

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.

污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹对比研究

宋晓聪¹,杜 帅^{2*},邓陈宁¹,沈 鹏¹,朱 芳¹,谢明辉^{1*} (1.中国环境科学研究院,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: 污泥陶粒与粉煤灰陶粒是最为常见的两种固废陶粒,为对比分析两种固废陶粒产品碳足迹特征及量化评估产品碳减排效益,从碳足迹角度构建污泥陶粒与粉煤灰陶粒产品碳足迹核算模型,基于敏感性分析识别关键减排因素,通过情景分析预测评估污泥陶粒与粉煤灰陶粒的碳减排潜力,同时,使用误差传播方程进行不确定性分析保证碳足迹结果的可靠有效.结果表明,生产 1kg 污泥陶粒和 1kg 粉煤灰陶粒 CO₂e 排放量分别为 1.00 和 0.58kg,污泥陶粒和粉煤灰陶粒碳足迹特征相似,陶粒生产阶段是两种陶粒产品碳排放的主要环节,分别占各自碳足迹(除原料获取阶段)的 93.71%和 89.12%.原料结构是影响污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹最敏感的因素,其次就是运输结构,相比于污泥陶粒,粉煤灰陶粒碳足迹受原料结构调整影响更大.协同优化情景中,同时优化运输和原料结构的碳减排潜力(31%~78%)远高于同时优化运输和电力结构(2%~5%),此外,3 种因素同时作用的减排潜力最高,达到 33%~79%.

关键词: 污泥陶粒; 粉煤灰陶粒; 碳足迹; 减排潜力; 敏感性分析

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)01-0583-10

Comparative study on carbon footprint of sludge ceramsite and fly ash ceramsite. SONG Xiao-cong¹, DU Shuai^{2*}, DENG Chen-ning¹, SHEN Peng¹, ZHU Fang¹, XIE Ming-hui^{1*} (1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences Environmental Technology & Engineering Co., Ltd., Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 583~592

Abstract: Sludge ceramsite and fly ash ceramsite are the two most common types of solid waste ceramsite. To compare and analyze the carbon footprint characteristics of the two types of solid waste ceramsite and quantitatively evaluate the carbon reduction benefits of the products, a carbon footprint accounting model for sludge ceramsite and fly ash ceramsite is constructed from the perspective of carbon footprint. Based on sensitivity analysis, key emission reduction factors are identified, and the carbon reduction potential of sludge ceramsite and fly ash ceramsite is predicted and evaluated through scenario analysis. Meanwhile, using error propagation equations for uncertainty analysis ensures the reliability and effectiveness of carbon footprint results. The results showed that the CO₂ emissions from the production of 1kg sludge ceramsite and 1kg fly ash ceramsite were 1.00 and 0.58 kg, respectively. The carbon footprint characteristics of sludge ceramsite and fly ash ceramsite were similar, and the ceramsite production stage was the main link in the carbon emissions of the two ceramsite particle products, accounting for 93.71% and 89.12% of their respective carbon footprints (excluding the raw material acquisition stage), respectively. The raw material structure is the most sensitive factor affecting the carbon footprint of sludge ceramsite and fly ash ceramsite, followed by the transportation structure. Compared with sludge ceramsite, the carbon footprint of fly ash ceramsite is more affected by the adjustment of raw material structure. In the scenario of collaborative optimization, the carbon emission reduction potential of simultaneously optimizing transportation and raw material structure (31%~78%) is far higher than that of simultaneously optimizing transportation and power structure (2%~5%). In addition, the emission reduction potential of the three factors acting simultaneously is the highest, reaching 33%~79%.

Key words: sludge ceramsite; fly ash ceramsite; carbon footprint; emission reduction potential; sensitivity analysis

我国是陶粒生产大国,陶粒的生产代表着高能耗和高碳排放^[1-2],"双碳"战略对陶粒行业提出了绿色低碳转型的要求^[3-6].此外,我国固体废物产量与日俱增,年产量超 100 亿 t^[7],其大量堆积不仅污染环境,同时也是一种资源浪费.固废陶粒的生产不仅消纳了固废^[8-9],也是陶粒行业实现"双碳"目标的主要

途径.因此,固废陶粒产品碳足迹研究对陶粒行业实现低碳转型具有重要意义.污泥和粉煤灰因与黏土、页岩等原料成分类似而用于固废陶粒生产^[8-14],国

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 宁波市重大科技攻关项目(2021ZDYF020047)

* 责任作者, 研究员, xiemh@craes.org.cn; 中级, imdushuai@163.com

内黏土类固废陶粒(污泥、废弃土等)市场占比近 85%,再就是粉煤灰陶粒^[5-6].国外关于固废陶粒的研究多关注其产品性能及环境影响评价方面.在产品性能方面,陶粒生产过程中单独添加污泥^[15]或粉煤灰^[16]会导致产品性能退化等问题,Tong 等^[9]和 Mao 等^[17]通过改变工艺参数、污泥添加量等条件来改善污泥陶粒的性能;Nguyen 等^[16]和 Małaszkiwicz^[18]等发现粉煤灰陶粒制成的混凝土随粉煤灰含量的增加抗压强度降低.而环境影响评价上主要是关于陶粒砌砖、陶粒混凝土等陶粒制品的研究^[19-20],例如,De Souza 等^[19]和 Leticia 等^[20]分别对比了加拿大和巴西陶粒砌砖与混凝土砖的环境影响,关于陶粒制品的碳排放情况得出相反的结论,说明陶粒制品碳排放存在地域差异,不同的国家地区需要针对性的研究.

国内有关固废陶粒的研究也大多集中在产品制备技术及性能方面,例如赵飞燕等^[21]综述了粉煤灰陶粒制备技术的国内外研究进展,粉煤灰陶粒制备技术主要有焙烧法和免烧法^[22-24],污泥陶粒制备方法亦是如此^[25-28],与培烧法相比,免烧法相对绿色环保,能耗更低,但是该技术还未成熟^[21],国内多采用培烧法制备陶粒.固废陶粒因其优异特性作为建筑材料^[29-30]和吸附材料^[31-32]应用在建筑、环保等领域.在环保方面,污泥陶粒可用来处理含磷废水^[33],粉煤灰陶粒对含铅、铜低浓度重金属废水有较好的净化效果^[34],同时污泥陶粒具有类似的净化作用^[35].在建筑方面,固废陶粒制备的混凝土可以在盐冻环境下应用^[36],此外还可以降低建筑的能耗^[37].在碳排放方

面的研究大多是关于陶粒制品^[38]的鲜少是单独陶粒的并且时间久远,房明慧^[39]对粉煤灰陶粒砌砖和加气混凝土砌砖进行生命周期影响评价,其中温室效应是主要的环境影响类别,粉煤灰陶粒砌砖和加气混凝土砌砖 CO₂ 排放分别为 156 和 290kg/m³,此项研究虽然单独计算了粉煤灰陶粒的碳排放量,但是只是生产阶段的碳排放,并未涵盖粉煤灰陶粒的全生命周期阶段,不等同于碳足迹.

