

文章编号: 1008-1542(2026)01-0108-11

针刺土工布产品生产过程的碳足迹核算与分析

杨明欣¹, 石卓娅¹, 陈军霞¹, 王玉恒¹, 董文旭²

(1. 河北科技大学经济管理学院, 河北石家庄 050018;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北石家庄 050022)

摘要: 为了评估针刺土工布在生产过程中的碳排放问题, 以 S 工厂为研究对象, 基于生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 方法构建针刺土工布生产过程的碳足迹模型。核算原材料使用、原材料运输、生产制造及辅助设备运行等阶段的碳排放; 通过局部敏感性分析、全局敏感性分析识别出影响碳足迹的关键因素; 结合蒙特卡洛模拟评估结果的不确定性, 提出节能减排的优化路径。结果表明, S 工厂每生产 1 t 针刺土工布, 其生产过程的总碳足迹为 4 374.61 kgCO₂, 其中原材料使用阶段占比最高, 是碳减排的核心关注点; 蒙特卡洛模拟结果验证了碳足迹落在 95% 置信区间内, 模型结果可靠。研究结果可为针刺土工布生产企业的碳排放管理提供科学依据, 助力行业绿色低碳转型。

关键词: 能源计算与测量; 碳足迹; 针刺土工布; 生产过程; 节能减排

中图分类号: X22 文献标识码: A DOI: 10.7535/hbkd.2026yx01011

Calculation and analysis of carbon footprint in the production process of needle-punched geotextiles

YANG Mingxin¹, SHI Zhuoya¹, CHEN Junxia¹, WANG Yuheng¹, DONG Wenxu²

(1. School of Economics and Management, Hebei University of Science and Technology,
Shijiazhuang, Hebei 050018, China;

2. Center for Agricultural Resources Research, IGDB, CAS, Shijiazhuang, Hebei 050022, China)

Abstract: To evaluate the carbon emission issue during the production process of needle-punched geotextiles, S factory was taken as the research subject. A carbon footprint model for the production process of needle-punched geotextiles was constructed based on the life cycle assessment (LCA) method to calculate the carbon emissions in stages such as raw material usage, raw material transportation, production manufacturing, and auxiliary equipment operation. Through local sensitivity analysis and global sensitivity analysis, the key influencing factors of the carbon footprint were identified. Combined with the

收稿日期: 2025-04-15; 修回日期: 2025-09-10; 责任编辑: 胡姝洋

基金项目: 国家自然科学基金 (32471719); 石家庄市驻冀高校重点研发专项 (241130091A); 河北科技大学校级教改重点项目 (2022-ZD004)

第一作者简介: 杨明欣 (1974—), 女, 河北武邑人, 教授, 博士, 主要从事区块链与碳排放、大数据分析 with 挖掘等方面的研究。

通信作者: 陈军霞, 副教授。E-mail: 1156048130@qq.com

石卓娅。E-mail: szy98000@163.com

杨明欣, 石卓娅, 陈军霞, 等. 针刺土工布产品生产过程的碳足迹核算与分析[J]. 河北科技大学学报, 2026, 47(1): 108-118.

YANG Mingxin, SHI Zhuoya, CHEN Junxia, et al. Calculation and analysis of carbon footprint in the production process of needle-punched geotextiles[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2026, 47(1): 108-118.

uncertainty assessment results of the Monte Carlo simulation, an optimized path for energy conservation and emission reduction was ultimately proposed. The research results show that for every ton of needle-punched geotextiles produced by S factory, the total carbon footprint of the production process is 4 374.61 kgCO₂, with the highest proportion of raw material usage stage, which is the core focus of carbon reduction. The Monte Carlo simulation results also verify that the carbon footprint falls within the 95% confidence interval, confirming the reliability of the model results. The research findings can provide scientific basis for the carbon emission management of needle-punched geotextile production enterprises and facilitate the green and low-carbon transformation of the industry.

Keywords: energy calculation and measurement; carbon footprint; needle-punched geotextiles; production process; energy conservation and emission reduction

全球气候变化问题日益严峻,温室气体排放成为国际关注的焦点,减少碳排放、实现低碳发展已成为各国重要战略目标^[1]。纺织行业作为工业端碳排放大户,其碳足迹机理研究已纳入国家“双碳”科技专项优先课题,进入实证攻坚阶段^[2]。针刺土工布作为纺织行业的重要分支产品,广泛应用于土木建筑、水利工程、交通工程等基础设施建设^[3],其生产需经纤维梳理、铺网、针刺等关键工序,这些工序均依赖电力驱动的各类机械设备,同时除尘装置、照明装置等辅助设备的运行,也会直接或间接导致温室气体排放^[4-5]。

据国际土工合成材料协会年度行业报告统计,全球针刺土工布年产量已超 120 万 t,中国作为最大生产国,年产量占比达 60%以上,在全球产业链中占据重要地位。目前,对土工布这类特定产品的生产碳排放关注依然较少,现有碳足迹核算技术也存在明显局限性:传统方法缺乏对针刺土工布生产流程的细致剖析,且难以全面合理评估除尘装置等辅助设备对整体碳足迹的综合影响。即便已有相关研究为纺织行业提供参考,如 KUMAR 等^[6]通过纤维类型优选降低工程维护碳排放,KOLA 等^[7]强调全生命周期评价(life cycle assessment, LCA)的重要性,储昭权等^[8]、杨丽萍^[9]、欧阳顺怡^[10]分别针对棉纺织品、纺织服装行业、纺织印染企业构建碳核算框架或提出降碳建议,却均未聚焦针刺土工布生产场景,未能解决其“核心工序-辅助设备”协同碳贡献的核算问题。此外,中国土工合成材料工程协会 2024 年发布的碳足迹管理体系实施方案,仅提出行业层面管控方向,缺乏针对针刺土工布的具体核算支撑。

