

宋晓聪,邓陈宁,朱芳,等.基于碳足迹视角的再生陶粒项目碳减排研究[J].中国环境科学,2025,45(6):3522-3530.

Song X C, Deng C N, Zhu F, et al. Research on carbon emission reduction of regenerated ceramsite projects from the perspective of carbon footprint [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3522-3530.

基于碳足迹视角的再生陶粒项目碳减排研究

宋晓聪¹,邓陈宁¹,朱芳¹,李林子¹,谢明辉^{1*},沈鹏¹,陈忱¹,杜帅² (1.中国环境科学研究院,环境管理研究中心,北京 100012; 2.中国环境科学研究院,环境技术工程有限公司,北京 100012)

摘要: 从碳足迹角度,结合国家核证自愿减排量(CCER)方法学,建立二次灰渣再生陶粒项目碳减排计量模型,以4万t/a二次灰渣再生陶粒项目为例进行实证分析,评估项目碳减排量,基于碳排放关键因素解析,对二次灰渣再生陶粒项目碳减排潜力进行优化评估.结果表明,4万t/a二次灰渣再生陶粒项目2023a总的CO₂e减排量为3.26万t,其中,陶粒生产阶段减排贡献达到95%.从碳足迹视角分析,项目年CO₂e排放总量约6.49万t,加工生产和原料获取阶段是陶粒项目碳排放的关键环节.从CO₂排放源类别分析,二次灰渣,污泥等固废原料替代是陶粒行业降碳的重点,另外,固废原料添加的优先级顺序依次为二次灰渣,污泥和废弃土.关于碳减排潜力优化,绿色原料,清洁能源,低碳运输和再生循环4种低碳情景下,二次灰渣再生陶粒项目分别实现6.93,3.42,3.56和3.28万t CO₂e减排量,绿色原料情景下陶粒行业蕴含0.09亿t的碳减排潜力.

关键词: 碳足迹; 固体废物; 陶粒; 碳减排效益; 关键因素

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)06-3522-09

Research on carbon emission reduction of regenerated ceramsite projects from the perspective of carbon footprint. SONG Xiao-cong¹, DENG Chen-ning¹, ZHU Fang¹, LI Lin-zi¹, XIE Ming-hui^{1*}, SHEN Peng¹, CHEN Chen¹, DU Shuai² (1.Environmental Management Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.Environmental Technology & Engineering Co., Ltd, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2025,45(6): 3522~3530

Abstract: This study establishes a carbon emission reduction measurement model for the secondary ash recycled ceramsite project from the perspective of carbon footprint, combined with the National Certified Voluntary Emission Reduction (CCER) methodology. Taking the 40000 tons/year secondary ash recycled ceramsite project as an example, empirical analysis is conducted to evaluate the project's carbon emission reduction. Based on the analysis of key carbon emission factors, the carbon emission reduction potential of the secondary ash recycled ceramsite project is optimized and evaluated. The results show that the total CO₂e emission reduction of the 40000 tons/year secondary ash slag regenerated ceramsite project in 2023 is 32600 tons, of which the ceramsite production stage contributes to 95% of the emission reduction. From the perspective of carbon footprint analysis, the total annual CO₂e emissions of the project are about 64900 tons, and the processing, production, and raw material acquisition stages are key links in the carbon emissions of the ceramsite project. From the analysis of CO₂ emission source categories, the substitution of solid waste materials such as secondary ash and sludge is the key to carbon reduction in the ceramsite industry. In addition, the priority order of adding solid waste materials is secondary ash, sludge, and waste soil. Regarding the optimization of carbon emission reduction potential, under four low-carbon scenarios of green raw materials, clean power grid, low-carbon transportation, and recycling, the secondary ash regenerated ceramsite project achieved CO₂e emission reductions of 69300, 34200, 35600 and 32800 tons, respectively. Under the green raw material scenario, the ceramsite industry has a carbon emission reduction potential of 9million tons.

Key words: carbon footprint; solid waste; ceramsite; carbon emission reduction benefits; critical factor

陶粒行业是典型的资源密集型产业,为了满足低碳转型的需求^[1],同时在温室气体自愿减排交易市场这一政策加持下,固废再生陶粒成为陶粒行业的热点,当前中国90%以上的陶粒都掺入了固废原料^[2].飞灰和铝灰是中国典型的二次灰渣,产生量大,涉及面广,其无害化处理和再利用具有挑战性^[3].2020a以来中国铝灰,飞灰产生量每年分别达到400

万^[4]和700万t^[5]以上,二次灰渣含有大量的Al₂O₃, CaO和SiO₂等成分^[3],在陶粒生产具有广阔的应用前景^[6].

收稿日期: 2024-11-16

基金项目: 宁波市重大科技任务攻关项目(2022Z031);中央级公益性科研院所基金科研业务专项(2024YSKY-60)

* 责任作者, 研究员, xiemh@craes.org.cn

目前,关于固废陶粒碳排放的研究仍然处于起步阶段.2013a 之后,我国发布 24 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南,为碳排放核算工作提供了理论和技术支持,但是并未包含陶粒行业.此后,我国备案的 12 批(共 200 个)自愿减排方法学以及国际上的 CDM^[7],也未涉及固废陶粒领域.国内外的学者针对固废陶粒的制备技术^[6,8],机理^[9]和产品性能^[10-15]进行了大量的研究,但对固废陶粒碳排放的研究比较少,涉及到碳排放的也主要是有关陶粒产品层面生命周期评价的一些探索.例如,Zhao 等^[3]对比了两种飞灰用陶粒的生命周期环境影响,结果显示免烧陶粒的温室效应(GWP)是回转窑焙烧陶粒的 2 倍,但是 Gao 等^[16]发现相反的结论,提出与焙烧陶粒轻集料相比渣土免烧陶粒轻集料 GWP 降低 11.7%~79.2%,此外渣土再生的陶粒轻集料(0.05tCO₂e/t)比原生陶粒轻集料的 GWP 最高可降低 84%;高唱^[17]又提出不同的生命周期评价研究结果,他表示再生陶粒集料 CO₂ 排放是天然陶粒集料的 7 倍以上;以上研究范围均是从摇篮到大门,但是由于时空影响,各研究结论相差较大.还有许多针对陶粒制品的生命周期影响评价研究,不过多集中于国外,例如 Xing 等^[18]和 Younes 等^[19]分别发现澳大利亚和埃及再生陶粒集料混凝土相比于天然陶粒集料混凝土可产生 30%以上的 GWP 减排效益;Colangelo

等^[20]和 Sabău 等^[21]和则表示再生陶粒集料混凝土 GWP 只比天然陶粒集料混凝土降低 10%左右.国内研究相对较少且时间久远,例如 10a 前周越^[22]对比了三种陶粒制品碳足迹,污泥陶粒加气混凝土砌块碳足迹(437.90kgCO₂/m³)高于粉煤灰加气混凝土砌块(301.03kgCO₂/m³)但是低于普通烧结砖(488.79kgCO₂/m³).