综上,目前针对固废陶粒产品碳足迹的研究存在空白,大多是通过陶粒制品生命周期评价中的温室效应侧面分析陶粒的碳排放.此外针对陶粒制品碳排放的研究时间久远,并且大多只包含陶粒生产阶段的碳排放,缺少整个生命周期阶段的碳排放.因此,亟需从碳足迹角度开展固废陶粒产品碳排放量化和减排潜力评估工作.本研究以污泥陶粒和粉煤灰陶粒为例,从碳足迹角度构建污泥陶粒与粉煤灰陶粒产品碳足迹核算模型,基于敏感性分析判识影响固废陶粒产品的关键减排因素,通过情景分析预测评估污泥陶粒与粉煤灰陶粒的碳减排潜力,以期陶粒行业低碳转型提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 系统边界和功能单位

从碳足迹视角定义污泥陶粒和粉煤灰陶粒产品的全生命周期系统边界(图 1),包括原料获取、原料运输、加工生产、成品运输、应用、废弃处置等阶段.以生产 1kg 陶粒为功能单位.

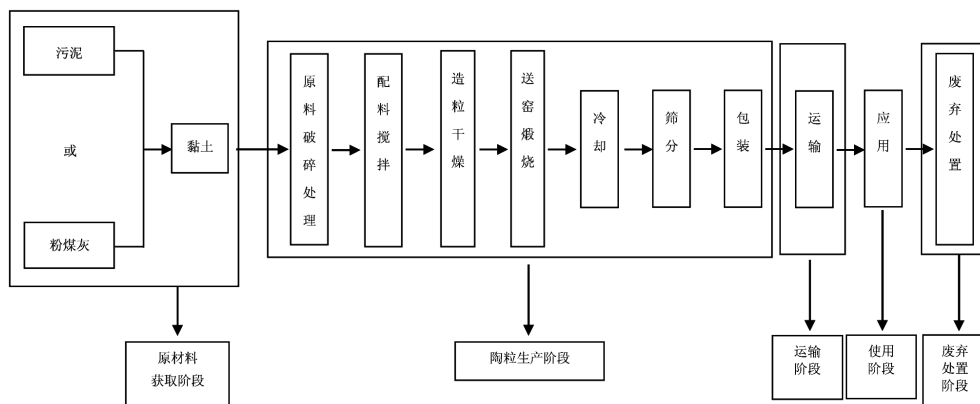


图 1 系统边界

Fig.1 System boundary

1.2 全生命周期碳排放核算模型

根据污泥陶粒和粉煤灰陶粒产品生命周期碳

排放核算边界的界定,陶粒生命周期的总碳排放量为原料获取、生产、运输、废物处置阶段的碳排放量之和,具体公式如下:

$$C_{\text{总}} = C_{\text{原料}} + C_{\text{生产}} + C_{\text{运输}} + C_{\text{处置}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{总}}$ 为生产 1kg 陶粒生命周期碳排放,kg(以 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 计); $C_{\text{原料}}$ 为生产 1kg 陶粒原料获取阶段碳排放,kg; $C_{\text{生产}}$ 为 1kg 陶粒生产阶段碳排放,kg; $C_{\text{运输}}$ 为 1kg 陶粒由生产地运输到应用地的碳排放,kg; $C_{\text{处置}}$ 为废陶粒废弃处置阶段的碳排放,kg.

1.2.1 原料获取阶段 陶粒生产的原材料获取阶段可进一步划分成原料开采、原料运输和固废原料处置.计算公式如下:

$$C_{\text{原料}} = C_{\text{开采}} + C_{\text{运输1}} - C_{\text{处置1}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{开采}}$ 为原料开采阶段的碳排放,kg; $C_{\text{运输1}}$ 为原料运输至陶粒厂的碳排放,kg; $C_{\text{处置1}}$ 为固废原料填埋阶段的碳排放,kg.

$C_{\text{开采}}$ 主要指黏土等原料的开采产生的碳排放,计算公式如下:

$$C_{\text{开采}} = \sum_{i=1}^n B_i \times b_i \quad (3)$$

式中: n 为原材料使用种类; B_i 为原材料的碳足迹因子,kg/kg; b_i 为原料消耗量与陶粒产量的比值系数.

$C_{\text{运输1}}$ 计算公式如下:

$$C_{\text{运输1}} = \left(\sum_{i=1}^n D_i \times b \times E + F_i \times g \times E \right) \times t \quad (4)$$

式中: n 为原材料运输种类; D_i 为原料运输距离,km; E 为所选运输工具的碳足迹因子,kg/(kg·km); F_i 为固废原料运输距离,km; g 为固废原料消耗量与陶粒产量的比值系数; t 为空车修正系数,根据文献[40]可知空载时的环境负荷是满载时的 0.67 倍,故取 $t=1.67$.

由于固废作为原料再利用,没有填埋,所以需除去其填埋过程造成的碳排放,填埋过程的碳排放源于推土机、挖掘机、装载机、压实机等设备运行的能量消耗和填埋气.计算公式如下:

$$C_{\text{处置1}} = \left(\sum_{i=1}^{\alpha} G_i \times K_i + M \times E \times 1.67 + P_{\text{CO}_2} + \text{GWP}_{\text{CH}_4} \times P_{\text{CH}_4} \right) \times g \quad (5)$$

式中: α 为能源类别; G_i 为填埋 1kg 固废的能源用量,kg; K_i 为能源的碳足迹因子,kg/kg 或 kg/(m^3); M 为 1kg 固废由产生厂至填埋场的运输距离,km; E 为所选运输工具的碳足迹因子,kg/(kg·km); P_{CO_2} 填埋 1kg 固废的 CO_2 产生量,kg; GWP_{CH_4} 甲烷全球变暖潜势,kg/(kg CH_4),27.9; P_{CH_4} 填埋 1kg 固废的甲烷产生

量,kg.