为解决上述问题,针对性地提出了针刺土工布生产过程的碳足迹核算方法:第一,突破传统纺织碳核算的通用框架,针对针刺土工布这种特定产品的工艺特性,将核心工序拆解为纤维梳理、交叉铺网、针刺加固、后处理 4 个关键环节,区分不同能耗类型,细化各工序碳排放核算颗粒度;第二,创新辅助设备碳贡献量化方法,通过建立除尘装置、照明系统与碳排放的关联模型,解决传统方法中辅助设备碳影响被忽略或笼统计算的问题,填补特定产品生产环节碳足迹研究的缺口。本文构建与分析针刺土工布生产过程的碳足迹模型,对生产企业节能减排、行业绿色转型与纺织行业“双碳”目标的实现具有参考价值。

1 针刺土工布产品信息及生产工艺能耗分析

1.1 针刺土工布产品信息

针刺土工布是以合成纤维为原料,经过开松、梳理、成网、针刺等工艺制成的一种非织造布。其主要原料有聚酯纤维(polyester, PET)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚乙烯、聚酰胺等^[11],其中 PP、PET 等材料具有强度高、耐腐蚀、抗老化等优点,使得针刺土工布能够在不同的工程环境中稳定发挥作用^[12-13]。

针刺土工布依据不同的标准可进行多种分类。按原料区分,主要可分为聚酯针刺土工布、聚丙烯针刺土工布以及二者混纺的针刺土工布等。其中,聚酯针刺土工布具有较高的强度和抗紫外线性能;聚丙烯针刺土工布则有良好的耐化学腐蚀性和性价比。按结构和功能划分,有普通针刺土工布、复合针刺土工布(如与防渗膜复合形成防水防渗材料)等^[14]。

针刺土工布的产品规格多样,克重一般为 100~800 g/m²,幅宽通常为 2~6 m,以满足不同的工程需求。产品的结构主要分为单层、多层复合等形式,以满足不同工程对土工布性能的要求。例如,在道路工程中,常使用克重较大、强度较高的针刺土工布作为路基的加筋材料;在水利工程中,多层复合的针刺土工布可

用于堤坝的防渗和排水。本文所设定的原材料为PET,产品规格如表1所示。

1.2 生产工艺及能耗分析

针刺土工布的生产属于典型的工业制造过程,需经原材料纤维梳理、交叉铺网、针刺加固、后处理等多道工序。整个生产流程以电能为主要能源消耗形式。具体生产过程如下:原材料依次经开包机、开松机、给棉机、梳理机、铺网机、预刺机、主刺机和收卷切边机,完成纤维开松、梳理、铺网、针刺、后处理等工序,生产流程图如图1所示。生产流程中各工序对应的设备、功能、功率等具体信息如表2所示。

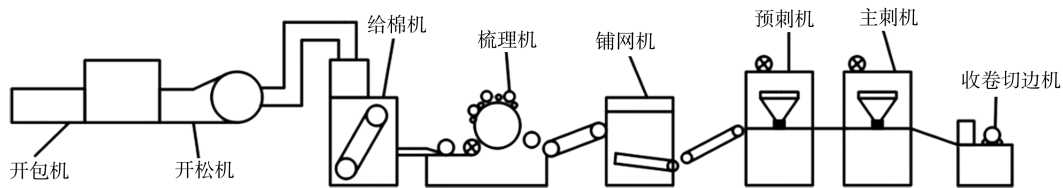


图1 针刺土工布生产流程图

Fig.1 Production flowchart of needled getextile

表2 生产流程

Tab.2 Line of production

工序	设备	功能描述	装机总功率/kW	输入/输出
纤维梳理	开包机	拆解压缩纤维包,初步松散纤维	5.95	输入:压缩纤维包 输出:松散纤维块
	开松机	分解纤维束至单纤维状态,去除杂质	25.50	输入:松散纤维块 输出:松散纤维
	给棉机	均匀喂入纤维至梳理机	12.40	输入:松散纤维 输出:均匀喂棉层
	梳理机	将纤维梳理成薄层纤网	22.75	输入:均匀喂棉层 输出:薄层纤网
交叉铺网	铺网机	叠加纤网至目标克重(交叉/平行铺网)	11.50	输入:薄层纤网 输出:厚层纤网(400 g/m ²)
针刺加固	预刺机	初步针刺加固纤网,提升强度	22.50	输入:厚层纤网 输出:初加固布坯
	主刺机	深度针刺使纤维缠结,达到最终强度	24.45	输入:初加固布坯 输出:成品土工布
后处理	收卷切边机	切除毛边、收卷成品	6.75	输入:成品土工布 输出:标准卷材

2 针刺土工布生产过程的碳足迹模型

2.1 声明系统边界和定义功能单位

本文以针刺土工布产品为核心研究对象,明确其系统边界为从“摇篮”到“大门”^[15],具体涵盖从原材料获取到成品完成的所有工序,不包含原材料开采前期及产品出厂后的运输、使用、废弃等环节。研究聚焦于生产制造阶段,系统边界示意图如图2所示。在实际生产中,通常以1t作为针刺土工布产品的功能单位。

表1 产品规格表

Tab.1 Product specification sheet

参数	指标
基材	PET
克重	400 g/m ²
幅宽	4.2 m
厚度	2.5 mm
抗拉强度	≥35 kN/m(纵向)
	≥28 kN/m(横向)
断裂伸长率	60%(纵向)
	75%(横向)
CBR 顶破强力	4.5 N
渗透参数	0.5 cm/s