综上所述,国内固废再生陶粒项目的碳减排方法学研究较少,现有的研究主要是针对产品层面的生命周期评价,从 GWP 间接分析陶粒碳排放,且结论不一.另外直接针对陶粒碳排放的研究比较陈旧,大多只涉及能源燃烧,生产工艺和电力热力碳排放,缺少从碳足迹视角探索的研究.本研究基于碳足迹视角,研究开发适合中国国情的二次灰渣再生陶粒项目的碳减排方法,并开展减排效益评估优化工作,旨在为陶粒行业低碳转型提供科技支撑.

1 研究方法

1.1 二次灰渣再生陶粒项目碳减排计量方法

1.1.1 系统边界 项目边界包括基准线情景或项目活动中从原料获取,陶粒烧制,陶粒运输到废陶粒处置的所有相关活动范围.项目系统边界如图 1 所示,项目计入期须在项目寿命期限范围之内,本项目计入期按照 1a 计.

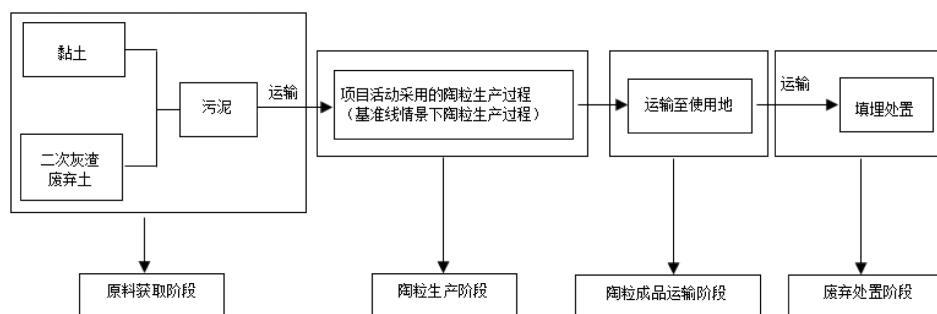


图 1 系统边界

Fig.1 System boundary

1.1.2 基准线情景和项目情景设置 据统计,全国黏土固废类陶粒产量占到 80%以上,此外全国近 50%的陶粒生产企业均掺加污泥作为原料来再生陶粒^[2,23],因此本研究以污泥,黏土混合物为原料生产陶粒作为基准线情景;项目情景为以二次灰渣,污泥,废弃土为原料再生陶粒.其中污泥是表面处理污泥

(电镀污泥),二次灰渣主要是二次铝灰.

1.1.3 项目减排计量模型 (1)基准线排放量:基准线排放主要包括在没有项目活动时黏土,污泥等原料获取阶段的碳排放,陶粒生产导致的碳排放,陶粒成品运输到使用现场的碳排放以及废弃处置阶段碳排放(包括废陶粒处置和项目所用二次灰渣处置).

计算公式如下:

$$BC_r = BC_{原料,r} + BC_{生产,r} + BC_{运输,r} + BC_{废陶粒,r} + BC_{灰渣,r} \quad (1)$$

式中: BC_r 表示第 ra 的基准线排放, tCO_2e ; $BC_{原料,r}$ 表示第 ra 原料获取阶段的基准线排放, tCO_2e ; $BC_{生产,r}$ 表示第 ra 陶粒生产阶段的基准线排放, tCO_2e ; $BC_{运输,r}$ 表示第 ra 陶粒运输阶段的基准线排放, tCO_2e ; $BC_{废陶粒,r}$ 表示第 ra 废陶粒处置的基准线排放, tCO_2e ; $BC_{灰渣,r}$ 表示第 ra 二次灰渣处置的基准线排放, tCO_2e ;各阶段的碳排放计算方法如下:

原料获取阶段的基准线排放可进一步划分成原料开采和原料运输的排放.即:

$$BC_{原料,r} = BC_{原开采,r} + BC_{原运输,r} \quad (2)$$

$$BC_{原开采,r} = \sum_{i=1}^a O_i \cdot S_{基准i,r} \quad (3)$$

$$BC_{原运输,r} = \sum_{i=1}^a A_{基准i,r} \cdot S_{基准i,r} \cdot D_i \cdot t \quad (4)$$

式中: $BC_{原开采,r}$ 表示第 ra 原料开采的基准线排放, tCO_2e ; $BC_{原运输,r}$ 表示第 ra 原料运输至陶粒厂的基准线排放, tCO_2e ; a 表示基准情景下第 ra 原料使用种类; O_i 表示原材料 i 开采的碳足迹因子, tCO_2e/t ; $S_{基准i,r}$ 表示基准情景下第 ra 原料 i 的消耗量, t ; $A_{基准i,r}$ 表示基准情景下第 ra 原料 i 由开采地运输到陶粒生产厂的平均运输距离, km ; D_i 表示原料 i 所选运输工具的碳足迹因子, $tCO_2e/(t \cdot km)$; t 表示空车修正系数.

