

## 竹产品生命周期中碳足迹研究\*

龙超<sup>1,2</sup> 王光玉<sup>2</sup> 鲁德<sup>1</sup> 江京辉<sup>3</sup> 潘春豫<sup>2</sup> 翟洪波<sup>1</sup> 黄克标<sup>1</sup>

(1 亚太森林恢复与可持续管理组织, 北京 100102; 2 加拿大不列颠哥伦比亚大学林学系, 温哥华 V6T 1Z4;  
3 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:**竹子生长过程中吸收的二氧化碳会转移存储在竹产品中,并在产品碳足迹中以负的二氧化碳排放当量形式被扣除。目前竹产品全生命周期碳足迹研究甚少,且多集中在竹林培育经营阶段的碳固定,忽略了竹产品的碳转移和碳存储。文中简要介绍了基于生命周期评估(LCA)的碳汇计量标准,通过分析主要工程竹产品碳足迹研究结果发现:1)在LCA碳足迹评价标准中,以ISO14067和PAS2050应用最广;两者在目的和范围、抵消、数据和数据质量控制等方面相对一致,在分配和产品比较上存在不同。2)竹产品碳足迹的主要影响因素包括能源结构和加工能耗、运输方式、使用添加材料、加工工艺及产品寿命。3)因加工工艺、能源结构、分析标准和方法、功能单位、系统边界不同,不同类型竹产品碳足迹的评估结果之间难以直接比较,可以通过减少重组竹竹单板生产阶段和胶合层积竹竹条制备阶段的电力和能源消耗减少其碳足迹。4)手工竹工艺品因运输和包装中使用化石能源造成碳足迹偏高。研究结果将为双碳背景下增加产品碳封存、调控全生命周期各环节减排提供技术支持。

**关键词:**生命周期评估,竹产品,碳足迹

中图分类号:F326.27, F416.88, X322 文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2023)03-0022-06

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2023.0024.y

## Life Cycle Carbon Footprint of Bamboo Products

Long Chao<sup>1,2</sup> Wang Guangyu<sup>2</sup> Lu De<sup>1</sup> Jiang Jinghui<sup>3</sup> Pan Chunyu<sup>2</sup>  
Zhai Hongbo<sup>1</sup> Huang Kebiao<sup>1</sup>

(1 Asia Pacific Network for Sustainable Forest Management and Rehabilitation, Beijing 100102, China;

2 Faculty of Forestry, the University of British Columbia, Vancouver V6T 1Z4, Canada;

3 Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The carbon dioxide absorbed by bamboo during its growth process will be later transferred and stored in bamboo products and deducted from the carbon footprint of the final products as a negative carbon dioxide emission equivalent. At present, there is little research on the full life cycle carbon footprint of bamboo products, which are mainly focused on carbon fixation in the cultivation and management of bamboo forests while ignoring the carbon transfer and carbon storage in bamboo products. This paper briefly introduces the carbon sequestration standards based on the method of life cycle assessment (LCA), and analyzes the research results associated to carbon footprint of main bamboo products. It is found: 1) Among LCA carbon footprint assessment standards, ISO14067 and PAS2050 are the most widely used. They are relatively consistent in terms of purpose and scope, offset, data, and data quality control, but differ in distribution and product comparison. 2) The main factors affecting the carbon footprint of bamboo products include energy structure, processing energy consumption, way of transportation, use of additive materials,

\*收稿日期: 2023-03-20; 修回日期: 2023-04-15; 网络出版日期: 2023-04-19。

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“木材工业节能降耗与生产安全控制技术”(2016YFD0600701)子课题“木材节能备料与质量控制技术研究”。

第一作者: 龙超, 博士, 木材科学与技术专业, 长期从事林业国际项目规划和管理工作及林业政策研究, 2022—2023年在英属哥伦比亚大学访学期间从事竹产品碳足迹研究工, E-mail: long\_chao@apfnct.cn。

通信作者: 王光玉, 加拿大不列颠哥伦比亚大学林学系教授, 博士生导师, 长期从事森林可持续经营、林业国际合作、森林生态与气候变化研究, E-mail: guangyu.wang@ubc.ca。

processing technique and product life. 3) It is difficult to directly compare the final carbon footprint of various bamboo products considering their differences in processing technique, energy structure, assessment standard and method, functional unit and system boundary. The key to reducing the carbon footprint of laminated bamboo and bamboo scrimber is to reduce the electricity and energy consumption in the production stage of the veneer for bamboo scrimber and the preparation stage of bamboo strips for laminated bamboo, respectively. 4) The carbon footprint of bamboo handicrafts are relatively high due to the use of fossil energy in transportation and packaging. This study would provide technical support for increasing carbon sequestration of bamboo products and regulating emission reduction at every part of the entire life cycle in the context of “Dual Carbon” strategy.