1.2.2 陶粒生产阶段 陶粒生产阶段碳排放主要包括原料中所含的有机质在烘干和煅烧时排放的 CO_2 以及能源燃烧和外购电力热力的碳排放.计算公式如下:

$$C_{\text{生产}} = \left(\sum_{j=1}^{\gamma} L_j \times l_j + \sum_{i=1}^{\alpha} Q_i \times K_i + H_{\text{电}} \times h_{\text{电}} + H_{\text{热}} \times h_{\text{热}} \right) \quad (6)$$

式中: γ 为陶粒中含有机质原料的种类; L_j 为生产 1kg 陶粒的有机质原料用量,kg; l_j 为有机质原料的碳排放因子,kg/kg; Q_i 为生产 1kg 陶粒的能源用量,kg; $H_{\text{电}}$ 为生产 1kg 陶粒消耗的外购电力量,kW·h; $h_{\text{电}}$ 为电力碳足迹因子,kg CO_2 /(kW·h). $H_{\text{热}}$ 为生产 1kg 陶粒消耗的外购热力量,MJ; $h_{\text{热}}$ 为热力碳排放因子,kg/MJ.

1.2.3 陶粒运输阶段 陶粒运输阶段的碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{运输}} = \sum_{i=1}^{\beta} J_i \times E_i \times 1.67 \quad (7)$$

式中: β 运输方式类别; J_i 为 1kg 陶粒由陶粒厂至使用现场的运输距离,km; E_i 为所选运输工具的碳足迹因子,kg/(kg·km).

1.2.4 陶粒废弃处置阶段 陶粒废弃处置阶段碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{处置}} = \left(\sum_{i=1}^{\alpha} G_i \times K_i + N \times E \times 1.67 + P_{\text{CO}_2} + \text{GWP}_{\text{CH}_4} \times P_{\text{CH}_4} \right) \quad (8)$$

式中: N 为 1kg 废陶粒由使用地至填埋场的运输距离,km;其他同上.

1.3 不确定性分析

污泥陶粒和粉煤灰陶粒碳足迹核算依托大量的实景数据和背景数据,因为地域和时间的影 响使得碳足迹的核算结果存在一定的误差,为确认碳足迹核算结果真实准确,借助 IPCC 的误差传播方程^[41]对污泥陶粒和粉煤灰陶粒碳足迹核算结果不确定性进行分析.

$$O_{S_{ij}} = \sqrt{(O_{T_{ij}})^2 + (O_{R_{ij}})^2} \quad (9)$$

$$O_{\text{total}} = \frac{\sqrt{(O_{S_1} \times S_1)^2 + (O_{S_2} \times S_2)^2 + \dots + (O_{S_i} \times S_i)^2}}{S_1 + S_2 + \dots + S_i} \quad (10)$$

式中: $O_{S_{ij}}$ 为第 i 个阶段中第 j 种碳源估算的不确定性,%; $O_{T_{ij}}$ 为碳足迹因子的不确定性,%; $O_{R_{ij}}$ 为污泥陶粒和粉煤灰陶粒活动水平数据的不确定性,%; O_{total} 为总的碳足迹核算结果的不确定性,%; O_{S_i} 为第 i 个阶段的不确定性,%.

性,%; S_i 为第*i*个阶段不同碳源的碳排放量,kg.

1.4 敏感性分析

通过敏感性系数定量分析影响污泥陶粒和粉煤灰陶粒碳足迹的主要因素^[42-43],敏感性系数越大,表示碳足迹结果受该项因素影响越大^[43],以此为固废再生陶粒产品降碳提供技术支持.

$$T = \frac{\Delta c / c}{\Delta x / x} \quad (11)$$

式中:*T*为敏感性系数; $\Delta C/C$ 为污泥陶粒和粉煤灰陶粒碳排放变化率; $\Delta x/x$ 为影响因素变化率.

1.5 数据来源

1.5.1 背景数据 背景数据主要指各类碳足迹因子,包括能源碳足迹因子^[44-47]、原材料开采碳足迹因子(中国生命周期基础数据库(CLCD))、陶粒生产过程的碳足迹因子^[39,48]、交通运输碳足迹因子^[49-51]以及填埋的足迹因子^[52],具体取值见表 1.

表 1 碳足迹因子库

Table 1 Carbon footprint factor pool

能源碳足迹因子	
能源名称	碳足迹因子(kg/kg)
柴油	3.72
生物质燃料	0.12
天然气	2.21
电力	0.91
原材料开采碳足迹因子	
原料类别	碳足迹因子(kg/kg)
黏土	1.42×10^{-3}
陶粒生产过程碳足迹因子	
有机质原料	碳足迹因子(kg/kg)
黏土	0.60
废弃土	0.60
粉煤灰	0.01
污泥	0.12
交通运输碳足迹因子	
交通工具类别	碳足迹因子(kg/(t·km))
重型柴油货车运输(载重 30t)	0.078
纯电动重卡(载重 30t)	0.046
填埋的碳足迹因子	
填埋气类别	碳足迹因子(kg/kg)
CH ₄	1.84×10^{-3}
CO ₂	4.20×10^{-3}

注:电力的碳足迹因子单位为kg/(kW·h),天然气的碳足迹因子为kg/m³.

1.5.2 实景数据 文章的实景数据主要通过现场调研污泥陶粒和粉煤灰陶粒代表性企业(生产规模、生产工艺)获得,其中污泥陶粒数据来源于江苏省淮安市陶粒生产厂家,粉煤灰陶粒数据来源于山东省

滨州市陶粒生产厂家,数据可代表江苏省和山东省 2022 年采用回转窑工艺生产的污泥陶粒和粉煤灰陶粒.污泥陶粒和粉煤灰陶粒生产生命周期清单具体见表 2 和表 3.