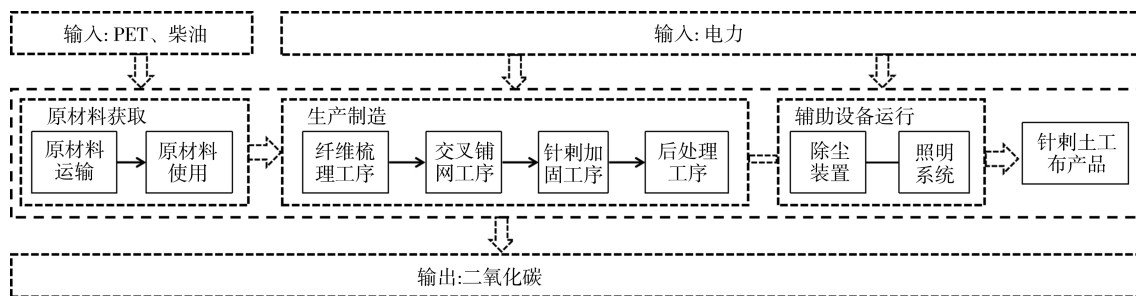


图 2 系统边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system boundaries

2.2 生命周期碳足迹建模

基于排放因子法,计算生产 1 t 针刺土工布产品在各阶段的碳排放,并将各阶段的碳排放累加,得到该产品生产过程的碳足迹^[16-17]。

2.2.1 原材料获取阶段

在企业实际生产中,往往存在原材料的损耗问题,主要原因是:除尘装置(布袋除尘器)运行会带走部分纤维;铺网机运行时高速气流携带短纤维逃逸;刺针沟槽残留棉杂等。通过企业实地调研得知,原材料正常损耗率为 3%~5%,本文选取调研当日实际数据 3.5%作为损耗率来进行核算。

1) 原材料使用 原材料使用阶段的碳排放量如式(1)所示。

$$C_{PET} = (1 + SR\%)M \times EF_{PET}, \quad (1)$$

式中: M 为单位原材料的质量, t; $SR\%$ 为原材料损耗率; EF_{PET} 为对应原材料的碳排放因子; C_{PET} 为生产单位产品的针刺土工布使用原材料造成的碳排放量。

2) 原材料运输 获取近期原材料的运输记录,包括运输交通方式的详细信息、运输里程数据、燃油消耗数据、原材料质量以及交通方式的碳排放因子,以此计算原材料运输碳排放量。原材料一般采用公路运输,其碳排放主要来源于车辆燃料。单位产品原材料的运输碳排放量的具体计算如式(2)所示。

$$\begin{cases} V_{fuel} = F \times \frac{D}{100}, \\ C_{transport} = V_{fuel} \times EF_{diesel}, \\ C_{transport-u} = \frac{C_{transport}}{M \times (1 + SR\%)}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: F 为车辆燃料消耗率; D 为公路运输原材料的运输距离; EF_{diesel} 为车辆燃料的碳排放因子; V_{fuel} 为运输原材料消耗的燃料总量; $C_{transport}$ 为运输原材料所产生的总的碳排放量; $C_{transport-u}$ 为运输单位产品原材料的碳排放量。

2.2.2 生产工序

该产品生产制造阶段主要涵盖 4 个核心工序,各工序及其对应的关键设备分别是:纤维梳理工序,涉及的核心设备包括开包机、开松机、给棉机及梳理机;交叉铺网工序,核心设备为铺网机;针刺加固工序,关键设备包含预刺机与主刺机;后处理工序,所用核心设备为收卷切边机。各工序依次衔接、协同作用,构成完整的针刺土工布生产体系。

1) 纤维梳理工序 纤维梳理工序中所有机器设备处理单位产品的碳排放量如式(3)所示。

$$\begin{cases} C_i = E_i \times EF_{electric}, \\ C_m = \sum_{i=1}^n C_i, \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_i 为 i 设备处理单位产品的电力消耗量; C_i 为 i 设备处理单位产品电力消耗产生的碳排放量; $EF_{electric}$ 为电力碳排放因子; C_m 为所有设备处理单位产品电力消耗产生的碳排放量。

2)交叉铺网工序 交叉铺网工序中铺网机处理单位产品的碳排放量如式(4)所示。

$$C_j = E_j \times EF_{\text{electric}}, \quad (4)$$

式中: C_j 为铺网机处理单位产品电力消耗产生的碳排放量; E_j 为铺网机处理单位产品的电力消耗量。

3)针刺加固工序 针刺加固工序中所有机器设备处理单位产品的碳排放量如式(5)所示。

$$\begin{cases} C_q = E_q \times EF_{\text{electric}}, \\ C_n = \sum_{q=1}^n C_q, \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_q 为针刺加固工序中 q 针刺机的主轴电机、输出电机生产单位产品的电力消耗量; C_q 为 q 针刺机主轴电机、输出电机处理单位产品电力消耗产生的碳排放量; C_n 为针刺加固工序所有设备处理单位产品的碳排放量。

4)后处理工序 后处理工序中收卷切边机处理单位产品的碳排放量如式(6)所示。

$$C_s = E_s \times EF_{\text{electric}}, \quad (6)$$

式中: E_s 为收卷切边机处理单位产品的电力消耗量; C_s 为收卷切边机处理单位产品电力消耗产生的碳排放量。

2.2.3 辅助设备运行

针刺土工布生产过程中会有辅助设备的运行,包括除尘设备、照明系统等。一般因环保的要求,针刺土工布生产企业都会在日常生产过程中开启除尘装置,同时也会伴随着照明系统的使用。因此,研究针刺土工布生产过程的碳足迹也要考虑辅助运行设备所产生的碳排放量。

各类设备在生产单位产品的过程中辅助运行产生的碳排放量如式(7)所示。

$$\begin{cases} E_t = P_t \times T_t, \\ C_t = E_t \times EF_{\text{electric}}, \\ C_k = \sum_{t=1}^n C_t, \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_t 为 t 设备在辅助生产单位产品时的电力消耗量; P_t 为 t 设备整体装机总功率; T_t 为 t 设备在辅助生产单位产品时的运行时间; C_t 为 t 设备在辅助生产单位产品时电力消耗产生的碳排放量; C_k 为辅助运行设备在辅助生产单位产品的过程中电力消耗产生的碳排放量。