陶粒生产阶段的基准线排放主要包括生产工艺过程.能源燃烧和外购电力热力的碳排放.计算公式如下:

$$BC_{生产,r} = BE_{生产,r} + BS_{生产,r} + BH_{生产,r} \quad (5)$$

$$BE_{生产,r} = \sum_{i=1}^n E_{基准i,r} \cdot F_i \quad (6)$$

$$BS_{生产,r} = \sum_{i=1}^a S_{基准i,r} \cdot S_i \quad (7)$$

$$BH_{生产,r} = H_{基准电,r} \cdot h_{电} + H_{基准热,r} \cdot h_{热} \quad (8)$$

式中: $BE_{生产,r}$ 表示第 ra 陶粒生产阶段能源燃烧产生的排放, tCO_2e ; $BS_{生产,r}$ 表示第 ra 陶粒生产阶段生产工艺过程产生的排放, tCO_2e ; $BH_{生产,r}$ 表示第 ra 陶粒生产阶段外购电力热力产生的排放, tCO_2e ; n 表示基准情景下第 ra 陶粒生产能源使用种类; $E_{基准i,r}$ 表示基准情景下第 ra 陶粒生产阶段 i 类能源用量, t 或 m^3 ; F_i 表示能源的碳足迹因子, tCO_2e/t 或 tCO_2e/m^3 ; $S_{基准i,r}$ 表示基准情景下第 ra 有机质原料 i 的消耗量, t ; S_i 表示有机质原料的碳足迹因子, tCO_2e/t ; $H_{基准电,r}$ 表示基准情景下第 ra 陶粒消耗的外购电力量, $MW \cdot h$; $h_{电}$ 表示电力碳足迹因子, $tCO_2e/MW \cdot h$; $H_{基准热,r}$ 表示基准情

景下第 ra 陶粒消耗的外购热力量, GJ ; $h_{热}$ 表示热力碳足迹因子, tCO_2e/GJ .

陶粒运输阶段的基准线排放计算公式如下:

$$BC_{运输,r} = J_r \cdot p_r \cdot D \cdot t \quad (9)$$

式中: J_r 表示第 ra 陶粒由陶粒厂至使用现场的平均运输距离, km ; p_r 表示第 ra 陶粒的产量, t .

废陶粒处置阶段的基准线排放主要源自废陶粒运输到填埋场以及填埋过程使用设备运行的能量消耗和填埋气.计算公式如下:

$$BC_{废陶粒,r} = BG_{处置,r} + BK_{处置,r} \quad (10)$$

$$BG_{处置,r} = \sum_{i=1}^{n_1} G_{i,r} \cdot F_i \quad (11)$$

$$BK_{处置,r} = K_r \cdot q_r \cdot D \cdot t \quad (12)$$

式中: $BG_{处置,r}$ 表示第 ra 废陶粒处置阶段能源燃烧产生的排放, tCO_2e ; $BK_{处置,r}$ 表示第 ra 废陶粒处置阶段运输产生的排放, tCO_2e ; n_1 表示第 ra 废陶粒处置阶段能源使用种类; $G_{i,r}$ 表示第 ra 废陶粒处置阶段 i 能源的用量, t ; K_r 表示第 ra 废陶粒由使用地至填埋场的平均运输距离, km ; q_r 表示第 ra 废陶粒的处置量, t (损耗率按5%考虑^[24]).

二次灰渣处置的基准线排放:由于二次灰渣没有再利用,需要填埋会造成碳排放,计算公式如下:

$$BC_{灰渣,r} = BG_{灰渣,r} + BK_{灰渣,r} \quad (13)$$

$$BG_{灰渣,r} = \sum_{i=1}^{n_2} G_{灰渣i,r} \cdot F_i \quad (14)$$

$$BK_{灰渣,r} = K_{灰渣,r} \cdot q_{灰渣,r} \cdot D \cdot t \quad (15)$$

式中: $BG_{灰渣,r}$ 表示第 ra 二次灰渣填埋能源燃烧产生的排放, tCO_2e ; $BK_{灰渣,r}$ 表示第 ra 二次灰渣填埋运输产生的排放, tCO_2e ; n_2 表示第 ra 二次灰渣填埋能源使用种类; $G_{灰渣i,r}$ 表示第 ra 二次灰渣填埋 i 能源的用量, t ; $K_{灰渣,r}$ 表示第 ra 二次灰渣由产生地至填埋场的平均运输距离, km ; $q_{灰渣,r}$ 表示第 ra 二次灰渣的处置量, t .

(2)项目排放量:项目排放主要包括因项目需要污泥,二次灰渣和废弃土等原料运输至陶粒生产厂的排放,陶粒生产导致的碳排放,陶粒成品运输到使用现场的碳排放以及陶粒使用完毕后处置造成的碳排放.计算公式如下:

$$PC_r = PC_{原运输,r} + PC_{生产,r} + PC_{运输,r} + PC_{废陶粒,r} \quad (16)$$

式中: PC_r 表示项目情景下第 ra 的项目排放, tCO_2e ; $PC_{原运输,r}$ 表示项目情景下第 ra 原料运输至陶粒厂的排放, tCO_2e ; $PC_{生产,r}$ 表示项目情景下第 ra 陶粒生产的排放, tCO_2e ; $PC_{运输,r}$ 表示项目情景下第 ra 成品陶

粒运输的排放, tCO_2e ; $PC_{\text{废陶粒},r}$ 表示项目情景下第 ra 废陶粒处置的排放, tCO_2e .

各阶段的碳排放计算方法如下:

项目情景下原料运输至陶粒厂的排放: 主要指污泥, 二次灰渣和废弃土等原料运输到陶粒生产厂的碳排放, 计算公式如下:

$$PC_{\text{原运输},r} = \sum_{i=1}^{\beta} A_{\text{项目 } i,r} \cdot S_{\text{项目 } i,r} \cdot D_i \cdot t \quad (17)$$

式中: β 表示项目情景下第 ra 运输原料的种类; $A_{\text{项目 } i,r}$ 项目情景下第 ra 原料 i 由开采地至陶粒厂的平均运输距离, km; $S_{\text{项目 } i,r}$ 项目情景下第 ra 原料 i 的消耗量, t.