表 2 1kg 污泥陶粒生产的生产生命周期清单

Table 2 Life cycle inventory for the production of 1kg fly ash

ceramsite				
原料获取阶段				
原料类别	运输方式	运输距离 (km)	运输量 (kg)	
原料从开采地	污泥	公路-30t 柴油货车	90 ^[53]	0.72
到陶粒厂	废弃土	公路-30t 柴油货车	90 ^[53]	1.53
污泥、废弃土从产生厂到		公路-30t 柴油货车	30	2.25
填埋场				
陶粒生产阶段				
	污泥(kg)			0.72
	废弃土(kg)			1.53
	电力消耗(kW·h)			3.03×10^{-3}
	生物质燃料消耗(kg)			0.17
陶粒运输阶段				
	运输方式	运输距离 (km)	运输量 (kg)	
从陶粒厂运输至使用现场	公路-30t 柴油货车	70 ^[53]		1
陶粒废弃处置阶段				
	运输方式	运输距离 (km)	运输量 (kg)	
从使用地运输至填埋场	公路-30t 柴油货车	30		1
	柴油消耗(kg)			0.228×10^{-3} ^[52]

表 3 1kg 粉煤灰陶粒生产的生产生命周期清单

Table 3 Life cycle inventory for the production of 1kg fly ash

ceramsite				
原料获取阶段				
原料类别	运输方式	运输距离 (km)	运输量 (kg)	
原料从开采地	粉煤灰	公路-30t 柴油货车	90 ^[53]	1.50
到陶粒厂	黏土	公路-30t 柴油货车	90 ^[53]	0.90
粉煤灰从产生厂到填埋场		公路-30t 柴油货车	30	1.50
陶粒生产阶段				
	粉煤灰(kg)			1.50
	黏土(kg)			0.90
	电力消耗(kW·h)			0.12×10^{-3}
	天然气消耗(m ³)			4.17×10^{-3}
陶粒运输阶段				
	运输方式	运输距离 (km)	运输量 (kg)	
从陶粒厂运输至使用现场	公路-30t 柴油货车	70 ^[53]		1
陶粒废弃处置阶段				
	运输方式	运输距离 (km)	运输量 (kg)	
从使用地运输至填埋场	公路-30t 柴油货车	30		1
	柴油消耗(kg)			0.228×10^{-3} ^[52]

2 结果与讨论

2.1 污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹分析

1kg 污泥陶粒和 1kg 粉煤灰陶粒碳足迹如表 4 所示(2022 年数据).研究发现,生产 1kg 污泥陶粒和 1kg 粉煤灰陶粒碳足迹分别为 1.00 和 0.58kg.粉煤灰陶粒相比于污泥陶粒可实现约 42%的碳减排效益,说明在减碳方面,生产粉煤灰陶粒是中国更优的选择.此外,污泥陶粒和粉煤灰陶粒碳排放特征相似,生命周期阶段的碳排放量由小到大均为:原料获取阶段<陶粒运输阶段<陶粒废弃处置阶段<陶粒生产阶段.污泥陶粒和粉煤灰陶粒原料获取阶段产生了正向的碳减排效益,主要因为使用了污泥、粉煤灰的固体废物作为生产原料,进而避免了填埋处置以上固体废物的能源消耗^[2]以及填埋气的产生;陶粒废弃处置阶段的碳排放与填埋处置时填埋气等温室气体的产生息息相关,另外陶粒运输和陶粒废弃处置阶段的碳排放也主要归因于成品场外运输和废陶粒运输至填埋场使用柴油等化石能源的燃烧^[20];陶粒生产阶段的碳排放与原料生产工艺过程的碳排放息息相关,污泥陶粒和粉煤灰陶粒生产工艺碳排放占到生产阶段碳排放的 90%以上,优化原材料使用结构是降低陶粒生产阶段碳排放重要举措.1kg 污泥陶粒生产阶段 CO₂eq 排放量约为 1kg,高于周越^[38]研究结果(0.5kgCO₂),此外,相比于轻质陶粒 0.44~0.56kgCO₂ 的碳排放^[48,54]也增加了近一倍;1kg 粉煤灰陶粒生产阶段 CO₂eq 排放量约为 0.57kg,高于房明慧 0.36kgCO₂^[39]的研究结果,主要因为本研究是包含了范围一、二和三的碳足迹结果,而文献只包含了范围一、二的 CO₂ 排放,本研究碳核算范围更大,这也说明了范围三的碳排放不可忽视.

表 4 1kg 污泥陶粒和 1kg 粉煤灰陶粒碳足迹

Table 4 Carbon footprint of 1kg sludge ceramsite and 1kg fly ash ceramsite

生命周期阶段	污泥陶粒 CO ₂ eq 排放量(kg)	粉煤灰陶粒 CO ₂ eq 排放量(kg)
原料获取阶段	-0.11	-0.06
陶粒生产阶段	1.03	0.57
陶粒运输阶段	0.01	0.01
陶粒废弃处置阶段	0.06	0.06
合计	1.00	0.58

2.2 碳足迹结果不确定性分析

文章利用 IPCC 的误差传播方程定量评估了污泥陶粒和粉煤灰陶粒全生命周期各阶段以及碳足迹的不确定性,结果如表 5 所示.参考张晓梅研究^[55],实景数据不确定性按 5%取值,背景数据不确定性按照 10%取值,结果显示,污泥陶粒原料获取阶段、生产阶段、运输阶段和废弃处置阶段碳核算结果不确定性分别为 13%、10%、11%和 10%,最终 1kg 污泥陶粒生命周期碳足迹不确定性为 8%;粉煤灰陶粒除原料获取阶段(16%),其余各生命周期阶段碳排放核算结果不确定性均在 11%左右,1kg 粉煤灰陶粒碳足迹不确定性略高于污泥陶粒为 10.74%.总体分析,文章各项不确定性均在合理范围内^[55-57].不确定性通过与碳排放核算相关的研究^[41,55]对比在合理范围内.

表 5 1kg 污泥陶粒和 1kg 粉煤灰陶粒碳足迹的不确定性
Table 5 Uncertainty in carbon footprint of 1kg sludge ceramsite and 1kg fly ash ceramsite

阶段	污泥陶粒不确定性(%)	粉煤灰陶粒的不确定性 (%)
原料获取阶段	±13.16	±15.98
陶粒生产阶段	±10.04	±10.71
陶粒运输阶段	±11.18	±11.18
陶粒废弃处置阶段	±10.48	±10.48
碳足迹	±10.56	±10.74

2.3 敏感性分析

通过污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹分析,发现运输结构、电力结构、原料结构均是影响污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹的因素,基于此文章进一步选取运输碳足迹因子、电力碳足迹因子、燃料消耗量、污泥使用量以及粉煤灰使用量 4 项影响因子进行敏感性分析,判识陶粒碳足迹对于几种影响因子的敏感性.针对运输碳足迹因子、电力碳足迹因子和污泥使用量以及粉煤灰使用量进行±20%和±40%的敏感性分析,敏感性分析结果见表 6.