将生产单位产品针刺土工布时的原材料运输、生产各工序、辅助设备运行的碳排放量计算结果求和得到针刺土工布产品部分生命周期生产过程的碳足迹,如式(8)所示。

$$C_{\text{LCA}} = C_{\text{PET}} + C_{\text{transport-u}} + C_m + C_j + C_n + C_s + C_k, \quad (8)$$

式中 C_{LCA} 为生产单位产品的针刺土工布生产过程的总碳足迹。

2.3 针刺土工布部分生命周期清单分析

本文在国内针刺土工布的实际生产厂家——河北S土工材料有限公司(简称S公司)实地调研。本次调研以该公司一条针刺土工布生产线为对象,该生产线日均生产6 t 400 g/m² 的产品。通过记录该生产线完整工作日(12 h)生产周期的各设备生产量、原材料进货单、各设备耗电量等实际数据,构建了针刺土工布清单模型,见图3。

碳足迹计算过程中涉及到的碳排放因子来源于IPCC、中国生命周期基础数据库(CLCD)以及《中国区域电网基准线排放因子(2023)》等权威数据源。这些数据库符合中国实际情况,从而确保了清单模型数据的可信度及有效性^[18]。根据《中国区域电网基准线排放因子(2023)》,选用2023年度华北区域电网的电力碳排放因子0.935 0 kgCO₂/kW·h;运输车辆所消耗的能源为柴油,IPCC碳排放因子数据库给出的柴油碳排放因子为2.73 kgCO₂/L;原材料PET碳排放因子根据CLCD来确定。

基于生命周期法,对生产1 t 400 g/m² 的针刺土工布各阶段的能源与物料清单进行数据分析。

2.3.1 原材料获取阶段清单

原材料运输主要考虑运输距离、原材料质量、消耗的燃油材料及用量,能源消耗统计如表3所示。

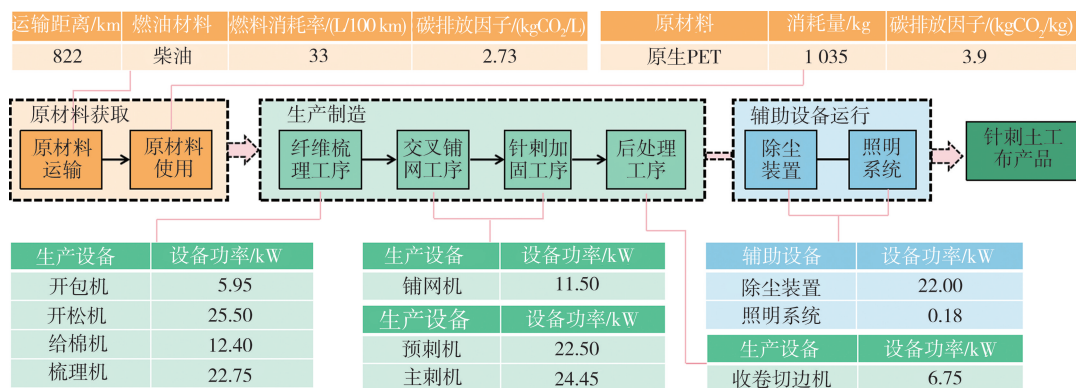


图 3 生命周期碳足迹清单模型

Fig. 3 Life cycle carbon footprint inventory model

表 3 原材料运输清单统计表

Tab. 3 Raw material transportation list statistics table

过程	运输质量/t	运输距离/km	燃油材料	燃料消耗率/(L/100 km)	柴油碳排放因子/(kgCO ₂ /L)
原材料厂商到工厂	10	822	柴油	33	2.73

主要对生产 1 t 产品所消耗的原材料种类以及消耗量进行统计。据企业调查结果显示,生产 1 t 土工布消耗 1 035 kg PET 纤维(损耗率 3.5%)。原材料使用阶段物料消耗清单统计如表 4 所示。

表 4 原材料使用清单统计表

Tab. 4 List of material usage statistics table

原材料	消耗量/kg	PET 碳排放因子/(kgCO ₂ /kg)
PET	1 035	3.9

2.3.2 生产制造阶段清单

详细统计了生产 1 t 400 g/m² 针刺土工布各生产加工工序消耗的能源。依据企业实际调查结果,所消耗的能源均是电能,消耗清单如表 5 所示。

表 5 生产各工序能耗统计表

Tab. 5 Energy consumption statistics table for each production process

工序	设备	装机总功率/kW	电能消耗量/(kW·h)	电力碳排放因子/(kgCO ₂ /kW·h)
纤维梳理	开包机	5.95	10.40	0.935 0
	开松机	25.50	46.80	0.935 0
	给棉机	12.40	23.40	0.935 0
	梳理机	22.75	45.00	0.935 0
交叉铺网	铺网机	11.50	23.00	0.935 0
针刺加固	预刺机	22.50	37.00	0.935 0
	主刺机	24.45	40.90	0.935 0
后处理	收卷切边机	6.75	8.78	0.935 0

2.3.3 辅助设备运行阶段清单

经调查,企业除尘装置及照明系统日运行 12 h,对应的日产量为 6 t。平均生产 1 t 产品所需的辅助设备运行能耗数据如表 6 所示。

表 6 辅助设备能耗统计表

Tab. 6 Auxiliary equipment energy consumption statistics table

设备	装机总功率/kW	电能消耗量/(kW·h)	电力碳排放因子/(kgCO ₂ /kW·h)
除尘装置	22.00	44.00	0.935 0
照明系统	0.18	0.36	0.935 0

