

基于数智化生产线的木质建材生产碳排放评估

李佩娴^{1,2}, 宋广翰¹, 杨晓露¹, 宋向南³, 卢昱杰^{1,2*} (1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 广州大学管理学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为研究数智化生产线的木质建材碳排放特征, 为减碳策略提供底层数据支撑, 对某数智化工厂生产的地板、木门和门套进行了基于生命周期评价的碳排放核算, 其单位质量碳足迹分别为 1.21, 1.26 和 0.47 kg CO₂e/kg, 地板和木门的碳排放强度均高于同类产品。材料和制造过程是木质建材产品的主要碳排放来源, 分别占产品总碳排的 54.74%~77.47% 和 18.57%~38.94%; 运输阶段和废气处理阶段碳排放之和均低于碳排放总量的 9%。基于蒙特卡洛模拟的不确定性分析表明本研究结果具有较高精准度。数智化工厂未来可考虑从甄选低碳原材料、优化产品设计、提升设备能源效率、扩大清洁能源比例等方面进一步提升。

关键词: 木质建材; 生命周期评价; 碳排放; 低碳策略; 智能制造

中图分类号: X820.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)08-3922-09

Carbon emissions assessment of wooden building materials manufactured from a digital and intelligent production line. LI Pei-xian^{1,2}, SONG Guang-han¹, YANG Xiao-lu¹, SONG Xiang-nan³, LU Yu-jie^{1,2*} (1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Management, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China). *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3922~3930

Abstract: In order to understand carbon emissions from wooden building materials produced in digital and intelligent factories and to provide ground references and benchmarks for carbon reduction strategies, a life-cycle assessment (LCA) was conducted in this study to quantify the carbon footprints of main wooden building materials. The results show that the carbon footprints (per unit mass: kg CO₂e/kg) for a wood floor tile, a wood door, and a wood door frame are 1.21, 1.26, and 0.47, respectively. The carbon footprints of the floor tile and the door are greater than their domestic counterparts in the literature. The raw materials and production processes are the main sources of carbon emissions for wooden building materials, accounting for 54.74%~77.47% and 18.57%~38.94% of the total carbon emissions, respectively, while the carbon emissions during transportation and waste gas treatment process account for less than 9% of the total carbon emissions. The Monte Carlo simulations show a relatively low uncertainty of the calculated carbon emissions in this study. Digital and intelligent factories could potentially reduce carbon emissions in the future by procuring low-carbon raw materials, optimizing the product designs, improving the energy efficiency of equipment, and using clean energy like solar and wind.

Key words: wooden building materials; life cycle assessment; carbon emissions; low-carbon strategy; intelligent manufacturing

建材是产生碳排放的重点领域之一。数据显示, 2018 年全国建材碳排放比重达到了全国碳排放总量的 28.3%^[1]。推动建材生产过程“减碳、控碳”是实现国家尺度“双碳”目标的主要途径之一。木质建材加工需求旺盛, 生产模式也逐渐从手工、半手工模式转向数智化, 即数字化与智能化相结合。本文所选的案例企业是全国率先推出木质家具产品智能制造的企业之一, 在行业内部具有很强的代表性, 该类数字化智能制造工厂模式可能革新整个行业的发展。但不可忽视的是, 智能制造带来标准化和高效性等利好的同时, 也将消耗更多的动力能源, 特别是人类追求高质量生活水平所需的高奢产品定位导致

生产工艺流程复杂化和生产材料多样化, 有可能导致产品生产阶段碳排放过高。在上述背景下, 前瞻性的评估产品智能制造过程的碳足迹并针对性的提出减排建议, 不仅对案例企业本身具有积极意义, 也将为智能化变革下的木质建材加工行业低碳发展提供一定程度的信息支撑。

生命周期评价(LCA)广泛应用于包括木质建材的碳排放特征分析。前人已重点关注木质建材生

收稿日期: 2022-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108090, 52078374, 71904032); 上海市浦江人才计划(2020PJD074)

* 责任作者, 教授, lu6@tongji.edu.cn

产对生态环境的影响,并提出了针对性的减碳策略。例如,研究发现原材料供应及产品分销阶段对产品温室气体排放有较大影响,可通过改变运输模式、减少闲置运输能力等提高绿色供应链管理^[2-4]。此外,木质建材碳排放与生产成本等因素相关,文献通过 LCA 法对不同经济、环境影响因素建模,分析了木质产品的价值链^[5],且将其生命周期各阶段的碳足迹分开估算,提出了相应减排措施^[6]。

前人多从国家尺度或者产品尺度研究木质建材碳排放。王珊珊等^[7]通过国家间行业对比分析了中国造板行业的节能减排现状,评估木材替代同类型建材达到的温室气体减排效果^[8]。国家尺度的数据主要来源于国家、地方政府公布的公共数据库资源及相关文献,且多存在均衡性与同质性假设,计算结果具有较高的不确定性。产品尺度的木质建材碳排放研究的方法主要包括碳排因子法和实测法。相关研究使用实测法分析多功能木质家具的碳足迹^[9],核算木质床头柜在主要生产阶段的碳足迹^[10],并对强化木地板的碳足迹核算方法和步骤进行了探讨^[11]。不过上述方法受制于测量设备和收集技术等外界因素,无法保证测量数据的精度且成本相对较高。碳排放因子法是 IPCC 提出的一种自下而上的碳排放估算方法,也是目前广泛应用的方法。其基本思路是从产品或服务的具体生产过程出发,针对每一种排放源收集其活动数据与排放因子,以活动数据和排放因子的乘积作为该项目碳排放量的估算值。相比之下,碳排放因子法研究产品尺度的碳排放基于大量详细的过程物料清单数据,具有收集成本低