**Keywords:** life cycle assessment, bamboo product, carbon footprint

在实现“双碳”目标大背景下,除植树造林和重新造林、制成经久耐用的木制品、进行木质生物封存外,其他减排方式成效不大。而木材碳封存速度缓慢,倘若皆伐,自身还会释放大量二氧化碳。相比之下,竹材资源丰富,分布广泛,可在山坡地和非宜林地生长,生长迅速,可加速碳封存。木本竹子的平均封存率为 $6 \sim 13 \text{ Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[1]</sup>。近70%的碳都储存在地下根茎部分,即便重复采伐,仍可作为长期储碳库<sup>[2]</sup>。而当竹材制成竹产品后,则需借助碳足迹(product carbon footprint)来衡量产品生命周期中碳转移、碳存储及温室气体排放量,核算企业生产活动对外界的净碳排放量<sup>[3]</sup>。目前英国、美国、日本、中国台湾企业对已部分产品开展了碳足迹评价工作,并以碳标签的形式告知消费者。丹麦、瑞典、意大利等国已在本国范围内征收碳税,从而形成了新的贸易壁垒<sup>[4]</sup>。中国竹产品多销往欧美、日本等地,势必会面对碳足迹核算要求<sup>[5]</sup>。但目前产品碳足迹研究多集中在城市和地区宏观层面<sup>[6-7]</sup>,在微观层面研究较少,特别是对具有储碳功能的竹产品。加工利用方式不同,竹产品的最终碳转移存储率不同<sup>[8-9]</sup>。竹产业已被列为林草产业发展规划(2021—2025年)重点发展产业,预计2025年全国竹产业总值将突破7000亿元<sup>[10]</sup>。伴随着竹产品大规模生产,亟需了解其是否会因生产过程的排放成为碳源。这对调控竹产品生命周期各环节减排,应对碳标签贸易壁垒,实现“双碳”战略目标意义重大。

## 1 世界竹资源分布

竹子广泛分布于热带、亚热带和温带区域,以东亚、东南亚、印度洋和太平洋岛屿分布最为集中,种类最多,详见表1<sup>[11]</sup>。1990—2020年,世界竹子总面积增加了近50%,尤以中国和印度增长最为显著。但从公开发表文献数量和频率来看,在亚洲(中国、越南、日本)、欧洲(英国、荷兰)、北美洲(美国、加拿大)和

南美洲(哥伦比亚、秘鲁、厄瓜多尔)竹产品碳足迹研究相对活跃。究其原因可能在于虽然全球竹产品多来自亚洲地区,但受竹加工设备、工艺和国家经济发展水平制约,竹产品质量不稳定,生产能力偏低,碳足迹研究尚处于初级阶段;而欧美国家作为竹产品主要进口国,更加关注产品的环境影响。

表1 2020年世界竹林面积

| 区域/次区域     | 竹林面积/万 $\text{hm}^2$ |
|------------|----------------------|
| 东非和南非      | 398.4                |
| 北非         | 3.0                  |
| 西非和中非      | 63.4                 |
| 非洲小计       | 464.8                |
| 东亚         | 700.5                |
| 南亚和东南亚     | 1 787.2              |
| 西亚和中亚      | 0.0                  |
| 亚洲小计       | 2 487.7              |
| 欧洲小计       | 0.0                  |
| 加勒比海       | 12.5                 |
| 中美洲        | 0.0                  |
| 北美         | 0.0                  |
| 中北美和加勒比海小计 | 12.5                 |
| 大洋洲        | 0.0                  |
| 南美洲        | 538.9                |
| 世界总计       | 3 504.0              |

据统计,全世界约有1500种竹子,其中约20种被认为适合用于以原竹为原料的竹建筑,尤以瓜多竹、牡竹/龙竹、毛竹结构特性为佳。瓜多竹原产于中美洲和南美洲,牡竹属和毛竹属原产于亚洲<sup>[12]</sup>。此外,中国台湾通常使用毛竹、桂竹、麻竹制作胶合板<sup>[13]</sup>,越南使用玉山竹制作手工艺品,使用小叶龙竹生产竹基板材<sup>[14]</sup>。

