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 0.66 ^[28] |
| EF_{n2} | 单位质量金属原材料开采生产的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 2.81~15.80 ^[29-30] |
| EF_{n3} | 单位质量塑料原材料开采生产的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 3.24 ^[31] |
| EF_{n4} | 单位质量砂石原材料开采生产的碳排放因子 | kgCO ₂ eq/t | 7.76 ^[10] |
| EF_{n5} | 单位质量纸张原材料开采生产的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 1.82 ^[32] |
| EF_{r1} | 单位质量热处理残渣生产水泥的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | -0.75 ^[33] |
| EF_{r2} | 单位质量底灰无害化处理的碳排放因子 | tCO ₂ eq/t | 0.04 ^[34] |
| EF_p | 单位质量腐殖土堆肥的固碳量 | tCO ₂ eq/t | -0.05 ^[13] |



(a) KDNS场景



(b) WtM场景和WtE场景

图 4 单位质量 MSW 在不同场景的碳排放量

和 WtE 场景的碳排放量如图 4(b) 所示。SiL 和 SaL 单位质量填埋垃圾在 WtM 场景的总碳排放量分别为 $-310\text{ kgCO}_2\text{eq/t}$ 和 $-354\text{ kgCO}_2\text{eq/t}$, 其在 WtE 场景的总碳排放量分别为 $-194\text{ kgCO}_2\text{eq/t}$ 和 $-220\text{ kgCO}_2\text{eq/t}$, 表明垃圾填埋场在 WtM 场景和 WtE 场景均可实现碳减排, 其中 WtM 场景的碳减排潜力是 WtE 场景的 1.6 倍。单位质量 MSW 在填埋场 LMRS 场景的碳排放路径的碳排放量如表 3 所示。从表 3 可以发现: LMRS 场景的碳排放路径的碳排放量与 WtM 场景或 WtE 场景的选择影响关系较小, 其碳排放量主要取决于填埋场类型。SiL 单位质量垃圾在 LMRS 场景的碳排放总量高于

SaL, 前者是后者的 1.2 倍; SiL 的主要碳排放为大宗设备的运输, SaL 的主要碳排放为垃圾细筛回收过程。单位质量 MSW 在填埋场 LMRS 场景的碳减排路径的碳减排量如表 4 所示。从表 4 可以发现: LMRS 场景的碳减排路径的碳减排量与填埋场类型影响关系较小, 其碳减排量主要取决于 WtM 场景或 WtE 场景的选择。WtM 场景主要的碳减排方式为塑料再生利用, 其碳减排量在碳减排总量中的占比为 50%; WtE 场景主要的碳减排方式为 RDF 在水泥窑与煤混燃, 其碳减排量在碳减排总量中的占比为 46%。

表 3 单位质量 MSW 在填埋场 LMRS 场景的碳排放路径的碳排放量 kgCO₂ eq/t

| 场景 | 填埋场 | 设备运行 | | | | | 物料运输 | | | | |
|-----|-----|------|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|-------|
| | | 挖掘粗筛 | 细筛回收 | 土地回填 | 渗滤液处理 | RDF 生产 | 粗筛→细筛 | 危废→处理 | 材料→加工 | 可燃材料→热处理 | 设备→场地 |
| WtM | SiL | 4.05 | 4.57 | 0.26 | 5.57 | 0.70 | 0.54 | 0.01 | 1.33 | 0.60 | 21.01 |
| | SaL | 4.05 | 4.60 | 0.25 | 2.23 | 0.59 | 0.27 | 0.02 | 1.18 | 0.51 | 3.15 |
| WtE | SiL | 4.05 | 4.57 | 0.26 | 5.57 | 1.73 | 0.54 | 0.01 | 0.95 | 1.49 | 21.01 |
| | SaL | 4.05 | 4.60 | 0.25 | 2.23 | 1.74 | 0.27 | 0.02 | 0.76 | 1.50 | 3.15 |