廉、数据类型清晰等优势。

数据清单的不确定性严重影响 LCA 研究结果的可信度。为保证 LCA 结果的准确度,定量评估并控制原始数据质量显得尤为重要^[12]。已有学者^[13]提出建立数据质量指标法与蒙特卡罗模拟相结合的数据不确定度分析方法,但其并没有通过相应的原始数据对该方法进行对比验证。不确定性分析方法包括泰勒级数展开、Zadeh 模糊集与逻辑理论和贝叶斯模型平均、蒙特卡罗模拟法等^[14]。泰勒级数展开多用于条件复杂的不确定性分析;模糊算法的模型相对简单、单调,计算次数较少,但结果准确度不够;而蒙特卡罗模拟法通过对每一项不确定性来源进行分布假设,利用计算机进行多次计算,从而获得整体碳排放不确定性的统计特征,更适合产品碳足迹评价。使用蒙特卡罗模拟计算不确定性广泛应用于多个领域的碳足迹分析,如某塑料软包装印刷企业的印刷前阶段碳足迹评价^[11]、乳制品“从摇篮到零售”的生命周期评价^[15]以及生物质燃料乙醇的经济、能源和环境生命周期评估^[16]等。

本研究通过核算数智化生产线的木质建材从摇篮到大门的碳排放量,分析 3 种典型木质产品的分阶段碳排放特征,挖掘各个阶段碳减排潜力,使数智化企业鉴定并优先处理最具温室气体减量潜力的环节,也同时为家具生产行业数智化变革发展提供低碳信息支撑。

1 研究方法

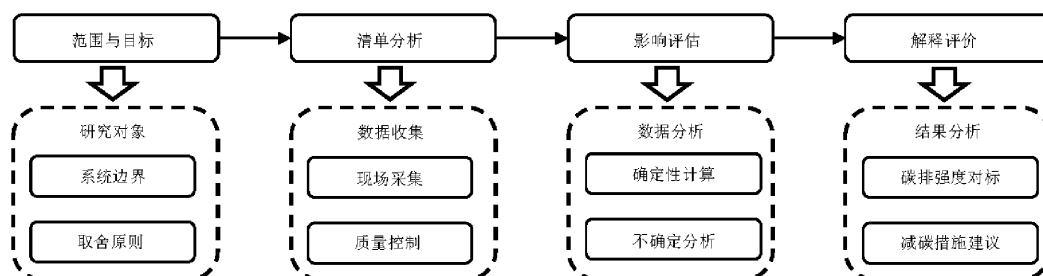


图 1 基于数智化生产线的木质建材生命周期评价框架

Fig.1 Life-cycle assessment for wooden building materials produced in digital and intelligent production lines

本研究应用 LCA 法评估了基于数智化生产线的地板、木门和门套 3 种典型木质产品从摇篮到大门的

碳排放。产品生产过程的资源、能源消耗量和废弃物产生量都来源于案例企业统计的物料投入清单。对于油

漆等物料挥发导致的有机废气,本研究基于废气产量和废气特征统计数据,提出了基于碳元素平衡逻辑的碳排放计算方法:假设有机废气中的碳元素全部通过天然气高温热解为二氧化碳.考虑到产品各阶段不同数据的来源特征及处理方式,研究通过蒙特卡洛模拟

法对清单数据及计算结果的不确定性进行分析,保证结果的可靠性和准确性.研究框架如图 1 所示.

1.1 范围与目标

以 3 类单件产品作为功能单元,即 1 片地板、1 扇木门及 1 套门套,相关产品的规格见表 1.

表 1 功能单位——单件产品规格
Table 1 Functional unit—specifications of the studied wooden building products

指标	木地板	木门	木门套
单件规格	125mm×930mm×15mm	900mm×2600mm×50mm	350mm×2400mm×55mm×2+350mm×900mm×50mm
单件质量(kg)	1.27	122.33	33.18

本研究的系统边界为摇篮到大门(C2G),包括材料、运输、制造和废气处理过程(表 2).具体而言,材料主要包括胶合板、桉木板等主材,油漆、胶黏剂等辅材以及纸皮、珍珠棉、封箱塑料胶带等包装材料.运输碳排放指原材料从上游商家运输到工厂的过程中燃油产生的碳排放(不包含上游商家原料采购和厂内运输).制造环节是指地板、木门和门套 3 种典型产品通过机械生产加工过程,主要生

产程序包括材料切割、定厚砂光和喷涂等.制造过程碳排放主要来源于机械用电,不包括人工活动产生的碳排放.废气处理指喷涂过程中油漆产生的挥发性有机物经专业装置采集后,在天然气焚烧产生的高温下,热解转化为二氧化碳和水蒸气排放的过程.根据工厂提供信息,挥发性有机物热解效率为 90%.基于保护企业知识产权的考虑,图 2 系统边界图中的生产程序为不完全过程.

表 2 本研究系统边界
Table 2 System boundary of this study

产品生产阶段				施工阶段		使用阶段			生命结束阶段			
材料	运输	制造	废气处理	成品运输	现场安装	使用	维修	替换	拆解	运输	废物处理	回收利用
A1	A2	A3	A4	B1	B2	C1	C2	C3	D1	D2	D3	D4
√	√	√	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×

注:√表示本研究包含该阶段,×表示本研究不包含该阶段.