## 2 生命周期分析方法及标准

生命周期分析(LCA)是基于多重环境指标,如全

球增温潜势(碳足迹)、资源消耗和土地利用等,系统评估产品在生命周期内环境影响的计量方法<sup>[15]</sup>,其核心步骤为制定生命周期清单(LCI)和生命周期清单分析<sup>[16]</sup>,而产品碳足迹评估只关注全球增温潜势这个单项指标<sup>[17]</sup>。现行的产品碳足迹评价标准主要包括国际标准(如 ISO 14040、14044、14064、14067)<sup>[18-21]</sup>、欧盟标准(EN 系列标准)、英国《商品和服务生命周期温室气体排放评估规范》(PAS 2050)<sup>[22]</sup>、欧洲造纸工业联合会(CEPI)框架。PAS 2050 是世界上第 1 个国家主导制定的评估产品和服务的温室气体排放量标准,采用生命周期评估标准(ISO 14040/44)作为规范基础,是目前唯一确定的、具有公开具体计算方法的标准,其他国家在制定本国产品和服务温室气体评估方法时均会参照此标准。此外,还有《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》、中国的“企业温室气体排放核算和报告”系列国家标准(GB/T 32150《工业企业温室气体排放核算和报告通则》和 GB/T 32151.1~10)、日本碳足迹标准 TS Q0010(日本工业标准委员会,2009)和国际参考生命周期数据系统(ILCD)<sup>[23]</sup>。在上述标准中,以 ISO14067 和 PAS2050 应用最广。两者在目的和范围、抵消、数据和数据质量控制等方面相对一致,在原则、系统边界、排放源等方面差异不大,但在分配和产品比较上存在不同。

### 3 竹产品 LCA 碳足迹评估结果及影响因素

竹子从生长发育、采伐收获、加工制造、产品利用直至废弃处置的全生命周期过程也是一个碳循环的过程,包括竹林碳汇、竹产品生产使用中的碳储存和转移,以及废弃后的碳分解。但目前对竹产品全周期碳足迹的研究只关注竹林培育阶段或竹材加工阶段<sup>[24]</sup>,却忽略了使用阶段和回收利用阶段。其原因可能在于竹产品销售使用、废弃阶段碳排放时间很长,难于监测计量,最终处置时运往发电厂焚烧和进行填埋的结果也会有差异。此外,与木材相比,竹材生产涉及的生产链更长<sup>[15]</sup>,从原料到产品的生产过程比较复杂,到市场的运输距离更长,多采用二手数据评估碳足迹,其间接排放难以监测<sup>[17]</sup>。

与钢、混凝土和木材等传统建材相比,竹材因其高度可再生,蕴含能(制造产品或提供服务所需的全部能量总和)低,强重比高,具有卓越的物理力学性能,成本低(组装、拆卸、维护和材料处理等成本除外),被广泛用于各种产品和可持续建筑结构中<sup>[25]</sup>。为了减少天然竹材固有的几何和力学性能的变异性,通常将基础竹材加工成工程竹复合材料。根据基本构成单元

的不同,工程竹复合材料主要可分为 5 种类型,分别是竹重组材、竹胶合层积材、竹集成材、竹胶合板和原态仿生重组竹材,可用作墙体、楼板、地板和集装箱底板等<sup>[26]</sup>。前 2 种产品具有原料利用率和生产效率高的特点,作为本研究重点。