项目情景下陶粒生产阶段的排放主要包括生产工艺, 能源燃烧和外购电力热力的碳排放. 计算公式如下:

$$PC_{\text{生产},r} = PE_{\text{生产},r} + PS_{\text{生产},r} + PH_{\text{生产},r} \quad (18)$$

$$PE_{\text{生产},r} = \sum_{i=1}^{\gamma} E_{\text{项目 } i,r} \cdot F_i \quad (19)$$

$$PS_{\text{生产},r} = \sum_{i=1}^{\beta} S_{\text{项目 } i,r} \cdot S_i \quad (20)$$

$$PH_{\text{生产},r} = H_{\text{项目电},r} \cdot h_{\text{电}} + H_{\text{项目热},r} \cdot h_{\text{热}} \quad (21)$$

式中: $PE_{\text{生产},r}$ 表示项目情景下第 ra 陶粒生产阶段能源燃烧产生的排放, tCO_2e ; $PS_{\text{生产},r}$ 表示项目情景下第 ra 陶粒生产阶段生产工艺过程产生的排放, tCO_2e ; $PH_{\text{生产},r}$ 表示项目情景下第 ra 陶粒生产阶段外购电

力热力产生的排放, tCO_2e ; γ 表示项目情景下陶粒生产阶段能源消耗种类; $E_{\text{项目 } i,r}$ 表示项目情景下第 ra 陶粒生产阶段 i 类能源用量, t 或 m^3 ; β 表示项目情景下第 ra 陶粒生产有机质原料使用种类; $H_{\text{项目电},r}$ 表示项目情景下第 ra 陶粒消耗的外购电力量, MW·h; $H_{\text{项目热},r}$ 表示项目情景下第 ra 陶粒消耗的外购热量, GJ.

项目情景下陶粒运输阶段和废陶粒处置的排放($PC_{\text{运输},r}$ 和 $PC_{\text{处置},r}$) 计算同基准线情景, 排放量两者相同.

$$PC_{\text{运输},r} = J_r \cdot p_r \cdot D \cdot t \quad (22)$$

$$PC_{\text{处置},r} = PG_{\text{处置},r} + PK_{\text{处置},r} \quad (23)$$

$$PG_{\text{处置},r} = \sum_{i=1}^{\eta} G_{i,r} \cdot F_i \quad (24)$$

$$PK_{\text{处置},r} = K_r \cdot q_r \cdot D \cdot t \quad (25)$$

式中: $PG_{\text{处置},r}$ 表示第 ra 废陶粒处置阶段能源燃烧产生的排放, tCO_2e ; $PK_{\text{处置},r}$ 表示第 ra 废陶粒处置阶段运输产生的排放, tCO_2e .

1.2 碳减排效益优化分析

通过优化二次灰渣再生陶粒项目的原料结构, 电力结构, 运输结构和再生循环 4 个方面, 评估相应二次灰渣再生陶粒项目碳减排潜力, 具体情景设置见表 1.

表 1 二次灰渣再生陶粒项目碳减排效益优化情景设置

Table 1 Scenario setting for optimizing carbon emission reduction benefits of the secondary ash regeneration ceramicsite project

情景类型	参数选取	取值
绿色原料	污泥比例(%)	60 ^[25]
	二次灰渣比例(%)	40
清洁电网	非化石能源发电量占全部发电量比重(%)	50 ^[26]
	电力碳足迹因子 [$tCO_2e/(MW \cdot h)$]	0.45 ^[27-31]
低碳运输	载重 30t 纯电动重卡碳足迹因子 [$tCO_2e/(t \cdot km)$]	0.03×10^{-3} ^[28-33]
再生循环	废陶粒回收率(%)	50 ^[34]

1.3 不确定性分析

研究采用 IPCC 的误差传播方程^[35]对二次灰渣再生陶粒项目碳足迹结果进行不确定性分析, 具体计算方法如下式.

$$U_{N_j} = \sqrt{(U_{T_j})^2 + (U_{R_j})^2} \quad (26)$$

$$U_{\text{total}} = \frac{\sqrt{(U_{N_1} \cdot N_1)^2 + (U_{N_2} \cdot N_2)^2 + \dots + (U_{N_i} \cdot N_i)^2}}{N_1 + N_2 + \dots + N_i} \quad (27)$$

式中: U_{N_j} 表示第 i 个阶段第 j 种碳源结果的不确定性, %; U_{T_j} 为碳足迹因子的不确定性, %; U_{R_j} 为二次

灰渣再生陶粒项目实景数据的不确定性, %; U_{total} 为总的的不确定性, %; U_{N_i} 为第 i 个阶段的不确定性, %; N_i 为第 i 个阶段不同碳源 CO_2e 排放量, 万 t.

1.4 数据来源

1.4.1 背景数据 在进行减排量计算时, 会涉及多个数据和参数, 其中一些参数可直接选取缺省值或只需一次性测定即可适用于本方法学, 这些数据主要指涉及一些碳足迹因子, 具体参数取值见表 2.

1.4.2 实景数据 本研究实景数据主要来源于浙江省陶粒生产企业(依托宁波重大科技任务攻关项

目-典型工业炉窑协同处置二次灰渣技术研究与示范),具体取值见表3。

表2 各类碳足迹因子

Table 2 Various carbon footprint factors

参数	单位	取值	文献
$O_{\text{黏土}}$	tCO ₂ e/t	1.42×10^{-3}	CLCD
D_{30t} 柴油货车	tCO ₂ e/(t·km)	0.073×10^{-3}	CLCD
t		1.67	[36]
$h_{\text{电}}$	tCO ₂ e/MW·h	0.60	[28-31]
$h_{\text{热}}$	tCO ₂ e/GJ	0.11	CLCD
$F_{\text{生物质}}$	tCO ₂ e/t	0.12	[37]
$F_{\text{柴油}}$	tCO ₂ e/t	3.72	[37]
P_{CO_2}	tCO ₂ e/t	4.20×10^{-3}	[38]
$S_{\text{黏土}}$	tCO ₂ e/t	0.60	CLCD
$S_{\text{污泥}}$	tCO ₂ e/t	0.12	[24]
$S_{\text{废弃土}}$	tCO ₂ e/t	0.60	CLCD
$S_{\text{二次灰渣}}$	tCO ₂ e/t	0.01	参考《中国水泥生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》粉煤灰

表3 4万t/a二次灰渣再生陶粒项目活动水平数据

Table 3 Activity level data of 40000 tons/year secondary ash residue regenerated ceramsite project