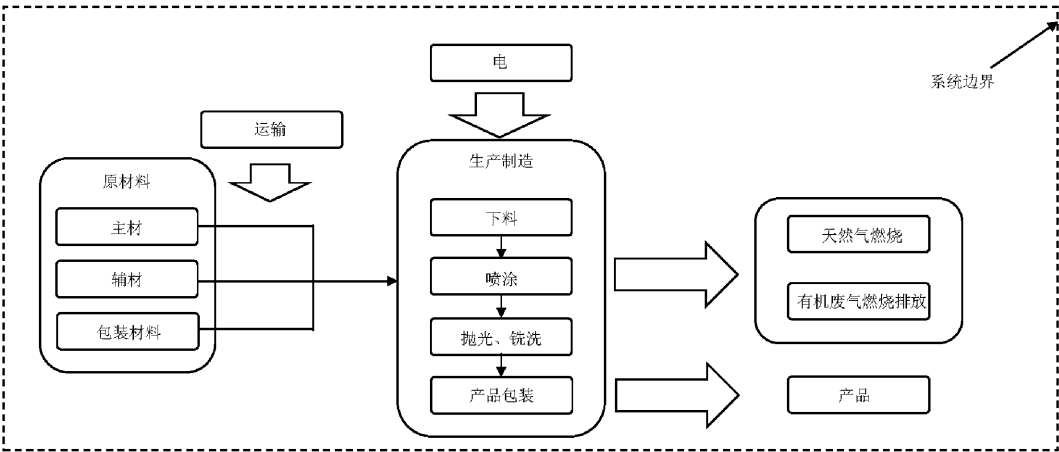


图 2 系统边界内过程
Fig.2 Processes included in the system boundary

1.2 数据清单收集

系统边界内的数据取舍原则如下:1)普通物料重量<1%产品重量时,以及含稀贵或高纯成分的物料重量<0.1%产品重量时,可忽略该物料的上游生产数据;总共忽略的物料重量不超过 5%;2)厂房、生活设施用能可以忽略。

本研究的数据主要分为现场数据和背景数据。现场数据中,产品生产过程的能源消耗、资源消耗、废弃物相关数据均来源于企业实测统计。生产过程的数据分配根据以下原则:1)材料、运输、有机废气采集都基于产品质量进行数据分配;2)能源消耗基于实测功率和实测各工序机械运行时间进行分配;3)有机废气和天然气消耗系全厂区公用的废气处理系统,本研究根据废气质量进行分配,即产生废气质量越大的产品,其分配的天然气消耗量越大。具体而言,原材料消耗量由产品尺寸×损耗系数得出。运输距离为企业估算,运输工具类型为实际使用。制造阶段机械设备的电力消耗为每道生产工序实测功率×运转时间。有机废气排放量由废气采集口实测获得。用于废气处理的天然气消耗量来自厂区废气处理终端设备的实测数据,以同比例法推算单位质量有机废气消耗的天然气量,即处理 1g 有机废气需消耗天然气量 0.033m³。具体数据清单见表 3~6。

表 3 单件产品生产所需原材料(kg)

Table 3 Inventory of raw materials for each piece of product(kg)

生产阶段	原材料	1 块地板	1 扇木门	1 副门套
加工	胶合板	1.58	17.73	4.32
	防火门芯板	—	68.44	—
	密度板	—	58.58	—
	橡胶木条	—	2.73	—
	桉木拼板	—	—	17.41
	防火基板	—	—	8.01
	木皮	0.04	0.07	0.37
	油漆	0.10	1.89	0.33
饰面	胶黏剂	0.03	1.35	0.50
	坑纸	—	1.62	0.62
包装	瓦楞纸箱	0.02	—	—
	珍珠棉	9.39×10 ⁻⁴	4.39	1.68
	塑料胶带	4.50×10 ⁻⁶	0.9	0.40

注:“—”表示该产品不使用该种原材料。

背景数据主要通过查阅碳智汇、Ecoinvent、USLCI、USA Input Output、GaBi、Ecoinvent 等数

据库和文献资料,并根据地理就近原则、时间就近原则和相似度原则取用碳因子数据,即优先选择广东数据、中国国内数据,采集时间最接近 2021 年的数据,以及因子来源与所分析产品最相像的数据,最终取用的碳排因子清单见表 7。

表 4 原材料运输清单

Table 4 Transportation data of raw materials

原材料	运输方式			运输距离(km)
	运输工具	运输燃料	吨位(t)	
胶合板	汽车	柴油	18.0	200
防火门芯板	汽车	柴油	18.0	200
密度板	汽车	柴油	18.0	200
防火基材板	汽车	柴油	18.0	200
桉木拼板	汽车	柴油	18.0	200
橡胶木条	汽车	柴油	18.0	200
木皮	汽车	柴油	4.5	200
油漆	汽车	汽油	6.0	170
胶水	汽车	汽油	3.0	200
坑纸	汽车	柴油	4.5	200
珍珠棉	汽车	柴油	4.5	200
塑料胶带	汽车	柴油	4.5	200

注:“吨位”指汽车能装载的最大吨数。

表 5 单件产品生产能源消耗清单(kW·h)

Table 5 Energy consumption during the production for each piece of product(kW·h)

生产程序	1 块地板	1 扇木门	1 副门套
木材切料加工	—	14.35	1.07
木材组合加工	0.45	6.68	9.02
底部定厚	0.01	3.28	0.85
封箱	6.43×10 ⁻⁴	—	—
开料	0.04	—	—
喷涂	0.05	17.49	1.49
砂光	0.03	—	—
双端铣	0.01	—	—
养生	—	16.16	—
合计	0.59	57.96	12.44

注:“—”表示该产品生产过程不包含该项生产程序。

表 6 单件产品有机废气排放量及所需天然气量

Table 6 Organic waste gas emissions and the natural gas required for each piece of product