#### 3.1 竹胶合层积材产品碳足迹评估结果

目前针对竹层积材产品的碳足迹研究较为集中。该产品以截面不规则的竹篾为基本构成单元,经浸渍、干燥、组坯、热压固化而形成一种层压板,可用作梁、柱、承重墙体等建筑构件。Juan<sup>[27]</sup>指出,相对于铝、钢、单板层积材(LVL)等建材,竹层积材产品蕴含能较小,具有负全球变暖潜势。利用全年生产数据,Li 等<sup>[28]</sup>对福建产三层直缝拼接胶合竹进行环境载荷分析和 LCA 评价发现,竹层积材加工对全球增温潜势贡献显著。加工、碳化、干燥、热压等工序对环境载荷影响最大,贡献率超过 67%。就胶粘剂而言,脲醛胶对环境的影响最大,其次是酚醛胶和三聚氰胺。这与 Chang 等<sup>[13]</sup>对三层漂白层积竹的研究结果大致相同。该研究同样认为层压过程对环境的影响最大(特别是呼吸性无机物类别),并指出能源消耗和生产率是造成潜在环境影响的关键因素。Vogtlander 等<sup>[15,29]</sup>针对在浙江生产后运往鹿特丹销售的竹层积材产品,将 LCA 研究范围扩大至产品最终处理阶段(90% 竹产品运往发电厂焚烧,10% 进行填埋处理),但不包括消费者购买产品后的使用阶段。研究结果表明,该产品为零碳产品,即通过碳封存及产品使用寿命结束时,在发电厂燃烧发电所获得的碳信用将超过生产和运输过程造成的碳排放。该研究同样得出了加工能耗对产品环境影响贡献最大的结论,其约占生态成本的 36%~53% 和总生态负担碳足迹的 52%~63%;此外,国际海运对环境的影响排第 2,占工业竹产品碳足迹的 15%~25% 和生态成本的 28%~37%;相比之下,当地交通贡献了约 10% 的生态负担。该产品在碳足迹方面足以与可持续采购的欧洲软木竞争,并优于可持续经营的热带硬木人工林。Alvaro 等<sup>[30]</sup>对哥伦比亚胶合层积竹碳足迹开展了类似研究,在制造过程现场收集相关数据,采用电和竹废料作为制造过程的能量来源,研究结果表明,因竹废料回收使用,产品的碳足迹为负值(-117 kg CO<sub>2</sub>e)。Yu 等<sup>[31]</sup>的研究也表明,层积竹地板生产阶段最大的环境载荷来自于竹条加工(59.3%),其次是最终产品生产(21.1%),最后是竹板材生产(18%)。其原因在于竹条生产阶段电、热、水消耗很大,水体排放量大于另外 2 个阶段。因此,减少竹条制备阶段的电力和能源消耗对于减少环境负

担至关重要。从整个生命周期来看,制造过程环境载荷最大,利用阶段几乎对环境没有负面影响;处理阶段燃烧热能被再次利用,对环境有正面影响。此外,还有研究表明,竹子种类和采伐方式对竹层积材的整体环境没有显著影响<sup>[32]</sup>。综上,相关研究一致认为竹层积材加工对全球增温潜势等贡献显著,热压、干燥、使用化学品对环境影响较大,能源消耗和生产率是造成潜在环境影响的关键因素,通过竹废料的回收利用可以减少产品的碳排放。

### 3.2 重组竹产品碳足迹评估结果

目前,对另外一种应用较广的工程竹产品——竹重组材碳足迹的研究兴趣也变得日益浓厚。竹重组材指以竹束或纤维化竹单板为基本构成单元,通过浸胶、干燥、组坯、热压固化而成的复合重组材。Gu等<sup>[17]</sup>评估了户外用竹重组材地板生产过程中的二氧化碳排放量和碳转移率,包括竹秆运输以及产品生产和包装。结果表明,1 m<sup>3</sup>竹地板碳足迹为-14.89 kg CO<sub>2</sub>e,即重组竹地板是一种负碳排放产品(净碳汇),可储存20年以上;其中,原材料/半成品运输过程中化石燃料的直接碳排放量、生产过程中的电力消耗及使用添加剂的间接碳排放量分别为30.94、143.37和78.34 kg CO<sub>2</sub>e。Yu等<sup>[31]</sup>对竹重组材生命周期环境影响的分析结果与之相近,即主要环境影响在于板材加工工序(56.9%),其次是竹条加工(26.6%)和最终产品生产(14.4%)。因此,减少竹板材生产阶段的电力和能源消耗对于提升重组竹地板的环保性至关重要。从整个生命周期来看,制造过程中环境载荷最大,利用阶段几乎对环境没有负面影响,处理阶段燃烧热能被再次利用,相应减少了煤的消耗,对环境有正面影响。