3 敏感性分析

敏感性分析是评估模型中输入参数对输出结果影响程度的重要工具。通过敏感性分析,可以识别出对碳足迹影响最大的关键因素,从而为针刺土工布生产过程的节能减排提供针对性的改进建议^[19]。使用MATLAB工具,采用局部敏感性分析和全局敏感性分析相结合的方法,全面评估针刺土工布生产过程中各参数对碳足迹的影响。最后为了评估碳足迹模型的不确定性,采用蒙特卡洛模拟方法,对关键参数进行多次随机抽样,计算碳足迹的概率分布^[20]。

3.1 局部敏感性分析

局部敏感性分析采用 one-at-a-time(OAT)方法,逐个改变输入参数,观察输出结果的变化。OAT方法简单直观,适合初步分析,能够快速识别出对碳足迹影响较大的关键参数。

3.1.1 OAT方法

$$S_i = \frac{Y(X_i + \Delta X_i) - Y(X_i)}{Y(X_i)}, \quad (9)$$

式中: S_i 表示输入变量 X_i 的敏感度; Y 为输出结果(即碳足迹); ΔX_i 为输入变量 X_i 的变化量。

3.1.2 分析步骤

- 1)确定输入参数 选择对碳足迹影响较大的参数:电力消耗、原材料运输距离、原材料碳排放因子。
- 2)参数浮动 对每个参数进行 $\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 的浮动,计算碳足迹的变化。
- 3)计算敏感度 根据公式计算每个参数的敏感性系数 S_i ,识别出对碳足迹影响最大的参数。

3.2 全局敏感性分析

全局敏感性分析采用扩展傅里叶幅度敏感性检测(extended Fourier amplitude sensitivity test, e-FAST)方法。该方法通过频率域采样,可以高效处理高维度问题^[21-22],同时能够评估多个参数的相互作用及其对碳足迹的综合影响。

3.2.1 e-FAST方法

$$x_i(s) = G_i(\sin \omega_i s), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

式中: x_i 为输入参数; ω_i 为振荡频率; G_i 为搜索曲线函数。

3.2.2 分析步骤

- 1)参数采样 使用拉丁超立方抽样生成多个参数组合样本。
- 2)模型计算 将参数组合输入碳足迹模型,计算输出结果。
- 3)敏感性系数计算 通过傅里叶变换计算每个参数的一阶敏感性系数和总敏感性系数。

3.3 不确定性分析

采用蒙特卡洛模拟方法进行不确定性分析,步骤如下:

- 1)定义参数分布 假设关键参数(电力消耗、原材料运输距离、原材料碳排放因子)服从正态分布。
- 2)随机抽样 对关键参数(正态分布,变异系数 5%)进行5 000次随机抽样。
- 3)模型计算 将每个样本输入碳足迹模型,计算碳足迹。
- 4)统计分析 计算碳足迹的平均值、标准差、置信区间等统计特征^[23-24]。

4 结果与讨论

4.1 基于LCA的针刺土工布生产过程碳足迹分析

根据实地调研得到的数据,通过式(1)~(6)及各阶段的清单数据核算出各个阶段产生的碳排放量,得到生产单位产品针刺土工布的各阶段碳足迹,具体见表7,结果对比如图4所示。

4.1.1 原材料使用阶段

生产单位产品的针刺土工布在原材料使用阶段的碳排放量占比高达 92.3% ,是碳足迹的主要来源。这主要归因于PET的高碳排放因子($3.9 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$)以

表7 针刺土工布生产过程碳排放统计表

Tab.7 Carbon emission statistics table for the production process of needle-punched geotextiles

周期阶段	碳排放量/ kgCO_2
原材料使用	4 036.50
原材料运输	76.64
生产制造	219.99
辅助设备运行	41.48
总碳足迹	4 374.61

及生产过程中的高原料损耗率(3.5%)。

PET 的生产过程涉及原油开采、精对苯二甲酸(PTA)合成、聚合及纺丝等多个高能耗环节。其中,PTA 合成环节的碳排放占比尤为突出,这主要源于化石燃料(煤、天然气)高温裂解工艺的能源需求。

在保证产品质量的前提下,企业在实际生产中可适当选用更加节能环保的原材料,例如 PP 纤维。两种纤维在生产过程及碳排放因子方面的具体对比见表 8。从各评价指标来看,PP 相较于 PET 均表现出更优的环保性能。

表 8 PET 与 PP 对比分析

Tab. 8 Comparison and analysis of PET and PP

指标	PP	PET
原料来源	石油裂解丙烯单体	石油→对二甲苯+乙二醇(MEG)
单体合成步骤	丙烯聚合(1步反应)	PTA 酯化 + MEG 缩聚(2步反应)
纺丝工艺	熔融纺丝(180~250 °C)	熔融纺丝(260~290 °C)
溶剂使用	无需溶剂	需催化剂(铋系)及热煤油
自然降解性	可光氧降解(50 a)	难降解(>100 a)
碳排放因子	2.8 kgCO ₂ /kg(CLCD)	3.9 kgCO ₂ /kg(CLCD)

本研究选取的 PET 碳排放因子来源于 CLCD 数据库,该数值表征的是特定生产工艺条件下的平均水平。在实际生产场景中,不同厂商的 PET 制备技术路径存在显著差异,如再生原料掺混比例、能源供给结构等关键参数的波动,这些差异均可能导致碳排放因子产生明显离散性。鉴于原材料阶段在碳足迹构成中占据主导地位,此因子的选取对总碳足迹核算结果的精度具有直接影响。本文基于国内行业平均水平进行分析,核心价值在于构建可推广的核算框架与典型案例参考,后续研究可结合具体生产场景动态优化排放因子选取,或通过向上游追溯原材料供应商的全生命周期碳足迹数据,进一步校准参数以获取更为精准的 PET 碳排放因子,从而提升核算结果的场景适配性与可靠性。