参数	单位	取值	文献
$S_{\text{基准黏土,2023}}$	t	96815.51	实地调研
$A_{\text{基准黏土,2023}}$	km	128.00	[39]
$S_{\text{基准污泥,2023}}$	t	170728.43	实地调研
$A_{\text{基准污泥,2023}}$	km	128.00	[39]
$E_{\text{基准生物质,2023}}$	t	32271.84	实地调研
$H_{\text{基准电,2023}}$	MW·h	13533.35	实地调研
$H_{\text{基准热,2023}}$	GJ	0.00	实地调研
J_{2023}	km	128.00	[39]
P_{2023}	t	104102.7	实地调研
$G_{\text{柴油,2023}}$	t	22.55	[38]
K_{2023}	km	25.00	[40-41]
q_{2023}	t	98897.57	[24]
$G_{\text{灰渣柴油,2023}}$	t	9.12	[38]
$K_{\text{灰渣,2023}}$	km	25.00	[40-41]
$q_{\text{灰渣,2023}}$	t	40000.00	实地调研
$A_{\text{项目污泥,2023}}$	km	128.00	[39]
$S_{\text{项目污泥,2023}}$	t	92763.07	实地调研
$A_{\text{项目废弃土,2023}}$	km	128.00	[39]
$S_{\text{项目废弃土,2023}}$	t	67236.93	实地调研
$A_{\text{项目二次灰渣,2023}}$	km	128.00	[39]
$S_{\text{项目二次灰渣,2023}}$	t	40000.00	实地调研
$E_{\text{项目生物质,2023}}$	t	13483.71	实地调研
$H_{\text{项目电,2023}}$	MW·h	10496.93	实地调研
$H_{\text{项目热,2023}}$	GJ	0.00	实地调研

2 结果与讨论

2.1 二次灰渣再生陶粒项目碳减排量计量

基于二次灰渣再生陶粒项目碳减排计量模型,4万t/a二次灰渣再生陶粒项目各生命周期阶段的碳减排量(项目CO₂e排放量与基准线CO₂e排放量差值)如表4所示。4万t/a二次灰渣再生陶粒项目2023a总的CO₂e减排量为3.26万t,说明使用二次灰渣再生陶粒比目前主流的污泥再生陶粒更低碳,因此,在我国飞灰等二次灰渣产量巨大的基础上^[3],未来使用二次灰渣再生陶粒成为陶粒行业双碳目标实现的一项重要举措。项目CO₂e减排量主要由原料获取阶段、陶粒生产阶段和废弃处置阶段3个阶段贡献,其中,陶粒生产阶段减排贡献达到95%,远超原料获取阶段(4%)和废弃处置阶段(1%)。

表4 4万t/a二次灰渣再生陶粒项目生命周期阶段的碳减排量
Table 4 Carbon emission reduction during the lifecycle stage of the 40000tons/year secondary ash regenerated ceramsite project

生命周期阶段	CO ₂ e 排放量(t)
原料获取阶段	1191.47
陶粒生产阶段	31243.65
陶粒成品运输阶段	0
废弃处置阶段	155.84
合计	32590.96

对陶粒生产阶段的碳减排情况进行细化分析,发现陶粒生产阶段的碳减排量主要源于工艺过程(86.95%),其次是能源燃烧贡献了7.22%的减排率,最后是外购电力(5.83%)。

2.2 二次灰渣再生陶粒项目碳足迹分析

由表5可知,4万t/a二次灰渣生产高强陶粒项目年CO₂e排放总量约6.49万t,原料获取阶段,加工生产阶段,运输阶段以及处置阶段CO₂e排放总量分别为0.31,5.98,0.16和0.04万t。项目CO₂e排放的主要来源为加工生产阶段,占陶粒项目碳足迹的92.10%,若从摇篮到大门分析,加工生产阶段碳排放占比高达95%,周越等^[22]也表示污泥陶粒90%以上的碳排放(摇篮到大门)来源于生产阶段;其次是原料获取阶段,其排放量占CO₂e排放总量的5%;成品运输和废弃处置阶段的CO₂e排放较低,分别仅占CO₂排放总量的2.50%和0.59%,因此陶粒行业减排应重点考虑加工生产阶段。从碳足迹视角分析,项目所产陶粒产品的CO₂e排放强度为0.62t/t,高于目前大多文献^[22]研究提出碳排放强度(0.5t/t左右),因为

本研究是基于碳足迹视角,研究范围更大。

表 5 4 万 t/a 二次灰渣再生陶粒项目碳足迹

Table 5 Carbon footprint of 40000tons/year secondary ash residue regenerated ceramsite project

生命周期阶段	CO ₂ e 排放量(t)	CO ₂ e 排放强度(t/t)
原料获取阶段	3120.90	0.03
陶粒生产阶段	59789.93	0.57
陶粒成品运输阶段	1624.47	0.02
废弃处置阶段	385.30	0.004
合计	64920.59	0.62

利用 IPCC 的误差传播方程^[35]对其进行了不确定性评估表明,研究选定背景数据和实景数据的不确定性分别为 10%和 5%^[27,37],二次灰渣再生陶粒项目碳足迹的不确定性为 7.31%,在合理范围内^[35]。

2.3 二次灰渣再生陶粒项目碳排放关键因素解析

如图 2 所示,项目范围一,范围二和范围三的 CO₂e 排放量分别占总排放量的 82.40%,9.70%和 7.90%。范围一包括陶粒生产过程中能源燃烧和生产工艺过程的 CO₂e 排放,其中生产工艺过程贡献了 79.90%的 CO₂e 排放量,能源燃烧仅贡献 2.49%的 CO₂e 排放量,即生产工艺过程减排是陶粒行业碳减排的重点之一^[16,42]。范围二主要为外购电力热力的碳排放,本项目全部为外购电力的 CO₂e 排放,占项目