	项目	地板	木门	门套
有机废气来源	LED UV 底漆(g)	0.95	18.99	0.80
	双组份水性修色漆(g)	0.23	2.09	—
	水性 UV 面漆(g)	—	4.18	—
废气处理所需天然气(m ³)		0.04	0.83	0.03

注:“—”表示该产品未使用该种油漆。

表 7 能源、原材料、运输工具碳排放因子
Table 7 Carbon factors for energy, raw materials and transportation

类别	对象	碳排放因子	国家	数据来源
能源	电力	0.4948 [kgCO ₂ e/(kW·h)]	中国	国家发展和改革委员会(2012)-通用 ^[17]
	天然气	2.162189 (kgCO ₂ e/m ³)	中国	国家发展和改革委员会(2015)-工业其他行业 ^[17]
材料	胶合板	0.65 (kgCO ₂ e/kg)	英国	Bath University(2018)-通用范畴三 ^[17]
	木皮	0.049 (kgCO ₂ e/kg)	英国	英国环境、食品级农村事务部(DEFRA)(2016)-通用范畴三 ^[17]
	橡胶木条	0.46 (kgCO ₂ e/kg)	英国	Bath University(2018)-通用范畴三 ^[17]
	密度板	1.225 (kgCO ₂ e/kg)	中国	[18]
	桉木拼版	0.019125 (kgCO ₂ e/kg)	中国	[19]
	防火门芯板(珍珠岩)	0.437 (kgCO ₂ e/kg)	欧洲	[20]
	油漆	0.98(kgCO ₂ e/USD)	美国	[21]
		=0.42 (kgCO ₂ e/kg)		
	胶水	0.416 (kgCO ₂ e/USD)	美国	[21]
		= 0.298 (kgCO ₂ e/kg)		
	纸箱	1.137 (kgCO ₂ e/kg)	中国	[18]
	珍珠棉	0.035 (kgCO ₂ e/kg)	美国	[22]
运输工具	坑纸	0.8384954 (kgCO ₂ e/kg)	英国	英国环境、食品级农村事务部(DEFRA)(2017)-通用范畴三 ^[17]
	封口胶带	2.765 (kgCO ₂ e/kg)	中国	中国邮政局(2014)-快递行业 ^[17]
	轻型汽油货车运输(载重 3t)	0.334 [kgCO ₂ e/(t·km)]	中国	建筑碳减排计算标准 GBT-51366(2019)-建筑材料(运输) ^[17]
	中型汽油货车运输(载重 6t)	0.115 [kgCO ₂ e/(t·km)]	中国	建筑碳减排计算标准 GBT-51366(2019)-建筑材料(运输) ^[17]
	中型柴油货车运输(载重 4.5t)	0.2325 [kgCO ₂ e/(t·km)]	中国	建筑碳减排计算标准 GBT-51366(2019)-建筑材料(运输) ^[17]
	重型柴油货车运输(载重 18t)	0.129 [kgCO ₂ e/(t·km)]	中国	建筑碳减排计算标准 GBT-51366(2019)-建筑材料(运输) ^[17]

1.3 确定性碳排放计算方法

按照生产过程针对材料、运输、生产及废气处理 4 个阶段进行碳足迹计算,各阶段计算公式如下:

(1)材料碳排放计算方法:

$$C_{M,j} = \sum EF_{m,i} \times m_{i,j}$$
 (1)

式中: $C_{M,j}$ 为木质产品 j (包括地板、木门和门套,下同)的材料隐含碳排放量,kgCO₂e; $EF_{m,i}$ 为第 i 种原材料或包装材料的 CO₂ 排放因子, kgCO₂e/kg; $m_{i,j}$ 为生产单件第 j 类产品中材料 i 的消耗量,kg.

(2)运输碳排放计算方法:

$$C_{T,j} = \sum EF_{T,i} \times L_i \times m_{i,j}$$
 (2)

式中: $C_{T,j}$ 为木质产品 j 所需材料运输阶段 CO₂ 排放量,kgCO₂e; $EF_{T,i}$ 为运输第 i 种材料所用交通工具的 CO₂ 排放因子,kgCO₂e/(kg·km); L_i 为材料 i 的运输距离,km; $m_{i,j}$ 为生产单件第 j 类产品中材料 i 的消耗量,kg.

(3)制造碳排放计算方法:产品在制造阶段的碳排放主要来自于机械设备所用电力能源,见式 3.

$$C_{c,j} = \sum EF_{E,j} \times E_{j,l}$$
 (3)

式中: $C_{c,j}$ 为木质产品 j 制造阶段 CO₂ 排放量, kgCO₂e; $EF_{E,j}$ 为生产产品 j 所消耗的能源 E 的 CO₂ 排放因子,kgCO₂e/(kW·h); $E_{j,l}$ 为生产产品 j 的 l 环节的能源 E 消耗量,kW·h.