4.1.2 原材料运输阶段

运输 1 035 kg 原材料的碳排放量为 76.64 kgCO₂, 占总碳足迹的 1.8%。虽然占比较低,但通过优化运输方式,仍可进一步降低碳排放量。根据实地调研数据可知,当前供应商运输距离为 822 km,通过敏感性分析发现,运输距离的敏感性系数为 0.097 9,表明运输距离的变化对碳足迹有一定影响。若重新选择原材料供应商,将运输距离压缩至 500 km 内,经式(2)及表 3 中的调研数据推算可得,运输碳排放量可降低 39%。

4.1.3 生产制造阶段

生产制造阶段的碳排放量占产品总碳足迹的 5.0%。根据实地调研数据计算可知,针刺工序的能耗占生产制造阶段总能耗的 33%,是整个生产流程中节电潜力最大的核心环节。通过敏感性分析发现,针刺机运行功率、针刺密度及针刺频率等关键参数对工序能耗的影响显著,其敏感性系数均高于其他生产环节,表明该工序的能耗优化空间较大。若采用高效节能型针刺设备替代传统设备,并将针刺密度从当前工艺参数优化至合理区间,针刺工序碳排放量可降低 28%~32%,进而推动生产制造阶段碳排放总量下降 1.4%~1.6%。

4.1.4 辅助设备运行阶段

辅助设备运行的碳排放量占整体碳足迹的 0.9%,主要包括除尘装置和照明系统的能耗。虽然占比较低,但通过优化设备运行效率,或者更换更加节能的设备,仍可进一步降低碳排放量。

4.2 基于 OAT 的针刺土工布生产过程局部敏感性分析

基于 OAT 计算方法,借助 MATLAB 软件编程完成数值计算,以碳足迹关键影响参数(运输距离、电力消耗、原材料碳排放因子)为横坐标、敏感性系数为纵坐标,所得敏感性分析可视化结果如图 5 所示。

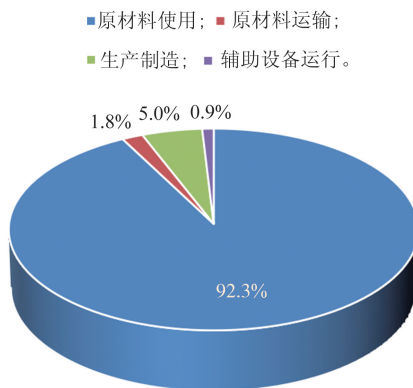


图 4 针刺土工布生产过程生命周期各阶段碳排放统计情况

Fig. 4 Carbon emission statistics for each stage of the production process of needle-punched geotextiles

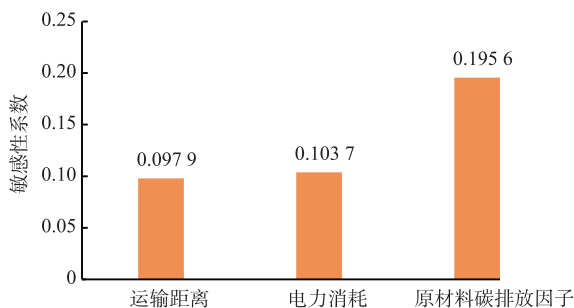


图 5 局部敏感性分析结果

Fig. 5 Results of local sensitivity analysis

原材料碳排放因子的敏感性系数为 0.195 6,其对碳足迹的影响最为显著,是针刺土工布生产过程中的碳足迹的主要驱动因素, $\pm 10\%$ 的波动会导致碳足迹变化 $\pm 8\%$ 。电力消耗的敏感性系数为 0.103 7,运输距离的敏感性系数为 0.097 9,这两个参数对于针刺土工布生产过程整体碳足迹的影响较小,结果接近。

4.3 基于 e-FAST 的针刺土工布生产过程全局敏感性分析

基于 e-FAST 方法,通过 MATLAB 平台编程实现数值运算,以前述关键参数为横坐标、敏感性系数(含一阶敏感性系数与总敏感性系数)为纵坐标,所得的敏感性分析可视化结果如图 6 所示。

原材料碳排放因子一阶敏感性系数为 0.635 2,总敏感性系数为 0.801 7,表明原材料的选择是影响碳足迹的最主要因素。但该参数交互作用较弱,总敏感性系数仅比一阶高 0.166 5,说明其影响主要源于自身。电力消耗一阶敏感性系数为 0.378 5,总敏感性系数为 0.562 1,表明该参数影响中等。但其交互作用显著,总敏感性系数比一阶高 0.183 6,可能通过与设备效率等其他因素的交互作用进一步增加其对碳足迹的影响。设备效率低会导致电力浪费,如机械摩擦、热能损耗等,会放大电力消耗的影响;运输距离一阶敏感性系数为 0.142 3,总敏感性系数为 0.218 9,该参数独立影响最小,并且交互作用有限,总敏感性系数仅比一阶高 0.076 6,对整体结果贡献较低。

4.4 不确定性分析结果

基于蒙特卡洛模拟流程,通过 MATLAB 平台编程实现模拟运算,所得结果如图 7 所示。

通过蒙特卡洛模拟,5 000 次随机抽样,服从正态分布,变异系数为 5%,得到碳足迹统计特征:均值为 4 244.88 kgCO₂,标准差为 203.76 kgCO₂,95% 置信区间为[3 846.05, 4 644.95] kgCO₂,这意味着在 95%的概率下,碳足迹的真实值会落在这个范围内,表明模型结果具有较高的可靠性。

5 结 语

本文基于 LCA 方法构建了针刺土工布生产过程的碳足迹模型,并通过局部敏感性分析和全局敏感性分析,识别出了影响碳足迹的关键因素。研究结果表明,针刺土工布生产过程中的碳排放主要受原材料选择、电力消耗和运输距离的影响。通过蒙特卡洛模拟,进一步评估了碳足迹模型的不确定性,表明了模型结果的可靠性。基于以上分析结果,提出以下节能减排优化路径。