碳足迹的 9.70%,目前我国大力支持风电,光伏等清洁能源发电^[43-44],未来电力清洁化是陶粒行业减碳的另一个重要方面^[3]。范围三涵盖原料开采,原料运输,成品陶粒外部运输以及废陶粒处置时能源燃烧和运输的碳排放,本项目原料均为固废,所以不存在原料开采碳排放,运输过程贡献了项目碳足迹的 7.77%,处置阶段的能源燃烧仅贡献 0.13%的 CO₂e 排放。因此,运输同样是陶粒行业减碳的关键环节。

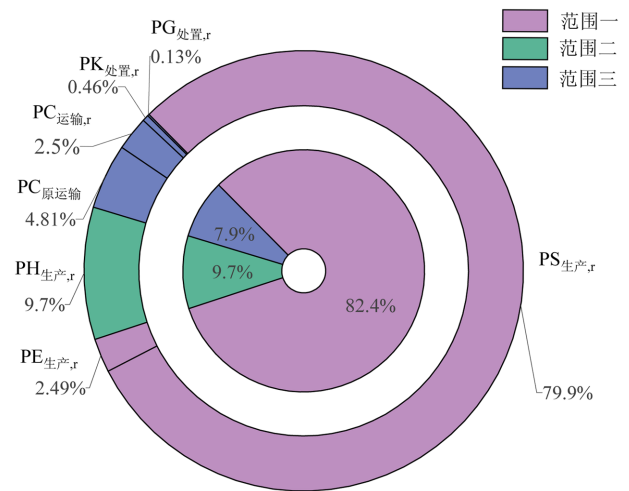


图 2 4 万 t/a 二次灰渣再生陶粒项目各类 CO₂e 排放的贡献率
Fig.2 Contribution rates of various CO₂e emissions from the 40000ton/year secondary ash regeneration ceramsite project

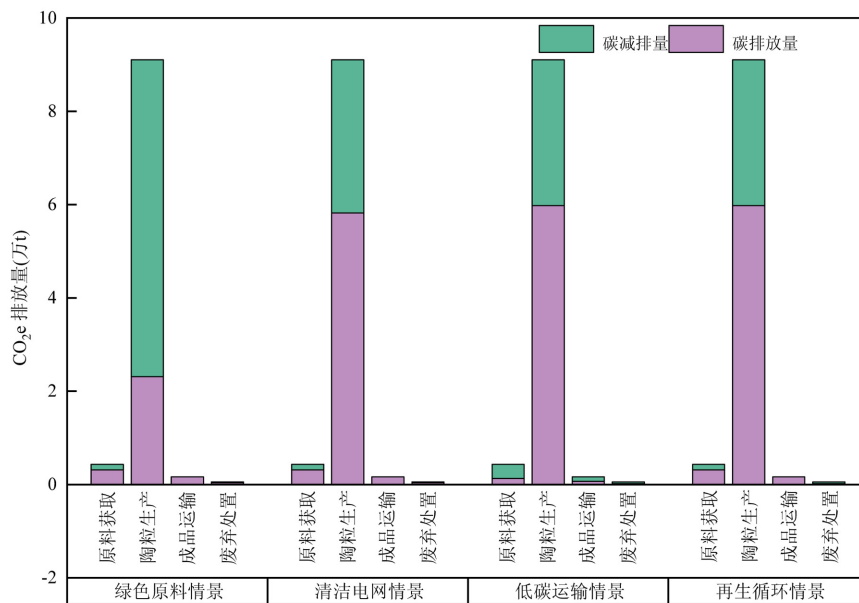


图 3 不同情景下二次灰渣再生陶粒项目生命周期 CO₂e 减排情况

Fig.3 CO₂e emission reduction during the lifecycle of secondary ash regenerated ceramsite project under different scenarios

值得注意的是陶粒生产工艺过程贡献了整个

项目碳足迹的 79.90%,这主要是源于有机质原料燃

烧释放 CO₂e 所致^[42],进一步分析 3 种原料碳排放占比,发现用废弃土生产陶粒产生的 CO₂e 约占整个生产工艺过程 CO₂e 排放的 78%,污泥和二次灰渣的 CO₂e 排放分别占 21%和 1%,但是,陶粒生产时废弃土,污泥和二次灰渣投入占比分别为 33.62%,46.38%和 20.00%,因此,通过优化原料结构,减少废弃土,提高二次灰渣和污泥的使用量可大大降低陶粒生产工艺过程的 CO₂e.

2.4 二次灰渣再生陶粒项目碳减排效益优化

原料结构,电力结构,运输结构以及废弃处置是影响二次灰渣再生陶粒项目碳足迹的因素,所以研究设置绿色原料,清洁电网,低碳运输和再生循环 4 种低碳情景来对项目的碳减排效益进行优化,各情景下 CO₂e 减排情况如图 3 所示.

优化后二次灰渣再生陶粒项目不同低碳情景下总的 CO₂e 减排量分别为 6.93(绿色原料情景),3.56(低碳运输情景),3.42(清洁电网情景),和 3.28 万 t(再生循环情景).其中,绿色原料优化情景下碳减排潜力最高,是优化前减排量 2.13 倍,陶粒生产阶段贡献了约 98.05%的减排潜力,其次是原料获取阶段(1.72%)和废弃处置阶段(0.23%),侧面表示原料生产工艺过程碳排放占项目总排放比重较高^[22].提高固废原料使用量能有效实现项目碳减排潜力的增加^[21],在绿色原料情景下,假设 1000 万 t 的二次灰渣全部用于陶粒生产,将产生 0.09 亿 t 的碳减排量.低碳运输和清洁电网情景下项目总的碳减排潜力相似,在 5%~9%之间,但是各生命周期阶段的减排贡献特征略有不同,低碳运输情景下碳减排贡献度由大到小依次为陶粒生产阶段(87.85%)>原料获取阶段(8.52%)>成品运输阶段(2.69%)>废弃处置阶段(0.94%);而清洁电网情景依次为陶粒生产阶段(96.05%)>原料获取阶段(3.49%)>废弃处置阶段(0.46%)>成品运输阶段(0).再生循环情景的碳减排潜力最低约 0.6%.