敏感性系数越大,表示碳足迹结果受该项因素影响越大^[43].分析发现,原料结构是影响污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹最敏感的因素,即固废原料使用量(污泥、粉煤灰),当将污泥和粉煤灰用量比例提高 20%时,1kg 污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹分别可降低约 7%(图 2(a))和 34%(图 2(c)),由此分析发现,相比

于污泥陶粒,粉煤灰陶粒碳足迹受原料结构调整影响更大.其次是运输碳足迹因子,如果运输碳足迹因子降低20%,1kg 污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹分别为 0.99kg(图 2(b))和 0.57kg(图 2(c)),均实现约 1%的碳减排.

表 6 敏感性分析结果

Table 6 Sensitivity analysis results

影响因子	变动率(%)	敏感性系数	
		污泥陶粒	粉煤灰陶粒
运输碳足迹因子	±20	0.03	0.06
	±40		
电力碳足迹因子	±20	0.00	0.00
	±40		
燃料消耗量	±20	0.02	0.02
	±40		
污泥使用量	±20	0.35	/
	±40		/
粉煤灰使用量	±20	/	1.71
	±40	/	

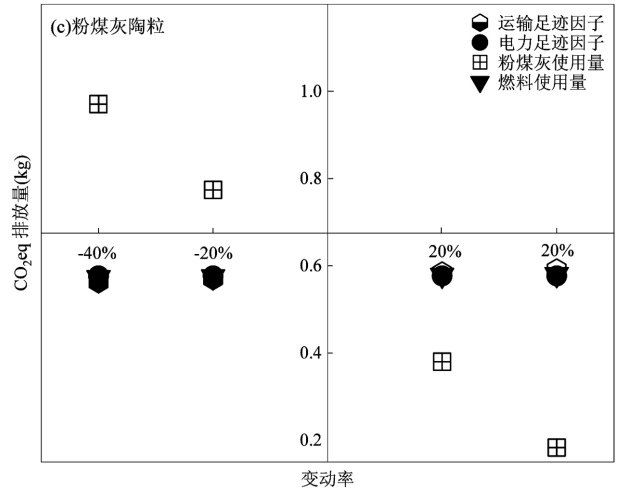
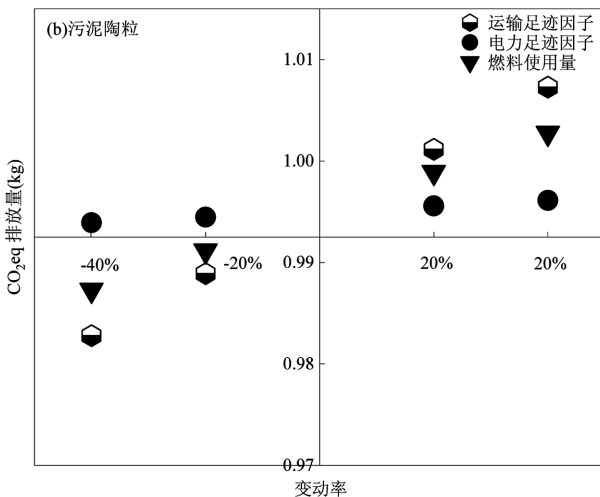
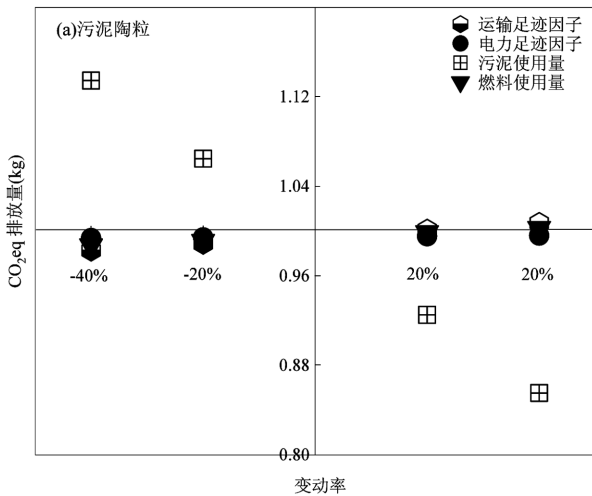


图 2 基于敏感性因素变化的 1kg 污泥陶泥和 1kg 粉煤灰陶粒碳足迹

Fig.2 Carbon footprint of 1kg sludge ceramsite and 1kg fly ash ceramsite based on sensitivity factor changes

图(b)为图(a)的局部放大



另外污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹对于电力碳足迹因子和燃料消耗量的影响均不敏感.因此,未来降低陶粒产品的碳排放应该从优化运输和原料结构入手,但是同时需要注意的是,陶粒产品运输结构优化通常是提高电动汽车运输的占比,那么此时,涉及运输的碳排放就与电力碳足迹因子息息相关.所以,在优化运输结构的同时降低电力碳足迹因子也是陶粒产品未来降碳的一个重要方向.

2.4 污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳减排潜力评估

通过敏感性分析可知运输碳足迹因子、固废原料用量是影响陶粒产品碳足迹的重要因素.因此,设置以下 5 种低碳情景以分析污泥陶粒和粉煤灰陶粒的碳减排潜力(表 7).

不同情景下 1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒的碳足迹如图 3 所示.通过提高陶粒产品中污泥和粉煤灰的用量,1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒分别能够实现约 31%和 75%的碳减排潜力,因减少了黏土、页岩等原料用量而实现减排效益^[62].相比于原料优化情景,通过使用电动汽车替代柴油货车运输具有较低的减排潜力,当前,中国电动汽车领域发展迅速,保有量占比已达到全球 50%左右^[63],在运输优化情景下,1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒仅能实现约 2%的碳减排潜力.鉴于电动汽车的碳排放与电力碳足迹因子息息相关,文

章设置了 3 种协同优化情景:协同优化 1 情景同时优化运输和原料结构,1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒分别实现 31.96%和 77.42%的碳减排潜力;虽然污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹受电力碳足迹因子影响没有运输碳足迹因子敏感,但是相比于单独优化运输结构,联合采取优化运输和电力结构两种措施能够使减排潜力提高 70%~80%,协同优化 2 情景下,1kg 污泥陶粒

和粉煤灰陶粒分别达到 2.26%和 4.24%减排潜力;同时优化运输、电力和原料结构,1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒碳足迹分别比基准情景下降 32.96%和 79.03%,协同优化 3 情景下碳减排潜力比协同优化 1 情景稍高.综合政策、经济、时间等因素,优化运输结构的同时提高固废原料使用量或单独优化原料结构是陶粒产品未来降碳的优先选择.