表 4 单位质量 MSW 在填埋场 LMRS 场景的碳减排路径的碳减排量 kgCO₂ eq/t

| 场景 | 填埋场 | 材料再利用 | | | | | 能源回收 | | | 土壤堆肥 |
|-----|-----|--------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|---------|--------|
| | | 再生金属 | 再生塑料 | 再生玻璃 | 再生砂石 | 再生纸张 | 气化发电 | 焚烧发电 | 水泥窑助燃 | |
| WtM | SiL | -79.09 | -171.77 | -7.12 | -1.14 | -19.27 | -5.35 | -2.83 | -43.32 | -18.91 |
| | SaL | -80.64 | -198.16 | -7.12 | -0.87 | -19.24 | -4.54 | -2.40 | -36.77 | -20.68 |
| WtE | SiL | -79.09 | 0.00 | -7.12 | -1.14 | 0.00 | -13.23 | -7.00 | -107.23 | -18.91 |
| | SaL | -80.64 | 0.00 | -7.12 | -0.87 | 0.00 | -13.27 | -7.00 | -108.34 | -20.68 |

2.3 LMRS 场景碳减排影响因素分析

从垃圾填埋场碳排放量的分析可知,WtM 场景和 WtE 场景的最大碳减排影响因素分别为塑料再生和 RDF 热处理,因此本文对塑料利用率、RDF 热值、RDF 利用率等影响因素进行分析。SiL 和 SaL 中再生塑料、RDF 热处理的碳减排量占总碳排放量的比例相近,故本文以 SaL 作为研究对象,其碳排放量随碳减排影响因素的变化规律同样适用于 SiL。

单位质量 MSW 采用 WtM 场景时碳排放量随塑料回收率的变化关系如图 5 所示,其中 R_1 表示再生塑料碳减排量占 WtM 场景总碳排放量的比例。在 SaL 中,当塑料利用率从 80%提高至 90%,WtM 场景的再生塑料碳减排量在总碳排放量中的占比将从 55%变化至 71%;当塑料利用率从 80%降低至 70%,再生塑料碳减排量在总碳排放量中的占比将从 55%变化至 34%。这表明生活垃圾填埋场在 WtM 场景时,其碳减排量随塑料利用率增大而增大。

单位质量 MSW 采用 WtE 场景时碳排放量随 RDF 热值的变化关系如图 6(a)所示。 R_2 表示 RDF 水泥窑热处理产生的碳减排量占 WtE 场景总排放量的比例。当 RDF 热值从 20 MJ 提高至 25 MJ,RDF 水泥窑热处理的碳减排量在 WtE 场景总碳排放量中的占比从 50%变化至 78%;当 RDF 热值从 20 MJ 降低至 15 MJ,RDF 水泥窑热处理的碳减排量在总碳排放量中的占比从 50%变化至 18%。结果表明提高 RDF 的热值增大了 RDF 在水泥窑产热的碳减排量。单位质量 MSW 采用 WtE 场景时碳排放量随 RDF 利用率的变化