(4)废气处理碳排放计算方法:由于木质品在生产过程中需要大量喷涂,油漆产生的挥发性有机物废气需要经过专业设备进行采集与处理.废气处理阶段产生的二氧化碳主要来源于两部分:一是挥发性有机物本身热解转变的 CO₂,二是燃烧天然气的间接碳排放.第一部分碳排放计算方法如下:根据废气采集口实测数据,将挥发性有机物均摊到单件产品,获取单件产品生产过程挥发的有机物质量 $m_{wi,j}$;根据实测,90%有机废气被热解,本文假设涉及碳元素的化学物质都将转化为 CO₂,可基于碳原子平衡推导有机废气转变的 CO₂ 量.第二部分碳排放计算方法采用碳排放因子法,将天然气消耗量与天然气碳排放因子相乘获得天然气的间接碳排放.废气处理阶段的总碳排放计算公式如下:

$$C_{G,j} = \sum 0.9 \times 44 X_{wi} \frac{m_{wi,j}}{MF_{wi}} + S_{E,wi} \times EF_{E,j}$$
 (4)

式中: $C_{G,j}$ 为产品 j 废气处理阶段挥发性有机物转变为的 CO₂ 排放量,kgCO₂e; X_{wi} 为有机废气 wi 的分子式中碳原子个数,无量纲; $m_{wi,j}$ 为产品 j 生产过程中挥发的有机废气量 kg; MF_{wi} 为有机废气 wi 的分子量(掺杂多种物质时依据成分分析加权获得平均分子量),无量纲; $S_{E,wi}$ 为处理有机废气 wi 所需天然气消耗量,m³; $EF_{E,wi}$ 为处理有机废气 wi 所需天然气的碳

排放因子,kgCO₂e/m³.

1.4 不确定性识别与分析

采用蒙特卡罗模拟进行不确定性识别与分析.在蒙特卡罗模拟中,为每个不确定性分析参数设置概率密度函数(正态分布、均匀分布等),根据概率密度函数产生随机样本,并通过既定模式计算产品碳足迹,重复多次计算即可生成产品碳足迹的密度分布函数,并计算均值、标准差、95%置信区间等,得出产品的不确定度浮动范围.蒙特卡罗模拟的精度随着重复次数增加而提高.

2 结果与分析

2.1 确定性碳排放计算结果

如表 8 所示,一块地板的碳足迹为 1.54kgCO₂e,其中材料和制造过程的碳排放相对较高,分别占碳排放总量的 72.17%和 18.97%;其他环节占比相对较低,运输和废气处理的碳排放占比分别仅为 3.15%和 5.72%.一扇木门的 C2G 碳排放为 154.47kgCO₂e,其中材料隐含的碳排放占比高达 77.47%,制造占比 18.57%,运输和有机废气处理阶段碳排放占比仅为 2.76%和 1.21%.一副门套的产品碳足迹为 15.81kgCO₂e,其中材料与制造过程的碳排放量较高,分别占比 54.74%和 38.94%,运输和有机废气处理占比仅为 5.95%和 0.37%.

横向对比 3 种产品,总碳排放与产品尺寸直接相关,但由于工艺流程不同,各阶段所占比例区别较

大.废气处理在地板碳排放中所占比例 5.72%远大于废气处理在其他两种产品中的比例 1.21%和 0.37%,这主要是由于该厂在制作地板过程中喷漆多达十余层,相对其他产品而言产生更多挥发性有机废气.木门的材料碳排放占比最高,高达 77.47%,这主要是由于木门使用的密度板碳排放因子较高、消耗量大,机械流程较少.门套的制造碳排放占比远高于其他两种产品,这是由于门套线条组合较为复杂,需要更长的机械时间进行木材组合加工,电力消耗比例较高.

表 8 三种典型木质建材的碳排放核算结果(kgCO₂e)

Table 8 Carbon emissions of the three wooden building materials(kgCO₂e)

生产阶段	地板(占比,%)	木门(占比,%)	门套(占比,%)
材料	1.11 (72.17)	119.66 (77.47)	8.65 (54.74)
运输	0.05 (3.15)	4.26 (2.76)	0.94 (5.95)
制造	0.29 (18.97)	28.68 (18.57)	6.15 (38.94)
废气处理	0.09 (5.72)	1.87 (1.21)	0.06 (0.37)
总计	1.54 (100)	154.47 (100)	15.81 (100)

如图 3 所示,3 种木质建材生产过程 96%以上的废气处理碳排放均来自天然气的直接燃烧,有机废气热解产生的二氧化碳占比非常小,仅占产品总碳排放的 0.2%以下(地板 0.2%,木门 0.04%和门套 0.01%).由此可见,虽然计算过程中对于油漆组分进行了一定程度的估计和假设,但这些假设对于整体碳足迹核算结果并不会造成太大影响.

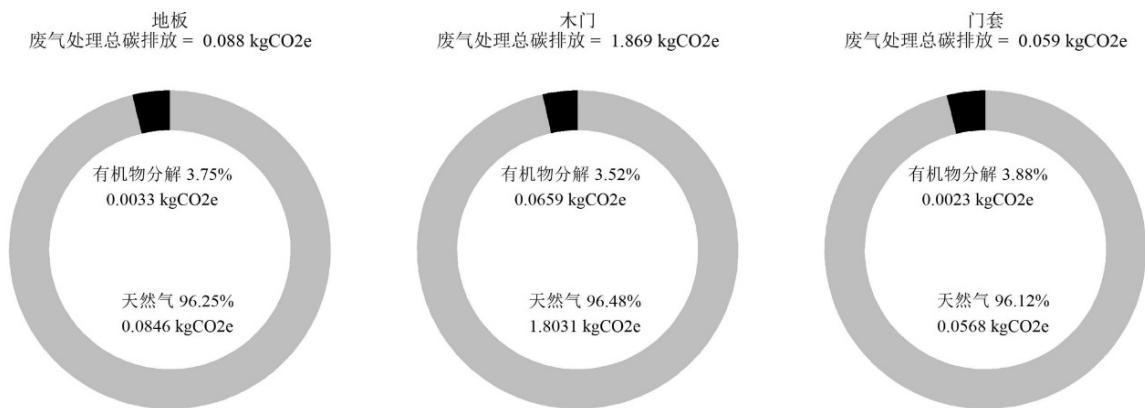


图 3 废气处理产生的碳排放细分

Fig.3 Details of carbon emissions during the waste gas treatment

2.2 不确定性识别与分析

鉴于清单数据大部分为现场实测,可靠性较高,假

设大部分参数的实际分布为正态分布,其均值(M)取清单数据,标准差(SD)假设为均值的 5%.运输距离为估计,

因此标准差假设为均值的 10%.电力碳排放因子在确定性分析中采用 0.4948kgCO₂e/(kW·h),假设电力因子符合均匀分布,最小值和最大值分别为 0.4 和 0.6kgCO₂e/(kW·h).有机废气热解直接产生的二氧化碳占产品总碳排放的比例极低,因此无需分析其不确定性.