表 7 污泥陶粒和粉煤灰陶粒的碳减排潜力评估情景设置^[12,22,50,51,57-61]

Table 7 Scenario setting for carbon reduction potential assessment of sludge ceramsite and fly ash ceramsite

减碳情景	情景说明	关键参数选取	关键参数设定	说明
运输优化	使用纯电动重卡替代原有的重型柴油货车运输	运输碳足迹因子(kg/(t·km))	0.046	
原料优化	提高污泥和粉煤灰的用量	原料中污泥占比(%) 原料中粉煤灰占比(%)	60 90	
协同优化 1	运输+原料 使用纯电动重卡替代原有的重型柴油货车运输,提高污泥和粉煤灰的用量	运输碳足迹因子(kg/(t·km)) 原料中污泥占比(%) 原料中粉煤灰占比(%)	0.046 60 90	电力碳足迹因子参考国家发展改革委《以双碳目标为导向的产业链评估与发展路径研究》项目报告数据
协同优化 2	运输+电力 使用纯电动重卡替代原有的重型柴油货车运输,同时优化电力结构,降低电力碳足迹因子	运输碳足迹因子(kg/(t·km)) 电力碳足迹因子(t/(MW·h))	0.024 0.48	
协同优化 3	运输+原料+电力 使用纯电动重卡替代原有的重型柴油货车运输,提高污泥和粉煤灰的用量,同时优化电力结构,降低电力碳足迹因子	运输碳足迹因子(kg/(t·km)) 原料中污泥占比(%) 原料中粉煤灰占比(%) 电力碳足迹因子(t/(MW·h))	0.024 60 90 0.48	

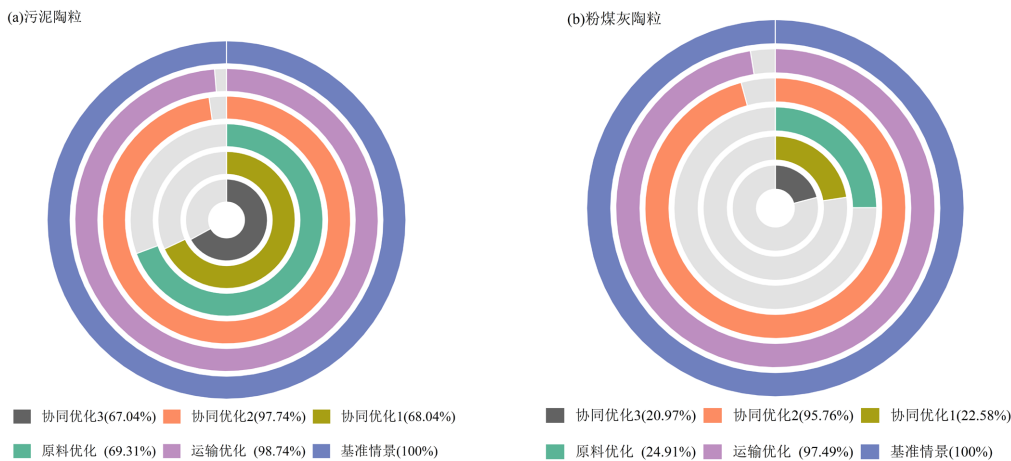


图 3 不同情景下 1kg 污泥陶粒和 1kg 粉煤灰陶粒碳减排潜力

Fig.3 Carbon reduction potential of 1kg sludge ceramsite and 1kg fly ash ceramsite under different scenarios

3 结论

3.1 从碳足迹角度分析,生产 1kg 粉煤灰陶粒比生产 1kg 污泥陶粒更低碳.生产 1kg 污泥陶粒和 1kg 粉煤灰陶粒碳足迹分别为 1.00 和 0.58kg,粉煤灰陶粒相比于污泥陶粒可实现约 42%的碳减排效益.污泥

陶粒和粉煤灰陶粒碳排放特征相似,原料获取阶段以及陶粒生产阶段是两种陶粒产品进行碳减排的关键环节,其中原料获取阶段自带 11%的碳减排效益;污泥陶粒和粉煤灰陶粒原料获取阶段的碳排放分别占各自碳足迹(除原料获取阶段)的 93.71%和 89.12%.

3.2 敏感性分析结果显示,原料结构是影响污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹最敏感的因素,且相比于污泥陶粒,粉煤灰陶粒碳足迹受原料结构调整影响更大.其次是运输结构,另外,污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹对于电力碳足迹因子和燃料消耗量的敏感性较低.鉴于陶粒产品运输结构优化通常是提高电动汽车运输的占比,在优化运输结构的同时降低电力碳足迹因子是陶粒产品未来降碳的一个重要方向.

3.3 单独优化原料结构比优化运输结构具有更大的减排优势.在原料优化情景下,1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒均能够实现约 30%~75%的碳减排潜力,而运输优化情景下碳减排潜力低于 5%;此外,原料优化情景下粉煤灰陶粒碳减排潜力(75%)是污泥陶粒碳减排潜力(31%)的 2.42 倍.综合政策、经济、时间等因素,联合优化运输和原料结构或单独优化原料结构是陶粒产品未来降碳的优先选择.协同优化 1 情景下(优化运输和原料结构),1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒分别达到 31.96%和 77.42%的碳减排潜力;协同优化 2 情景下(优化运输和电力结构),1kg 污泥陶粒和粉煤灰陶粒仅实现 2.26%和 4.24%减排潜力.