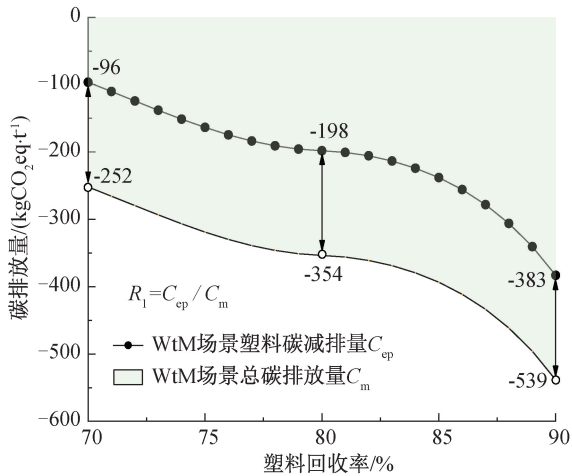


图 5 单位质量 MSW 采用 WtM 场景碳排放量随塑料回收率的变化关系曲线

关系如图 6(b)所示。 R_3 表示再生能源回收的碳减排量占 WtE 场景总碳排放量的比例。当 RDF 利用率从 80%提高至 90%,RDF 热处理产生的碳减排量在 WtE 场景总碳排放量中的占比从 55%变化至 71%;当 RDF 利用率从 80%降低至 70%,RDF 热处理产生的碳减排量在总碳排放量中的占比从 55%变化至 38%。这表明 RDF 热处理技术产生的碳减排量随 RDF 利用率的增加而增大。

2.4 LMRS 场景的碳减排量分析

本文采用 WtM 场景和 WtE 场景的碳减排量,核算了我国生活垃圾填埋场相对于 KDNS 场景。单位质量 MSW 采用 WtM 场景或 WtE 场景的碳减排量如图 7 所示,图中计算公式用于核算 WtM 场景和 WtE 场景的碳减排量,其中: C 为垃圾填埋场在 WtM 场景或 WtE 场景的碳减排量, P 为填埋垃