根据表 9 的参数设置,在 R 语言中采用蒙特卡洛

模拟法对 3 种产品碳足迹进行了不确定性分析,每种产品模拟 10 万次,模拟结果如图 4 所示.如表 10 所示,本研究的不确定度(用相对标准差 RSD 表示,RSD=标准差/均值)为 4.25%~5.26%,相比文献 [12-13,23-24]介于 6.26%~30.3%的不确定度,本研究结果可靠度及精准度较高.

表 9 不确定性分析参数设置
Table 9 Parameters setting in the uncertainty analysis

阶段	清单数据类型	分布特征
原材料	主料、辅料和包装材料质量	正态分布,SD=5%M
	主料、辅料和包装材料排放因子	正态分布,SD=5%M
运输	运输距离	正态分布,SD=10%M
	排放因子	正态分布,SD=5%M
生产	生产耗时	正态分布,SD=5%M
	电力碳排放因子	均匀分布,min=0.4, max=0.6
有机废气处理	天然气碳排放因子	正态分布,SD=5%M

注:SD表示标准差;M表示均值;min表示下限;max表示上限.

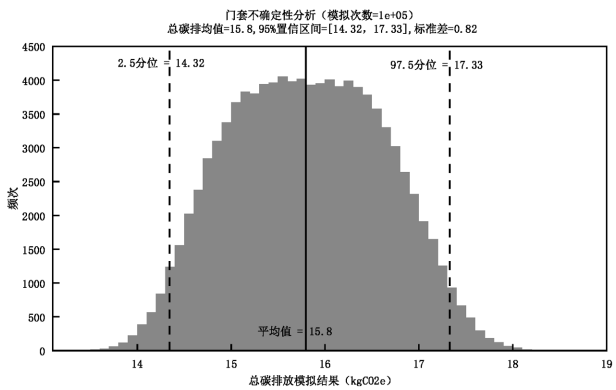


图 4 蒙特卡罗模拟结果(以门套为例)

Fig.4 Results of the Monte Carlo Simulation: door frame as the example

表 10 不确定性分析结果和确定性碳排放计算值比较
Table 10 Uncertainty analysis results and the comparison with deterministic LCA results

产品	碳足迹 单位	确定性 分析计 算值	不确定性分析			
			均值	标准差	95%置信区间	不确定度 RSD(%)
地板	kgCO ₂ e	1.54	1.52	0.08	[1.36, 1.68]	5.26
木门	kgCO ₂ e	154.47	154.78	6.58	[142.06, 167.81]	4.25
门套	kgCO ₂ e	15.81	15.80	0.82	[14.32, 17.33]	5.19

3 讨论

3.1 碳排放强度对比

本研究木地板、木门和门套对应的单位质量碳足迹分别为 1.21, 1.26 和 0.47kgCO₂e/kg.为便于与相关文献对比,将单件地板和木门的碳足迹(1.54 和 154.47kgCO₂e)基于地板和木门的尺寸换算成 8.83 和 46.21kgCO₂e/m².

文献[11]对某家强化木地板制造企业进行了全生命周期碳核算,材料与制造阶段碳排放之和为 6.095kgCO₂e/m²,材料碳排放是制造碳排放的近 2 倍.若将文献[11]结果作为国内一般机械化工厂生产木地板的平均水平,数智化工厂生产的木地板碳排放强度将高出行业水平 44.87%.值得注意的是,尽管本研究地板的制作过程机械化程度高,但由于工厂的智能化管理和机械设备的能效优化,其制造阶段碳排放占比(18.97%)低于国内同类产品的制造碳排放占比(34.2%),体现了数智化工厂的优势.此外,由表 11 可知,某挪威木地板^[25]的材料与制造过程碳足迹极高,为 16.374kgCO₂e/m²,且材料占比为 99.2%,这可能是由于其所取材料碳排放因子较高,且其制造过程的机械化水平较低.某日本木质地板(东京销售)碳足迹为 52.0kgCO₂e/套,一套 47kg,约合 1.106kgCO₂e/kg.本研究地板的碳足迹高于国内同行和日本水平,低于挪威水平.

由表 12 可知,本研究木门碳足迹高于加拿大某板式木门,考虑到加拿大林业发达、木材资源丰富,该结果可能主要由于原材料的碳排放因子区别.同

时,木门碳足迹远低于钢门,印证了木材的绿色属性,说明了本文计算结果的合理性.值得注意的是,由于本文的系统边界是“摇篮到大门”,因此并未算入“大门到坟墓”过程中可考虑的木材固碳作用.若考虑木材的生物固碳^[26],木门将成为负碳产品,在减少温室效应方面优于钢制门等其他材料.