### 3.3 工程竹产品碳足迹评估结果比较

比较上述研究结果发现:1)哥伦比亚制造的瓜多竹胶合层积板(2 440 mm × 1 220 mm × 16 mm)的碳足迹为-117 kg CO<sub>2</sub>e/kg(密度为678 kg/m<sup>3</sup>)<sup>[30]</sup>,高于越南产厨房台面面板的碳足迹(-0.5043 kg CO<sub>2</sub>e/kg)<sup>[14]</sup>,高于由毛竹原竹经原色侧压制成的多层面板(-0.338 3 kg CO<sub>2</sub>e/kg)<sup>[15]</sup>。由此可见,哥伦比亚、越南、中国产的竹产品在减少二氧化碳排放和环境影响方面发挥了重要作用,其碳足迹差异的原因在于竹废料的利用、运输能源消耗和最终产品的施胶量。哥伦比亚产竹胶合层积板的环境分析考虑了因防止农田残留废物分解而避免的排放,并使用竹废料作为锅炉燃料,导致产品碳足迹为负值。越南产厨房台面面板使用28 t卡车运输货物和制造过程中施胶量分别为0.233和0.011 kg/kg产品,从而影响了竹产品碳足迹。

2)PVC、钢、铝、混凝土的碳足迹分别为2.104、1.838、11.580和0.231 CO<sub>2</sub>e/kg产品。因此,相对于传统建材,竹材具有生长阶段吸收碳的重要优势。3)1 m<sup>3</sup>在加拿大制造并销往英国的木制品(软木锯材、软木胶合板、西部红柏木材、西部红雪松壁板)的全球增温潜势值从最低的139 kg CO<sub>2</sub>e(西部红柏木材)到最高的224 kg CO<sub>2</sub>e(软木胶合板)不等<sup>[33]</sup>。尽管国际海运部分碳排放最为密集,但每种产品在运抵英国时仍为净碳汇。相比之下,中国大庄地板公司生产的1 m<sup>3</sup>重组竹地板在生产 and 运输过程中的直接排放和添加剂的间接排放分别为30.94、143.37和78.34 kg CO<sub>2</sub>e,扣除产品中的碳储量后,得到边界内的净排放为-14.89 kg CO<sub>2</sub>e<sup>[17]</sup>,属碳汇产品。不难发现,中国产重组竹地板为净碳汇产品,可储存20年以上,虽然相对于木制品而言单位体积净碳汇小,但轮伐期短(3~4年),可持续供应竹产品。4)不同类型的竹产品选用的竹种、加工工艺(展开、集成、重组)、能源结构、LCA分析标准和方法、功能单位、系统边界各异,因此最终碳足迹结果难以直接比较。总体看来,相对于竹胶合层积材,重组竹原料利用率更高,更加经济、环保,宜作为未来研究重点。重组竹的竹束加工工序环境载荷较高的原因主要在于采用冷压、热固化并使用酚醛胶,其固化温度高于脲醛胶,造成电力和能源消耗较高。因此,可通过从附近来源购买原材料,提高加工效率、使用环保胶黏剂、降低胶合温度、控制胶黏剂用量以优化运输方式和生产工艺,以及提高产品使用年限等措施来降低碳排放<sup>[17]</sup>。5)相对于工程竹产品,对在国际贸易中占比较大的竹手工艺品碳足迹的研究却非常匮乏。越南产竹材手工艺品碳排放的主要来源是竹材到工厂的运输,占总排放量的32.82%;其次是包装用再生纸板和纸张(30.53%)以及电力消耗(26.71%)<sup>[14]</sup>。这与通常认为生产竹工艺品多属手工劳动,耗电量少、碳足迹小是截然相对的<sup>[34]</sup>。可以考虑通过竹材料的预处理而非在工厂进行所有加工、提高竹材从竹林地到工厂的运输效率及竹材使用率、使用低碳再生纸进行包装、提高加工制造过程中的用电效率,以及将加工后的竹废料用于能源生产等手段达到降低碳足迹的目的。

### 3.4 竹产品碳足迹主要影响因素

基于上述讨论分析可见,竹产品的环境优势根源在于竹资源的储碳能力,而影响竹产品碳足迹的主要因素大致包括5个方面。

1)能源结构和加工能耗。除少部分发达国家外,通常竹产品制造过程中普遍使用煤炭产生的工业电

力,其碳排放比水力发电和太阳能发电高。有学者曾指出,考虑到与各国能源结构相关的环境影响,哥伦比亚和巴西与竹子材料生产相关的环境影响低于中国<sup>[32]</sup>。