3 结论

3.1 二次灰渣再生陶粒比目前主流的污泥再生陶粒更低碳.基于二次灰渣再生陶粒项目碳减排计量模型,4 万 t/a 二次灰渣再生陶粒项目 2023a 总的 CO₂e 减排量为 3.26 万 t,项目 CO₂e 减排量主要由原料获取阶段,陶粒生产阶段和废弃处置阶段 3 个阶

段贡献,其中,陶粒生产阶段减排贡献达到 95%,远超原料获取阶段(4%)和废弃处置阶段(1%).

3.2 从碳足迹视角分析,加工生产和废弃处置阶段是陶粒项目碳排放的关键环节.4 万 t/a 二次灰渣生产高强陶粒项目年 CO₂e 排放总量约 6.49 万 t,所产陶粒产品的 CO₂e 排放强度为 0.62t/t.陶粒加工生产阶段 CO₂e 排放量占项目碳足迹的 90%以上,是陶粒行业进行碳减排的关键.从 CO₂e 排放源类别分析,项目主要包含能源燃烧(3%),生产工艺(80%),外购电力(10%)以及运输(7%)4 类 CO₂e 排放,二次灰渣,污泥等固废原料替代是陶粒行业降碳的重点.

3.3 提高固废原料(二次灰渣和污泥)占比,使用电动重卡替代柴油重卡,优化电力结构等举措均比提高废陶粒回收比例对二次灰渣再生陶粒项目产生更优的碳减排效益.绿色原料,清洁电网,低碳运输和再生循环 4 种低碳情景下,二次灰渣再生陶粒项目分别实现 6.93,3.42,3.56 和 3.28 万 t CO₂e 减排量.此外,绿色原料添加的优先级顺序依次为二次灰渣,污泥和废弃土.

参考文献:

- [1] Wang S, Wu J, Xiang M Y, et al. Multi-objective optimisation model of a low-cost path to peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2024,912, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169386.
- [2] 李惠娟,李寿德,杨寰宇,等.同心聚力共谋行业绿色发展(一)——2021 年陶粒产业调研报告 [J]. *砖瓦*, 2021,(10):44-48.
Li H X, Li S D, Yang H Y, et al. Unity and collaboration for green development in the industry (I)—2021 ceramics industry research report [J]. *Brick-Tile*, 2021,(10):44-48.
- [3] Zhao H L, Liu F, Liu H Q, et al. Comparative life cycle assessment of two ceramsite production technologies for reusing municipal solid waste incinerator fly ash in China [J]. *Waste Manage*, 2020,113: 447-455.
- [4] 张勇,宗晨宇,王钰婷,等.二氧化硅对二次铝灰烧结制备镁铝尖晶石材料性能的影响 [J]. *中国有色冶金*, 2023,52(3):57-65.
Zhang Y, Zong C Y, Wang Y T, et al. Effect of silicon dioxide on properties of magnesium-aluminum-spinel sintered from secondary alumina dross [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2023,52(3):57-65.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.2023 年城市建设统计年鉴 [EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>,2024-10-25.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. 2023 urban construction statistical yearbook [EB/OL]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>, 2024-10-25.
- [6] Xue Y J, Lin X C, Zhang H H, et al. Onsite treatment of wastes in

- municipal waste incinerator: co-sintering of fly ash and leachate sludge into value-added ceramic granule [J]. *Heliyon*, 2023,9(10),doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20301.
- [7] United Nations Climate Change. CDM Methodologies Booklet [EB/OL]. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/index.html>, 2022-12.
- [8] Long Y Y, Pu K, Yang Y Q, et al. Preparation of High-strength ceramsite from municipal solid waste incineration fly ash and clay based on CaO-SiO₂-Al₂O₃ system [J]. *Construction and Building Materials*, 2023,368,doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130492.
- [9] Pei J N, Pan X L, Qi Y F, et al. Preparation of ultra-lightweight ceramsite from red mud and immobilization of hazardous elements [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022,10(4),doi.org/10.1016/j.jece.2022.108157.
- [10] Wan Y J, Wu X Y, Zhang H H, et al. Exploring mechanical properties and long-term environmental impact of ceramsites derived from diverse solid wastes [J]. *Waste Management*, 2024,190:538-547.
- [11] Małgorzata F, Rafał P, Jarosław M, et al. The properties of fly ash derived lightweight aggregates obtained using microwave radiation [J]. *Construction and Building Materials*, 2019,227,doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116677.
- [12] Wang C Q, Duan D Y, Huang D M, et al. Lightweight ceramsite made of recycled waste coal gangue & municipal sludge: particular heavy metals, physical performance and human health [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,376,doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134309.
- [13] Tong L Q, Ji K Q, Yang J X, et al. Sludge-based ceramsite for environmental remediation and architecture ingredients [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024,448,doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141556.
- [14] Nguyen S, Thai Q, Ho L. Properties of fine-grained concrete containing fly ash and bottom ash [J]. *Magazine of Civil Engineering*, 2022,7(107):10711-10720.
- [15] Mao H B, Zhang Y Y, Wang H, et al. Recycling sewage sludge into ceramic materials: a review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023,21:1659-1672.
- [16] Gao W B, Zhang H G, Ren Q, et al. A low-carbon approach to recycling engineering muck to produce non-sintering lightweight aggregates: Physical properties, microstructure, reaction mechanism, and life cycle assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,385, doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135650.
- [17] 高 唱. 基于 LCA 的再生混凝土环境影响评价研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- Gao C. Environmental impact assessment of recycled concrete based on LCA [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [18] Xing W, Tam V W Y, Le K N, et al. Effects of mix design and functional unit on life cycle assessment of recycled aggregate concrete: evidence from CO₂ concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022,348,doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128712.
- [19] Younes A, Elbeltagi E, Diab A, et al. Incorporating coarse and fine recycled aggregates into concrete mixes: mechanical characterization and environmental impact [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2024,26:654-668.
- [20] Colangelo F, Navarro T G, Farina I, et al. Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020,25:1790-1804.
- [21] Sabão M, Bompa D V, Silva L F O. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: environmental influence of cement content [J]. *Geoscience Frontiers*, 2021,12(6), doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101235.
- [22] 周 越, 葛 坚, 陆 江. 生物污泥陶粒加气混凝土砌块生命周期 CO₂ 排放量解析 [J]. *新型建筑材料*, 2017,44(4):34-38,51.
- Zhou Y, Ge J, Lu J. Analysis on carbon emission for biological sewage sludge ceramsite aerated concrete block based on life cycle assessment [J]. *New Building Materials*, 2017,44(4):34-38,51.
- [23] 李惠娟, 李寿德, 杨寰宇, 等. 同心聚力共谋行业绿色发展 (二) ——2021 年陶粒产业调研报告 [J]. *砖瓦*, 2021,(12):51-56.
- Li H X, Li S D, Yang H Y, et al. Unity and collaboration for green development in the industry (II) —2021ceramsite industry research report [J]. *Brick-Tile*, 2021,(12):51-56.
- [24] 周 越. 浙江省建筑外墙保温体系物化过程 CO₂ 排放研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Zhou Y. Research of CO₂ emission of building external wall insulation system in materialization procession Zhejiang province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [25] 冯玉林, 高 鹤, 柴喜林, 等. 城市污泥尾矿陶粒的制备工艺及其性能与应用 [J]. *硅酸盐通报*, 2023,42(4):1374-1383.
- Feng Y L, Gao G, Chai X L, et al. Preparation process of municipal sludge tailing ceramsite and Its performance and application [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023,42(4):1374-1383.
- [26] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《能源生产和消费革命战略 (2016-2030)》的通知 [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/zcssfz/zcgh/201704/t20170425_1145761.html, 2016-12-29.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on issuing the "energy production and consumption revolution strategy (2016-2030)" [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/zcssfz/zcgh/201704/t20170425_1145761.html, 2016-12-29.
- [27] 宋晓聪, 杜 帅, 邓陈宁, 等. 钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估 [J]. *环境科学*, 2023,44(12):6630-6642.
- Song X C, Du S, Deng C N, et al. Life cycle carbon emission accounting and emission reduction potential assessment of steel industry [J]. *Environmental Science*, 2023,44(12):6630-6642.
- [28] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html, 2024-02-29.
- National Bureau of Statistics, Statistical bulletin on national economic and social development of the people's republic of China for 2023 [EB/OL]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html, 2024-02-29.
- [29] 王彦哲, 周 胜, 姚子麟, 等. 中国煤电生命周期二氧化碳和大气污染物排放相互影响建模分析 [J]. *中国电力*, 2021,54(8):128-135.
- Wang Y Z, Zhou S, Yao Z L, et al. Life cycle modeling analysis of the interaction between carbon dioxide and air pollutant emissions of coal power in China [J]. *Electric Power*, 2021,54(8):128-135.
- [30] 钟 权, 夏 欣. 基于生命周期的猴子岩水电站温室气体排放分析