表 11 本研究地板与同类产品的碳排放水平比较
Table 11 Comparison of the carbon emissions of our floor tile and others

项目	本研究地板	大自然地板	某挪威地板	某日本地板
文献来源	本文	[11]	[25]	碳智汇 ^[17]
国家	中国	中国	挪威	日本
年份	2021	2014	2021	2017
产品类型	实木复合木地板	强化木地板	木地板	木地板
系统边界	材料+运输+制造+废气处理	材料+制造	材料+制造	全生命周期
材料碳排放占比(%)	72.17	65.8	99.2	-
制造碳排放占比(%)	18.97	34.2	0.8	-
单位面积碳排放(kgCO ₂ e/m ²)	8.83	6.095	16.374	-
单位质量碳排放(kgCO ₂ e/kg)	1.21	-	-	1.106

注:“-”表示该数据未知.

表 12 本研究木门与同类产品的碳排放水平比较
Table 12 Comparison of the carbon emissions of our door and others

项目	本研究木门	板式木门	不耐火钢门	耐火钢门
文献来源	本文	[27]	[28]	[28]
国家	中国	加拿大	欧洲	欧洲
年份	2021	2017	2013	2013
系统边界	材料+运输+制造+废气处理	材料+运输+制造	材料+运输+制造	材料+运输+制造
单位面积碳排放(kgCO ₂ e/m ²)	46.21	13.22	104	156

3.2 产品减碳措施

根据 C2G 的碳排放分析,3 种产品碳排放大多来自于材料和制造阶段,而运输阶段和废气处理阶段的碳排放占比较小.与同类产品相比,该数智化工厂生产的木质建材碳排放普遍较高,主要原因可能是由高奢产品定位导致的复杂工艺流程和多种原材料,以及批量化机械使用.一般而言,机械化率和工序复杂程度与碳排放成正比,但从该案例可知,由于工厂已对主要设备进行能效优化,机械能耗产生的碳排放占比较低.基于研究结果,对于同类型数智化工厂产品减碳可从以下方面入手.

(1)甄选低碳原材料:数智化建材加工企业应强化绿色供应链管理,从供应链的角度,对材料供应商提出环保要求,促进密度板等主材的上游生产企业提升生产过程的绿色化程度,主动购买具有绿色标签的原材料,降低原材料生产过程中的能源消耗和碳排放.

(2)优化低碳产品设计:数智化建材加工企业可以

通过优化设计,尽早与上游原料供应商对接,减少原材料的损耗量.例如,本研究的案例工厂现阶段生产地板时,一块胶合板大板可供裁出 7 块地板原料,有 0.32m²的胶合板原材料被浪费,企业可与上游供应商协调设计生产出特定尺寸的原材料,以降低材料消耗.另一方面,数智化的产品包装工艺应考虑简约、耐用和可回收性,避免出现重复、过度包装,例如减小采购胶带的宽度,优化打包算法、降低胶带使用长度等.

(3)提升设备能源效率:在智能化工厂中,产品生产过程中消耗的电力碳排放贡献较大.一方面可升级改造生产设备,提升能源效率,降低机械实际运转功率,有效减少电力消耗与间接碳排放.另一方面可加强工艺过程的清洁化设计,优化生产工艺流程,实现流水线式柔性生产和短流程生产,减少机器空转时间.

(4)使用清洁能源:智能化工厂可通过在屋顶、空地等场所安装分布式光伏、风机,提升生产耗电的清洁化程度,降低电力碳排放^[29].以本研究案例企业为例,若在全厂屋顶以常规技术铺设太阳能板,并将自发电均用于厂区生产,则产品生产能耗的碳排放可降低近 30%.若改进光伏铺设方式,推行建筑光伏一体化,结合区域光储系统,可进一步降低生产能耗碳排放^[30-31],适当抵消数智化生产带来的高碳排放.

4 结论

4.1 数智化工厂生产的木地板、木门和门套对应的单位质量碳足迹分别为 1.21,1.26 和 0.47kgCO₂e/kg.