2)国际和当地运输。运输距离是影响竹产品碳足迹和生态成本的重要因素<sup>[16]</sup>,对竹材这种单位质量体积较大的材料尤其如此。竹竿在产竹国直接使用时无疑属于环保材料,但呈中空结构,因而单位重量体积大,运输效率低,长距离运输时会丧失环境优势;倘若竹竿被加工成竹材胶合板后再被长距离运输,则与运输目的地的当地产品相比也丧失了原本的环保优势。因此原则上竹原料应就近加工成半成品,竹产品就近消费,如需外销则应优先考虑邻近地区,且铁路运输优于公路运输,陆路运输优于海运。

3)添加材料,包括胶黏剂、油漆和纸箱。宜采用生物基树脂,通常脲醛胶对环境影响最大,其次是酚醛胶、三聚氰胺。

4)加工工艺。热压、干燥、碳化、使用化学品对环境载荷影响最大,工业化生产与手工生产的环境影响也不同。可以通过优化工艺、选择大径级竹材、提高加工利用率来增加碳转移和碳储量。

5)产品使用寿命通常与产品分解率、经济条件和产品最终处理方式相关,可通过提高产品硬度、密度、耐腐蚀性、耐水性和尺寸稳定性等手段提高产品使用寿命。竹种和采伐方式对碳足迹没有显著影响。因采用的能源结构、LCA分析标准方法、加工工艺不同,不同类型竹产品碳足迹结果难以直接比较。

#### 4 研究展望

1)目前竹产品全生命周期碳足迹研究甚少,特别是产品使用阶段和最终处置阶段。可对主要竹产品按照使用寿命和最终处置方式(焚烧、填埋、生物质循环利用)进行分类,并分别开展碳足迹定量研究。可通过实地调查掌握初级活动水平数据提高数据准确性。为便于进行产品碳足迹比较,应制定能够限制功能单位、系统边界、分配规则、数据质量等的产品类别规则。

2)目前针对竹产品碳足迹核算标准方法的研究非常匮乏。在采用文中所述标准方法进行研究时,可结合国际参考生命周期数据系统和《IPCC国家温室气体清单指南》一并使用,以开源的蕴含能/碳数据库作为必要补充,并通过环境、技术、地理、时间维度辅助界定系统边界。

3)根据本文总结的竹产品碳足迹主要影响因素,

可尝试采用太阳能、水能、风能等作为替代能量来源,竹产品原料就近加工,优化生产工艺,提高产品使用年限,对加工后的竹废料进行循环利用,以减少竹产品全周期碳足迹。

4)随着对工程竹产品碳足迹研究的不断深入,可继续开展竹结构建筑能源使用和碳排放的研究及量化工作,特别是对于竹建筑拆除或施工期间竹建材的回收利用。此外,竹纤维的纤维形态和化学组成以及制浆性能仅次于针叶材木浆而优于阔叶材木浆和禾草纸浆,可开展通过原材料回收使用实现竹浆造纸产业零排放的研究。

#### 参 考 文 献

- [1] NATH A J, LAL R, DAS A K. Managing woody bamboos for carbon farming and carbon trading[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 3: 654 – 663.
- [2] HINKLE H, MCGINLEY M, HARGETT T, et al. Carbon farming with timber bamboo: a superior sequestration system compared to Wood[R]. California, USA: BAMCORE, 2019.
- [3] WENG Z X, SHEN Y Q, LV Q J, et al. Analysis on the public carbon footprint of Zhejiang province[J]. *Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University*, 2012, 29(2): 265 – 271.
- [4] 姚婷婷, 陈泽勇. 低碳认证简析[J]. *电子质量*, 2011(2): 45 – 48.
- [5] ZHOU P F, GU L, PENG W L, et al. A carbon footprint assessment and composition analysis of flattened bamboo chopping board[J]. *Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University*, 2014, 31(6): 860 – 867.
- [6] SOVACOO B K, BROWN M A. Twelve metropolitan carbon footprints: a preliminary comparative global assessment[J]. *Journal of Energy Policy*, 2010, 38(9): 4856 – 4869.
- [7] LIU Y, SHI H D, ZENG X G. A life-cycle carbon footprint assessment of electric power companies[J]. *Journal of Resource Science*, 2011, 33(4): 653 – 658.
- [8] ZHOU Y F, GU L, ZHOU M, et al. Carbon transfer during manufacturing of moso bamboo plank using the bamboo unfolding and flattening technology[J]. *Journal of Forestry Science*, 2013, 49(8): 96 – 102.
- [9] GU L, SHEN Z M, ZHOU Y F, et al. Analysis of carbon transfer in moso bamboo plank in Zhejiang Province[J]. *Journal of Forestry Science*, 2012, 48(1): 186 – 190.
- [10] 国家林草局. 林草产业发展规划(2021-2025年)[EB/OL]. (2022-02-15) [2023-04-12]. [http://www.forestry.gov.cn/html/main/main\\_5461/20220210143502934848435/file/20220210143540490594614.pdf](http://www.forestry.gov.cn/html/main/main_5461/20220210143502934848435/file/20220210143540490594614.pdf).
- [11] FAO. Global forest resources assessment 2020: Main report[EB/OL]. (2021-09-17) [2023-04-12]. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.
- [12] CORREAL J, RAMIREZ F, GONZALEZ S, et al. Structural behavior of glued laminated Guadua Bamboo as a construction material[C]// *Proceedings of the 11th World Conference of Timber Engineering*, Trentino, Italy, 2010.
- [13] FANG C C, KUN S C, PING Y Y, et al. Environmental benefit of