- [J]. 水电站设计, 2021,37(1):81-84.
- Zhong Q, Xia X. Analysis of greenhouse gas emissions from monkey rock hydropower station based on life cycle [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2021,37(1):81-84.
- [31] Wang L, Wang Y, Du H, et al. A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study [J]. Applied Energy, 2019,249(SEP.1):37-45.
- [32] 宋晓聪,杜 帅,邓陈宁,等.污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹对比研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):583-592.
- Song X C, Du S, Deng C N, et al. Comparative study on carbon footprint of sludge ceramsite and fly ash ceramsite [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):583-592.
- [33] 中国铁路总公司.2018~2020 年货运增量行动方案 [EB/OL]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/ywsl/201812/t20181214_77740.html, 2018-07-02.
- China Railway Corporation, 2018-2020 freight incremental action plan [EB/OL]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/ywsl/201812/t20181214_77740.html, 2018-07-02.
- [34] 国家发展和改革委员会宏观经济研究院.中国低值可回收物回收利用现状研究报告 [R]. 国家智库报告, 2023.
- Macro Economic Research Institute of National Development and Reform Commission. Research report on the current status of low value recyclable materials recycling and utilization in China [R]. National Think Tank Report, 2023.
- [35] IPCC. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories [EB/OL]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/chinese/gpgaum_cn.html, 2001-06-15.
- [36] 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.
- Mao R C. Assessing the environmental impacts of urban transport infrastructure via life cycle assessment: case study of a mega city Shenzhen, China [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [37] 宋晓聪,杜 帅,谢明辉,等.废旧三元锂离子电池回收利用碳足迹 [J]. 环境科学, 2024,45(6):3459-3467.
- Song X C, Du S, Xie M H, et al. Carbon footprint of spent ternary lithium-ion battery waste recycling [J]. Environmental Science, 2024, 45(6):3459-3467.
- [38] 王 波.基于生命周期评价的深圳市建筑垃圾处理模式研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- Wang B. Research of Shenzhen construction wastes management base on life cycle assessment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [39] 浙江省统计局,国家统计局浙江省调查队.浙江统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023.
- Zhejiang Provincial Bureau of Statistics, Zhejiang Provincial Survey Team of National Bureau of Statistics. Zhejiang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [40] 仲 平.建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究 [D]. 成都:四川大学, 2005.
- Zhong P. Study of building life-cycle energy use and relevant environmental impacts [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [41] 朱 熾,陈 莹.住宅建筑生命周期能耗及环境排放案例 [J]. 清华大学学报, 2010,50(3):330-334.
- Zhu Y, Chen Y. Cases for life-cycle energy consumption and environmental emissions in residential buildings [J]. Journal of Tsinghua University Science and Technology, 2010,50(3):330-334.
- [42] Yi H H, Zhong T T, Liu J, et al. Emissions of air pollutants from sintering flue gas in the Beijing-Tianjin-Hebei area and proposed reduction measures [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,304, doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126958.
- [43] Zhu Z, Xu Z W, Zhang B, et al. Shifting gears in thermal power: displacement efficiency and environmental impact of wind and solar generation in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025,212,doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107916.
- [44] Liu B C, Huo X K. Prediction of photovoltaic power generation and analyzing of carbon emission reduction capacity in China [J]. Renewable Energy, 2024,222,doi.org/10.1016/j.renene.2024.119967.

作者简介: 宋晓聪(1992-),女,河北石家庄人,工程师,硕士,主要研究方向为环境足迹管理.发表论文 20 余篇.2634145277@qq.com.