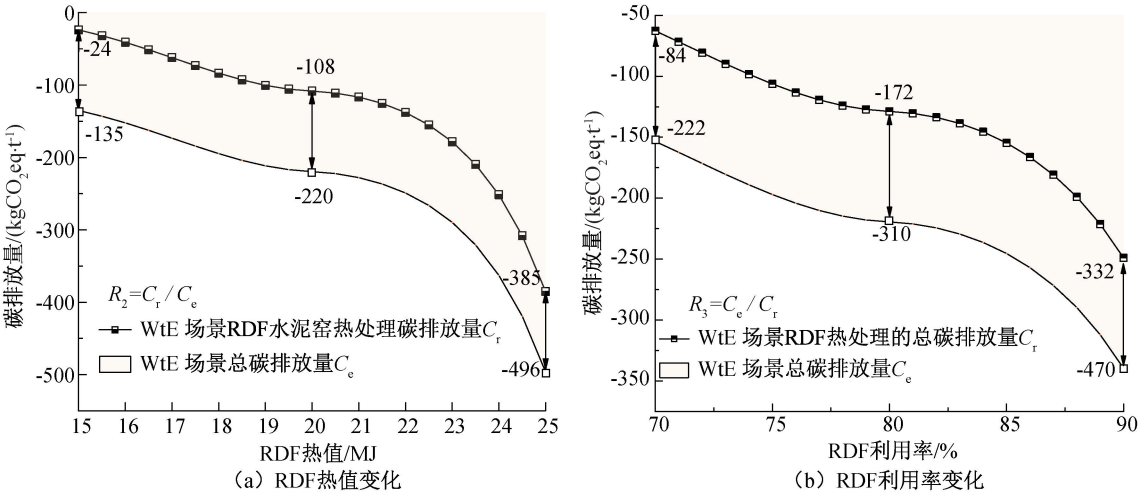


图 6 单位质量 MSW 采用 WtE 场景碳排放量随 RDF 的变化关系曲线

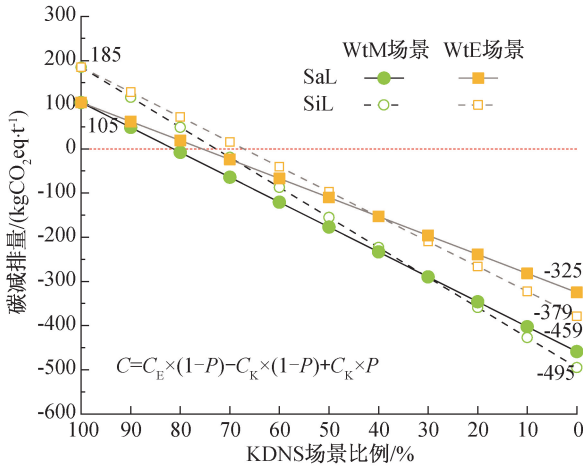


图 7 单位质量 MSW 采用 WtM 场景或 WtE 场景的碳减排量

圾采用 KDNS 场景的量在填埋垃圾总量的比例, $1-P$ 为填埋垃圾采用 WtM 场景或 WtE 场景的量在填埋垃圾总量的比例, C_e 为填埋垃圾在 WtM 场景或 WtE 场景的总碳排放量, C_k 为填埋垃圾 KDNS 场景的总碳排放量。由图 7 可知,当填埋场单位质量垃圾全部采用 WtM 场景时,其碳减排量达到最大,为 $-459\sim-495\text{ kgCO}_2\text{eq/t}$ 。垃圾填埋场碳中和表现为其在 WtM 场景或 WtE 场景的碳减排恰好抵消其在 KDNS 场景的碳排放,即填埋垃圾采用 WtM 场景的量占填埋垃圾总量中的比例为 $19\%\sim27\%$,或其采用 WtE 场景的量占填埋垃圾总量中的比例为 $24\%\sim33\%$,此时垃圾填埋场处于碳中和状态。

3 结 论

本文采用碳排放因子法构建了生活垃圾填埋场开采再利用的全生命周期碳排放模型,通过该模型

核算和对比了单位质量生活填埋垃圾在 KDNS 场景、WtM 场景和 WtE 场景的碳排放量,分析了 WtM 场景和 WtE 场景碳排放的主要驱动因素与碳排放量的变化规律,评估了单位质量生活填埋垃圾在 WtM 场景和 WtE 场景的碳减排潜力。所得主要结论如下:

- a)生活垃圾填埋场单位质量垃圾采用 WtM 场景的碳排放量低于 WtE 场景,前者的碳减排潜力是后者的 1.6 倍。
- b)提高塑料回收率将显著提升 WtM 场景的碳减排总量,提高 RDF 热处理量(RDF 热值和利用率)有助于增加 WtE 场景的碳减排总量,其中 RDF 热值变化对 WtE 场景的碳减排影响大于 RDF 利用率变化对其碳减排影响。
- c)在填埋场 KDNS 场景基准下,WtM 场景或 WtE 场景将直接影响生活垃圾填埋场 LMRS 场景的总碳减排量,另外垃圾填埋场类型也会影响总碳减排量。仅从碳减排潜力考虑,SiL 单位质量垃圾在 WtM 场景的碳减排潜力最佳。
- d)减少垃圾填埋场生命周期碳排放的有效措施包括:加快垃圾稳定化,提前开展垃圾填埋场的开采;提高垃圾填埋场甲烷收集利用率,减少填埋气泄漏;提高垃圾再生利用技术和 RDF 热处理技术,降低处理过程中二氧化碳等温室气体排放。

本文构建了生活垃圾填埋场开采再利用的全生命周期碳排放模型,可用于定量核算填埋场材料与能源多路径利用技术下的碳排放量。本文可为填埋场开采再利用路径的优选提供思路,也可为我国生活垃圾填埋场开采再利用的碳减排潜力评估提供参考。

参考文献:

- [1] 肖电坤. 垃圾填埋场好氧降解稳定化模型及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2023: 3.
- [2] 国家统计局. 2020年城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 53-60.
- [3] 郭含文, 徐海云, 聂小琴, 等. 我国城乡生活垃圾处理温室气体排放清单研究[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 286-290.
- [4] 仲璐, 胡洋, 王璐. 城市生活垃圾的温室气体排放计算及减排思考[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(5): 45-48.
- [5] Hogland W. Remediation of an old landfill site: Soil analysis, leachate quality and gas production [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2002, 9 (S1): 49-54.
- [6] 肖旭东. 绿色建筑生命周期碳排放及生命周期成本研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 2-6.
- [7] 郑康琪, 陈萍, 邱钰峰, 等. 生活垃圾腐殖土物化性质及资源化利用途径: 以浙江省某高龄期填埋场为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3254-3264.
- [8] 白秀佳, 张红玉, 顾军, 等. 填埋场陈腐垃圾理化特性与资源化利用研究[J]. 环境工程, 2021, 39(2): 116-120.
- [9] Cappucci G M, Avolio R, Carfagna C, et al. Environmental life cycle assessment of the recycling processes of waste plastics recovered by landfill mining [J]. Waste Management, 2020, 118: 68-78.
- [10] Huang T, Tang Y T, Sun Y, et al. Life cycle environmental and economic comparison of thermal utilization of refuse derived fuel manufactured from landfilled waste or fresh waste [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 304: 114156.
- [11] Jones P T, Geysen D, Tielemans Y, et al. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 55: 45-55.
- [12] Sankar C V R, Michele J, Wahidul B, et al. Environmental impact evaluation of landfill mining of legacy waste with on-site sorting using life cycle assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(11): 30033-30047.
- [13] Danthurebandara M, Van Passel S, Vanderreydt I, et al. Assessment of environmental and economic feasibility of Enhanced Landfill Mining [J]. Waste Management, 2015, 45: 434-447.
- [14] Quaghebeur M, Laenen B, Geysen D, et al. Characterization of landfilled materials: screening of the enhanced landfill mining potential[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 55: 72-83.
- [15] Kaartinen T, Sormunen K, Rintala J. Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 55: 56-66.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Synthesis Report: AR4[R/OL]. (2007-04-23) [2023-10-04]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf.
- [17] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006: 2.4-2.14.
- [18] 陈云敏, 刘晓成, 徐文杰, 等. 填埋生活垃圾稳定化特征与可开采性分析: 以我国第一代卫生填埋场为例[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(2): 199-211.
- [19] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R/OL]. (2019-05-12) [2023-10-04]. https://www.researchgate.net/publication/333984998_2019_refinement_to_the_2006_ipcc_guidelines_for_national_greenhouse_gas_inventories_vol_1_chapter_6_quality_assurancequality_control_and_verification.
- [20] Cai B F, Lou Z Y, Wang J N, et al. CH₄ mitigation potentials from China landfills and related environmental co-benefits[J]. Science Advances, 2018, 4(7): eaar8400.
- [21] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究: 以深圳为例[D]. 深圳: 深圳大学, 2017: 32.
- [22] Wang X J, Jia M S, Chen X H, et al. Greenhouse gas emissions from landfill leachate treatment plants: A comparison of young and aged landfill [J]. Waste Management, 2014, 34(7): 1156-1164.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 2019-2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业): 国环规气候[2020]3 号[A/OL]. (2020-12-29) [2023-10-04]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html.
- [24] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-16(2023-06-27) [2023-10-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452>.
- [25] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告: 2019[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 11-12.
- [26] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [R/OL]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/W020190905507324625877.pdf>.

[27] 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 等. 中国分省道路交通二氧化碳排放因子[J]. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3122-3130.

[28] U. S. Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery. Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM) [R/OL]. (2019-10-08) [2023-10-04]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-10/documents/warm_v15_management_practices_updated_10-08-2019.pdf.

[29] Zhang Y L, Sun M X, Hong J L, et al. Environmental footprint of aluminum production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 1242-1251.

[30] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 74-82.

[31] 周杨, 甘陆军, 韩方方. 基于生命周期评价的快递碳足迹核算[J]. 物流技术, 2021, 40(6): 104-109.

[32] 陈莎, 杨孝光, 李焱佩, 等. 中国纸产品全生命周期 GHG 排放分析[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(6): 944-949.

[33] Danthurebandara M, Van Passel S, Machiels L, et al. Valorization of thermal treatment residues in Enhanced Landfill Mining: Environmental and economic evaluation [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 99: 275-285.

[34] 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.

(责任编辑:康 锋)