4.2 由于工艺流程不同,3 种产品的各阶段碳排放

占比差异较大,但碳排放的主要来源均为材料和制造过程,分别占产品总碳排放的 54.74%~77.47%和 18.57%~38.94%。

4.3 基于数智化生产线的木地板的单位质量碳排放高于行业均值 44.87%。

4.4 数智化生产带来的高碳排可通过甄选低碳原材料、优化低碳产品设计、提升设备能源效率、扩大清洁能源应用比例等途径适当抵消。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会.中国建筑能耗研究报告 2020 [J]. 建筑节能, 2021,49(2):1-6.
China Association of Building Energy Efficiency. China building energy consumption annual report 2020 [J]. Building Energy Efficiency, 2021,49(2):1-6.
- [2] Linkosalmi L, Husgafvel R, Fomkin A, et al. Main factors influencing greenhouse gas emissions of wood-based furniture industry in Finland [J]. Journal of Cleaner Production, 2016,113:596-605.
- [3] Iritani D R, Silva D A L, Saavedra Y M B, et al. Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: A case study in a furniture industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2015,96:308-318.
- [4] Medeiros D L, Tavares A O D, Raposo Á L Q R E S, et al. Life cycle assessment in the furniture industry: the case study of an office cabinet [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2017,22(11):1823-1836.
- [5] Suter F, Steubing B, Hellweg S, et al. Life cycle impacts and benefits of wood along the value chain: The case of Switzerland [J]. Journal of Industrial Ecology, 2017,21(4):874-886.
- [6] Hussain M, Malik R N, Taylor A, et al. Carbon footprint as an environmental sustainability indicator for the particleboard produced in Pakistan [J]. Environmental Research, 2017,155:385-393.
- [7] 王珊珊,张 寒,杨红强.中国人造板行业的生命周期碳足迹和能源消耗用评估 [J]. 资源科学, 2019,41(3):521-531.
Wang S S, Zhang H, Yang H Q. Carbon footprint and energy consumption based on life cycle assessment of wood-based panel industry in China [J]. Resources Science, 2019,41(3):521-531.
- [8] Geng A X, Zhang H, Yang H Q. Greenhouse gas reduction and cost efficiency of using wood flooring as an alternative to ceramic tile: A case study in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,166:438-448.
- [9] 张 南,李 楠,刘 一,等.生态设计家具的碳足迹核算与减排效果分析——以木质家具为例 [J]. 生态学报, 2016,36(22):7235-7243.
Zhang N, Li N, Liu Y, et al. Calculation of the carbon footprint of eco-design furniture and measures for its mitigation: a case study of wooden furniture [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(22):7235-7243.
- [10] 林立平,黄圣游.木基材料产品碳足迹的核算与分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016,36(12):135-139.
Lin L P, Huang S Y. Carbon footprint assessment of wood-based product [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016,36(12):135-139.
- [11] 陈 硕,胡继梅,沈乃强,等.强化木地板的“碳足迹”计算分析 [J]. 木材工业, 2014,28(2):36-38.
Chen S, Hu J M, Shen N Q, et al. “Carbon footprint” calculation and analysis for laminate flooring [J]. China Wood Industry, 2014,28(2):36-38.
- [12] 黄 娜,王洪涛,范辞冬,等.基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法 [J]. 环境科学学报, 2012,32(6):1529-1536.
Huang N, Wang H T, Fan C D, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(6):1529-1536.
- [13] 陈 莎,李焱佩,曹 磊,等.产品碳足迹评价中不确定度与敏感度相

结合的数据质量分析 [J]. 中国环境科学, 2014,34(4):1067-1072.

- Chen S, Li Y P, Cao L, et al. Data quality analysis with combination uncertainty and sensitivity for carbon footprint assessment of products [J]. China Environmental Science, 2014,34(4):1067-1072.
- [14] Zadeh L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1973,SMC-3(1):28-44.
 - [15] Djekic I, Petrovic J, Božičković A, et al. Main environmental impacts associated with production and consumption of milk and yogurt in Serbia—Monte Carlo approach [J]. Science of the Total Environment, 2019,695:133917.
 - [16] Yu S R, Tao J. Economic, energy and environmental evaluations of biomass-based fuel ethanol projects based on life cycle assessment and simulation [J]. Applied Energy, 2009,86:S178-S188.
 - [17] 碳阻迹.碳智汇碳排放因子数据库 [DB/OL]. [2022-05-01].
Carbonstop. Carbon Intelligence database [DB/OL]. [2022-05-01].
 - [18] Geng A X, Ning Z, Zhang H, et al. Quantifying the climate change mitigation potential of China's furniture sector: Wood substitution benefits on emission reduction [J]. Ecological Indicators, 2019,103:363-372.
 - [19] 白伟荣.木质家具碳排放特征及碳减排策略研究 [D]. 北京:北京林业大学, 2013.
Bai W R. Analysis of carbon emission characteristics and carbon reduction strategies of wood furniture products [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
 - [20] thinkstep. GaBi LCA databases [DB/OL]. [2022-05-01]
 - [21] Simapro. Simapro LCI databases [DB/OL]. [2022-05-01]
 - [22] Bayus J A. Environmental life cycle comparison of aluminum-based high barrier flexible packaging laminates [D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2015.
 - [23] Guo M, Murphy R J. LCA data quality: Sensitivity and uncertainty analysis [J]. Science of the Total Environment, 2012,435-436:230-243.
 - [24] Robati M, McCarthy T, Kokogiannakis G. A method of uncertainty analysis for life cycle embodied CO₂-e of building and structural materials in Australia [C]. Adelaide: 28th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia 2017, 2017:22-25 October.
 - [25] Nesheim S, Malo K A, Labonnote N. Competitiveness of timber floor elements: An assessment of structural properties, production, costs, and carbon emissions [J]. Forest Products Journal, 2021,71(2):111-123.
 - [26] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等.1973~2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化 [J]. 中国环境科学, 2018,38(12):4678-4686.
Zhang C H, Wang L Y, Song Q W, et al. Biomass carbon stocks and dynamics of forests in Heilongjiang Province from 1973 to 2013 [J]. China Environmental Science, 2018,38(12):4678-4686.
 - [27] CSA Group. EPD 794H Panel Doors [Z]. 2017.
 - [28] ift Rosenheim GmbH. EPD Steel/stainless steel doors [Z]. 2013.
 - [29] 赵若楠,董 莉,白 璐,等.光伏行业生命周期碳排放清单分析 [J]. 中国环境科学, 2020,40(6):2751-2757.
Zhao R N, Dong L, Bai L, et al. Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry [J]. China Environmental Science, 2020,40(6):2751-2757.
 - [30] 姜 雷,胡忆南.工业厂房光伏屋顶构造形态对发电效益的影响 [J]. 济南大学学报:自然科学版, 2022,36(2):183-188,195.
Jiang L, Hu Y N. Influence of photovoltaic roof structural forms of industrial plants on power generation efficiency [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022,36(2):183-188,195.
 - [31] 李建林,方知进,谭宇良,等.电化学储能系统在整县制屋顶光伏中应用前景分析 [J]. 太阳能学报, 2022,43(4):1-12.
Li J L, Fang Z J, Tan Y L, et al. Analysis of application prospect of energy storage technology in county-wide rooftop photovoltaic system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022,43(4):1-12.

作者简介: 李佩娴(1992-),女,湖南长沙人,博士后,博士,主要从事绿色低碳建筑研究.发表论文 20 篇。