参考文献:

- [1] Ma X T, Zhang T Z, Shen X Q, et al. Environmental footprint assessment of China's ceramic tile production from energy-carbon-water nexus insight [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,337: 130606.
- [2] Wang Y, Liu Y, Cui S, et al. Comparative life cycle assessment of different fuel scenarios and milling technologies for ceramic tile production: a case study in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,273:122846.
- [3] Mallapaty S. How China could be carbon neutral by mid-century [J]. *Nature*, 2020,586(7830):482-483.
- [4] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话 [J]. *中国环境监察*, 2020,(12):9.
Xi J P. Building on past achievements and launching a new journey for global climate actions—statement at the climate ambition summit [J]. *China Environment Supervision*, 2020,(12):9.
- [5] 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)—2021ceramsite industry research report [J]. *Brick-Tile*, 2021,(10):44-48.
- [6] 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.
- [7] 谢思松.“小”陶粒开启固废应用“大”世界 [N]. *中国建材报*, 2023-09-04(003).
Xie S S. " Small " ceramic particles open up the application of solid waste in the "big" world [N]. *China building materials daily*, 2023-09-04(003).
- [8] 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): 20301.
- [9] 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*, 2024,448:141556.
- [10] Li J,Yu G W, Xie S Y, et al. Immobilization of heavy metals in ceramsite produced from sewage sludge biochar [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,628-629:131-140.
- [11] Meng J P, Cui Z X, Srinivasakannan C, et al. Preparation of porous ceramsite from municipal sludge and its structure characteristics [J]. *Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics*, 2023,122(5-8):322-335.
- [12] 陈芳,冯奕程,吴佳育,等.市政污泥陶粒制备及其资源化利用研究进展 [J/OL]. *材料导报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240320.1037.013.html> 2024-05-15.
Chen F, Feng Y C, Wu J Y, et al. Research progress on unburned ceramsite preparation technologies of fly ash [J/OL]. *Materials Reports*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240320.1037.013.html> 2024-05-15.
- [13] 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]. *Bioresource Technology*, 2022,376:134309.
- [14] Zhang Z Y, Zhao M Y, Zhang Y S, et al. The solidification and volatilization behavior of heavy metal ions in ceramic proppant made from fly ash [J]. *Bioresource Technology*, 2023,49(17):28326-28336.
- [15] Tang Y Y, Chan S W, Shih K. Copper stabilization in beneficial use of waterworks sludge and copper-laden electroplating sludge for ceramic materials [J]. *Waste Management*, 2014,34(6):1085-1091.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Małaszkiwicz D, Jastrzębski D. Lightweight self-compacting concrete with sintered fly-ash aggregate [J]. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 2018,27(3):328-337.
- [19] De Souza D M, Lafontaine M, Charron-Doucet F, et al. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,137:70-82.
- [20] Leticia M M, Ahmed W H, Mohammad K N, et al. Comparison of the environmental performance of ceramic brick and concrete blocks in the vertical seals' subsystem in residential buildings using life cycle assessment [J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021,5:100243.

- [21] 赵飞燕,张小东,杜艳霞,等.粉煤灰陶粒的制备技术及研究进展 [J]. 无机盐工业, 2024,56(4):16-23.
Zhao F Y, Zhang X D, Du Y X, et al. Preparation technology and research progress of fly ash ceramsite [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024,56(4):16-23.
- [22] 孟凡宁,武 陈,王 崇,等.粉煤灰免烧陶粒制备技术研究进展 [J]. 化工环保, 2024,44(3):301-306.
Meng F N, Wu C, Wang D, et al. Research progress on unburned ceramsite preparation technologies of fly ash [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2024,44(3):301-306.
- [23] 王 娜,王沛祎,李永超,等.粉煤灰高强陶粒制备研究 [J]. 水泥, 2022,(11):50-53.
Wang N, Wang P W, Li Y C. Research on the preparation of high-strength ceramic particles from fly ash [J]. Cement, 2022,(11):50-53.
- [24] 段凯强,谢慧娟,范智禹,等.赤泥-粉煤灰免烧陶粒的制备及应用 [J]. 非金属矿, 2023,46(1):43-46.
Duan K Q, Xie H J, Fan Z Y, et al. Preparation and characterization of red mud and fly ash non-fired ceramsite [J]. Non-Metallic Mines, 2023,46(1):43-46.
- [25] Shi X, Geng C, Li Q M, et al. A novel application for magnetite tailings and municipal sludge in ceramsite preparation [J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2024,43(1):14239.
- [26] Guo P, Zhao Z, Li Y, et al. Co-utilization of iron ore tailings and coal fly ash for porous ceramsite preparation: Optimization, mechanism, and assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2023,348:119273.
- [27] 王 俭,李 鑫,王芷馨,等.市政污泥陶粒的制备及其在水处理中应用的研究进展 [J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2023,50(4):340-347.
Wang J, Li X, Wang Z X, et al. Preparation of ceramsite from municipal sludge and its application in water treatment [J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2023,50(4):340-347.
- [28] 钟嘉利,罗居海,陈孝娥.污泥陶粒的制备及应用研究现状 [J]. 全面腐蚀控制, 2023,37(8):71-74.
Zhong Z L, Luo J H, Chen X E. Preparation of sludge ceramide and its application research status [J]. Experience Exchange, 2023,37(8):71-74.
- [29] Su Y L, Li F, He Z Q, et al. Artificial aggregates could be a potential way to realize microbial self-healing concrete: An example based on modified ceramsite [J]. Journal of Building Engineering, 2021,35:102082.
- [30] Zhou J P, Ji L, Gong C C, et al. Ceramsite vegetated concrete with water and fertilizer conservation and light weight: effect of w/c and fertilizer on basic physical performances of concrete and physiological characteristics of festuca arundinacea [J]. Construction and Building Materials, 2020,236:117785.
- [31] Dong L, Qi Z P, Li M Q, et al. Organics and nutrient removal from swine wastewater by constructed wetlands using ceramsite and magnetite as substrates [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021,9(1):104739.
- [32] Chen Y C, Shi J W, Rong H, et al. Adsorption mechanism of lead ions on porous ceramsite prepared by co-combustion ash of sewage sludge and biomass [J]. Science of the Total Environment, 2020,702:135017.
- [33] 郝禅光,李春立,李 权,等.污泥陶粒的功能化改性及含磷废水处理研究 [J]. 功能材料, 2024,55(4):4142-4151.
Hao C G, Li C L, Li Q, et al. Study on functional modification of sludge ceramsite and treatment of wastewater containing phosphorus [J]. Journal of Functional Materials, 2024,55(4):4142-4151.
- [34] 莎茹拉,郭大立,金翠叶.褐煤粉煤灰陶粒的制备方法及其对重金属废水净化性能的研究 [J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2022,38(10):63-67.
Sha R L, Guo D L, Jin C Y. Preparation method of brown coal powder fly ash ceramic particles and their purification performance for heavy metal wastewater [J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2022,38(10):63-67.
- [35] 李 杰,潘兰佳,余广炜,等.污泥生物炭制备吸附陶粒 [J]. 环境科学, 2017,38(9):3970-3978.
Li J, Pan L J, Yu G W, et al. Preparation of adsorption ceramsite derived from sludge biochar [J]. Environmental Science, 2017,38(9):3970-3978.
- [36] 刘 畅.盐冻作用下粉煤灰陶粒混凝土的宏、微观损伤机理研究 [D]. 新疆:新疆农业大学, 2023.
Liu C. Study on macro and micro damage mechanism of fly ash ceramsite concrete under salt freezing effect [D]. Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2023.
- [37] 冯 琢.粉煤灰页岩陶粒混凝土力学与导热性能试验研究 [J]. 当代化工, 2022,51(11):2545-2548.
Feng Z. Experimental study on mechanical properties and thermal conductivity of fly ash shale ceramsite concrete [J]. Contemporary Chemical Industry, 2022,51(11):2545-2548.
- [38] 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.
- [39] 房明慧.典型墙体材料的生命周期评价 [D]. 北京:北京工业大学, 2013.
Fang M H. The life cycle assessment of typical wall materials [D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2013.
- [40] 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.
- [41] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories [EB/OL]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/chinese/gp_gaum_cn.html 2001-06-15.
- [42] 彭 卓,郭春梅,汪磊磊,等.绿色建筑全生命周期 CO₂ 排放敏感性与减碳潜力研究 [J]. 天津城建大学学报, 2021,27(6):436-441.
Peng Z, Guo C M, Wang L L, et al. Total life-cycle analysis of CO₂ emission sensitivity and reduction potential of green building [J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2021,27(6):436-441.
- [43] 张 晔,宋国华,尹 航,等.综合交通运输系统碳排放预测的不确定性分析 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2023,21(1):64-79.
Zhang Y, Song G H, Yin H, et al. Uncertainty analysis of future carbon emissions of integrated transportation system [J]. Journal of