1)原材料替代 目前生产 1 t 土工布消耗 1 035 kg 原生 PET,该环节碳排放量占比超 90%,是核心减排点。原生 PET 的碳排放因子为 3.9 kgCO₂/kg(CLCD v3.0 数据),显著高于其他原材料,如 PP 纤维(2.8 kgCO₂/kg)。因此,可以考虑替代原材料种类,例如 PP 或者再生 PET。参考行业数据,再生 PET 的碳排放因子可降至 1.5~2.5 kgCO₂/kg(约为原生 PET 的 38%~64%)。若替代比例达 30%,则原材料环节碳排放量可降低约 13.8%~18.6%。

2)生产设备能效提升 针刺工序的能耗占生产制造阶段的 33%,是节电潜力最大的环节。对核心生产设备进行能效升级,采用变频调速、智能控制系统等技术降低单位产品能耗。优化针刺工艺参数,在保证产品性能的前提下减少无效能耗。同时,针对辅助设备开展节能改造,通过变频风机、LED 照明替代等措施降低辅助能耗占比。

3)优化运输路径与模式 建立区域原材料集散中心,整合供应商资源以缩短运输距离。调研周边 300 km 内的 PET 供应商,若将运输距离从 822 km 缩短至 300 km,运输每吨原材料可减少燃油消耗 17.22 L,对应减排 46.91 kgCO₂,降幅达 61.2%。此外,还可以推广“公路+铁路”多式联运模式,在长距离运输中

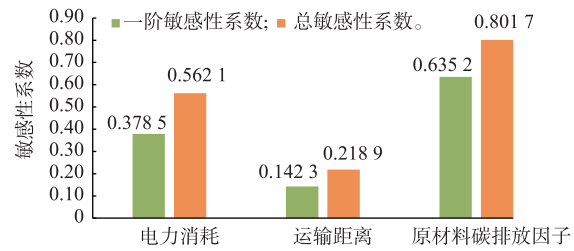


图 6 全局敏感性分析结果

Fig. 6 Results of global sensitivity analysis

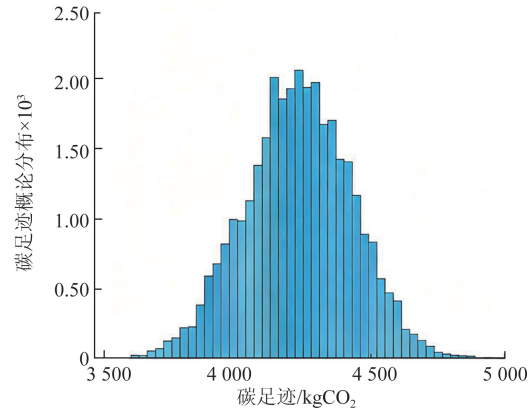


图 7 不确定性分析结果

Fig. 7 Uncertainty analysis results

提高铁路运输占比,减少公路运输碳排放。

4)推广低碳运输工具 鼓励采用新能源车辆(电动货车、氢能卡车等)替代传统燃油车承担短途原材料运输,结合物流园区充电桩、加氢站等基础设施建设,提升低碳运输工具的实用性与覆盖率。

上述建议通过原材料、生产、运输全环节协同发力,可系统性降低针刺土工布生产过程的碳排放强度,为行业绿色低碳转型提供实践路径。研究结果为针刺土工布生产过程的碳排放管理提供了参考,有助于推动行业向绿色低碳方向发展。

本文虽在针刺土工布生产流程碳足迹优化方面取得了一些成果,但受研究范围和数据可得性限制,仍有进一步深化的空间:第一,可拓展生命周期评价的范围,当前研究主要集中在生产过程阶段,未来可延伸至产品运输、工程应用及废弃处置的全生命周期,分析针刺土工布在路基加固、水利防渗等场景中的使用年限与碳减排的关系,搭建更全面的环境影响评价体系;第二,可构建多目标优化模型,除主要关注碳足迹与生产效率,未来可加入产品核心性能指标(如拉伸强度、渗透系数),通过遗传算法等找到最优工艺参数组合,在保证产品满足工程需求的前提下实现更深层次的减排。

参考文献/References:

- [1] 毛显强,郭枝,高玉冰. 碳达峰、碳中和与经济、社会、生态环境的协同研究[J]. 环境保护,2021,49(23):30-35.
MAO Xianqiang, GUO Zhi, GAO Yubing. The synergy between carbon peak, carbon neutrality and economy, society and ecological environment[J]. Environmental Protection, 2021, 49(23): 30-35.
- [2] 王睿哲,刘丹,张书勤. 欧盟绿色可持续政策法规对我国毛纺织行业影响的思考[J]. 中国纺织,2025(sup1):132-134.
WANG Ruizhe, LIU Dan, ZHANG Shuqin. Reflections on the impact of EU green and sustainable policies and regulations on China's wool textile industry[J]. China Textile, 2025(sup1): 132-134.
- [3] 刘慧慧,唐孔科,高钱,等. 纺织领域温室气体和碳足迹标准综述分析[J]. 产业用纺织品,2024,42(7):48-52.
LIU Huihui, TANG Kongke, GAO Qian, et al. Review and analysis of greenhouse gas and carbon footprint standards in textile field[J]. Technical Textiles, 2024, 42(7): 48-52.
- [4] 陈丽军. PET 纺织针刺土工布应用及 PP 土工布的性能分析[J]. 聚酯工业,2024,37(4):73-75.
CHEN Lijun. Application of PET textile needle punched geotextile and performance analysis of PP geotextile[J]. Polyester Industry, 2024, 37(4): 73-75.
- [5] 吕大鹏,张春苗,高娜. 高强涤纶纺黏针刺土工布生产工艺[J]. 合成纤维,2018,47(11):38-40.
LYU Dapeng, ZHANG Chunmiao, GAO Na. Production technology of high strength polyester spunbonded needle-punched geotextile[J]. Synthetic Fiber in China, 2018, 47(11): 38-40.
- [6] KUMAR N S, SHABARIDHARAN K, PERUMALRAJ R, et al. Study on cross-directional tensile properties of bamboo-/polypropylene-blended needle-punched non-woven fabrics[J]. Journal of Industrial Textiles, 2018, 47(6): 1342-1356.
- [7] KOLA I, KOLGJINI B, MALKAL L, et al. Pathways toward zero-emission textile industry by 2050: A case study of Albania[J]. Energy Reports, 2025, 13: 4034-4053.
- [8] 储昭权,戴佳洋,伍冬平,等. 基于 LCA 的棉纺织品碳足迹核算与评价研究进展[J]. 现代丝绸科学与技术,2023,38(3):38-43.
CHU Zhaoquan, DAI Jiayang, WU Dongping, et al. Research progress on carbon footprint accounting and evaluation of cotton textiles based on LCA[J]. Modern Silk Science & Technology, 2023, 38(3): 38-43.
- [9] 杨丽萍. 纺织服装行业碳核算方法、现状及展望[J]. 环境科学与管理,2022,47(10):20-24.
YANG Liping. Carbon emission accounting method, current situation and prospects of textiles and garment sector[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(10): 20-24.
- [10] 欧阳顺怡. 纺织印染企业碳排放核算及降碳措施[J]. 节能与环保,2023(9):43-46.
OUYANG Shunyi. Carbon emission accounting and carbon reduction measures for textile printing and dyeing enterprises[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2023(9): 43-46.
- [11] 赵俊豪,封严,李洪振,等. 聚丙烯非织造土工布研究进展及应用[J]. 化工新型材料,2024,52(10):248-252.
ZHAO Junhao, FENG Yan, LI Hongzhen, et al. Research progress and application of polypropylene nonwoven geotextile[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(10): 248-252.
- [12] KOERNER G R, KOERNER R M. Puncture resistance of polyester(PET) and polypropylene(PP) needle-punched nonwoven geotextiles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(3): 360-362.
- [13] LI Keyi, TANG Xiaowu, FEI Minliang, et al. Numerical investigation of the tensile behaviors of needle-punched nonwoven geotextiles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52(1): 110-120.
- [14] TANG L, FRANCEY W, ZHENG J, et al. Filtration behaviour of staple fibre geotextiles under unequal biaxial tensile strains[J]. Geosynthetics International, 2024, 31(5): 652-669.
- [15] 李华,李卫东,李淑霞,等. 棉织物“从摇篮到大门”碳足迹评价研究[J]. 纺织导报,2025(2):15-18.

- LI Hua, LI Weidong, LI Shuxia, et al. Cradle-to-gate carbon footprint evaluation of cotton fabrics[J]. *China Textile Leader*, 2025(2): 15-18.
- [16] 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 Xiaocong, DU Shuai, DENG Chenning, et al. Life cycle carbon emission accounting and emission reduction potential assessment of steel industry[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6630-6642.
- [17] 王彩虹, 林焰峰, 朱丽平, 等. 口罩产品生产碳足迹核算与分析[J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(9): 32-37.
WANG Caihong, LIN Yanfeng, ZHU Liping, et al. Carbon footprint accounting and analysis of masks production[J]. *Technical Textiles*, 2024, 42(9): 32-37.
- [18] 辛春林, 李岩, 曹已晴, 等. 基于 CiteSpace 的可视化分析我国碳足迹研究现状、热点与趋势[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(1): 122-132.
XIN Chunlin, LI Yan, CAO Yiqing, et al. The current status, hotspots, and trends of carbon footprints research in China: A visual analysis based on CiteSpace[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition)*, 2025, 52(1): 122-132.
- [19] BAAQEL H A, BERNARDI A, HALLETT J P, et al. Global sensitivity analysis in life-cycle assessment of earlystage technology using detailed process simulation: Application to dialkylimidazolium ionic liquid production[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(18): 7157-7169.
- [20] 康得军, 邱福杰, 温儒杰, 等. 基于 SWMM 的 LID 参数局部与全局敏感性分析[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(17): 131-138.
KANG Dejun, QIU Fujie, WEN Rujie, et al. Analysis on local and global sensitivity of LID parameters based on SWMM[J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(17): 131-138.
- [21] 徐子翔, 董莉霞, 李广, 等. 基于 EFAST 方法的 APSIM 模型 N_2O 排放的全局敏感性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(6): 244-251.
XU Zixiang, DONG Lixia, LI Guang, et al. Global sensitivity analysis of N_2O emission of APSIM model based on EFAST method[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(6): 244-251.
- [22] 张敬雷, 王伟, 李彤, 等. 基于 EFAST 法的公路梁桥全局敏感性分析[J]. *土木工程与管理学报*, 2020, 37(5): 51-56.
ZHANG Jinglei, WANG Wei, LI Tong, et al. Global sensitivity analysis of highway beam bridge based on EFAST method[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020, 37(5): 51-56.
- [23] 刘江凡, 刘晓妹, 李铮, 等. 基于混合蒙特卡洛/多项式混沌展开方法的多参数随机等离子体不确定性分析[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(1): 39-45.
LIU Jiangfan, LIU Xiaomei, LI Zheng, et al. Multi-parametric stochastic plasma uncertainty quantification with a hybrid Monte-Carlo/polynomial chaos expansion method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2024, 39(1): 39-45.
- [24] 高俊莲, 徐向阳, 郑凤琴, 等. 基于全生命周期的煤炭碳排放清单计算与不确定性分析[J]. *中国煤炭*, 2017, 43(6): 22-26.
GAO Junlian, XU Xiangyang, ZHENG Fengqin, et al. Coal carbon emission inventory calculation and uncertainties analysis based on lifecycle analysis[J]. *China Coal*, 2017, 43(6): 22-26.