- Transportation Engineering and Information, 2023,21(1):64-79.
- [44] 蔡博峰,朱松丽,于胜民,等.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读 [J]. 环境工程, 2019,37(8):1-11.
Cai B F, Zhu S L, Yu S M, et al. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [J]. Environmental Engineering, 2019,37(8):1-11.
- [45] 程 豪.碳排放怎么算-《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J]. 中国统计, 2014,(11):28-30.
Cheng H. How to calculate carbon emissions - 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [J]. China Statistics, 2014,(11): 28-30.
- [46] 陈海红,李鹏程,王中航. GB/T 2589-2020《综合能耗计算通则》国家标准解读 [J]. 标准科学, 2021,(12):107-111.
Chen H H, Li P C, Wang Z H. Interpretation of national standard GB/T 2589-2020, general rules for calculation of the comprehensive energy consumption [J]. Standard Science, 2021,(12):107-111.
- [47] 王琢璞.新能源汽车动力电池回收利用潜力及生命周期评价 [D]. 北京:清华大学, 2018.
Wang Z P. Potential and life cycle assessment of recycling of power batteries for new energy vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [48] 周 越.浙江省建筑外墙保温体系物化过程 CO₂ 排放研究 [D]. 浙江:浙江大学, 2017.
Zhou Y. Research of CO₂ emission of building external wall insulation system in materialization procession Zhejiang province [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2017.
- [49] GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准 [S].
GB/T 51366-2019 Calculation standard for building carbon emissions [S].
- [50] 电车资源.特百佳动力王永刚:为市场提供全方位新能源商用驱动解决方案 [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/VmnlIUU33P5rZzoaD0-XzQ> 2022-01-02.
Tram resources. TeBaiJia power wang yonggang: providing comprehensive new energy commercial drive solutions for the market [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/VmnlIUU33P5rZzoaD0-XzQ> 2022-01-02.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 《江苏交通年鉴》编辑部.江苏交通年鉴 [M]. 2022.
Jiangsu Transportation Yearbook Editorial Department. Jiangsu transportation yearbook [M]. 2022.
- [54] 肖利涛,秦朝葵.陶粒生产工艺与节能措施 [J]. 工业炉, 2014,36(5): 24-27.
Xiao L T, Qin C K. Production process and energy-saving measures of ceramsite [J]. Industrial Furnace, 2014,36(5):24-27.
- [55] 张晓梅,庄贵阳,刘 杰.城市温室气体清单的不确定性分析 [J]. 环境经济研究, 2018,3(1):8-18,149.
Zhang X M, Zhuang G Y, Liu J. Uncertainty analysis of urban greenhouse gas inventories [J]. Journal of Environmental Economics, 2018,3(1):8-18,149.
- [56] 宋晓聪,邓陈宁,沈 鹏,等.基于生命周期评价的纯电动汽车环境影响和碳足迹分析 [J]. 环境科学研究, 2023,36(11):2179-2188.
Song X C, Deng C N, Shen P, et al. Environmental impact and carbon footprint analysis of pure electric vehicles based on life cycle assessment [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(11): 2179-2188.
- [57] 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. Life cycle carbon emission accounting and emission reduction potential assessment of steel industry [J]. Environmental Science, 2023,44(12):6630-6642.
- [58] 林水静.我国更新电力二氧化碳排放因子 [N]. 中国能源报, 2024-04-22(010).
Lin S J. China updates carbon dioxide emission factors for electricity [N]. China Energy News, 2024-04-22(010).
- [59] 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. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2023,42(4):1374-1383.
- [60] 杨继林.粉煤灰及其高附加值化利用 [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/LiqafdqMsLmMnnUIHVxfUA> 2023-12-25.
Yang J L. Fly ash and its high value-added utilization [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/LiqafdqMsLmMnnUIHVxfUA> 2023-12-25.
- [61] GESO LU M, GÜNEYISI E, ÖZTURAN T, et al. Permeation characteristics of self-compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates [J]. Construction Building Materials, 2014,59:1-9.
- [62] Preparation of ceramsite from municipal sludge and its application in water treatment: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2021,287:112374.
- [63] Chen Q W, Lai X, Gu H H, et al. Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,369:133342.

作者简介: 宋晓聪(1992-),女,河北石家庄人,工程师,硕士,主要从事固体废物资源化碳评价领域研究.发表论文 20 余篇.2634145277@qq.com.