- utilizing bamboo material based on life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204: 60 – 69.
- [14] PHUONG V T, XUAN N V. Life cycle assessment for key bamboo products in Viet Nam[R]. Beijing: INBAR, 2020.
- [15] VOGTLÄNDER J G, LUGT P. The environmental impact of industrial bamboo products: lifecycle assessment and carbon sequestration[R]. Beijing: INBAR, 2015. DOI:10.13140/RG.2.2.20797.46560.
- [16] VOGTLÄNDER J G, LUGT P, BREZE H. The sustainability of bamboo products for local and western European applications. LCAs and land-use[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18: 1260 – 1269.
- [17] GU L, ZHOU Y F, MEIT T, et al. Carbon footprint analysis of bamboo scrimber flooring: implications for carbon sequestration of bamboo forests and its products[J]. *Journal of Forests*, 2019, 10(1): 51. DOI: 10.3390/f10010051.
- [18] International Organization for Standardization. ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework[S]. Genève: International Organization for Standardization, 2006.
- [19] International Organization for Standardization. ISO 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines[S]. International Organization for Standardization. Genève: International Organization for Standardization, 2006.
- [20] International Organization for Standardization. ISO 14064: Greenhouse Gases Emissions Inventories and Verification[S]. Genève: International Organization for Standardization, 2006.
- [21] International Organization for Standardization. ISO 14067: 2018. Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification[S]. Genève: International Organization for Standardization, 2018.
- [22] British Standards Institution. PAS 2050: 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services[S]. London: British Standards Institution, 2011.
- [23] European Commission-Joint Research Centre-Institute for Environment and Sustainability. International reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook-General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance[M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010: 5.
- [24] FEI B H, MA X X, SHI L, et al. Connotation of bamboo carbon footprint and its regulating effect on bamboo industrial development[J]. Beijing: INBAR, 2020: 12 – 17.
- [25] SHARMA B, VEGTE A. Engineered bamboo for structural application[J]. *Journal of Nonconventional and Vernacular Construction Materials*, 2015, 81: 66 – 73.
- [26] 李霞镇, 成书琴, 李贤军, 等. 基于标准化视角的竹质工程材料产业发展现状[J]. *中国标准化*, 2022(5): 183 – 188.
- [27] JUAN C S, ADEEBA A R, RAVI S. Comparison of embodied energy and environmental impact of alternative materials used in reticulated dome construction[J]. *Journal of Building and Environment*, 2016, 96: 22 – 34.
- [28] LI J Q, YUAN Y, GUAN X. Assessing the environmental impacts of glued-laminated bamboo based on a life cycle assessment[J]. *Journal of BioResources*, 2016, 11(1): 1941 – 1950.
- [29] VOGTLÄNDER J G. Lifecycle assessment and carbon sequestration of MOSO bamboo products[EB/OL]. (2011-06-07)[2023-04-12]. <https://worldbamboo.net/wbcix/presentation/Van%20der%20Lugt.%20Pablo.pdf>.
- [30] RRESTREPO A, BECERRA R, JUAN E, et al. Energetic and carbon footprint analysis in manufacturing process of bamboo boards in Colombia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 126: 563 – 571.
- [31] YU X, ZENG L Z, ZHANG G F, et al. Environmental impact of bamboo laminated flooring and bamboo scrimber flooring investigated via life cycle assessment[J]. *Journal of BioResources*, 2019, 14(4): 9132 – 9145.
- [32] ESCAMILLA E Z, HABER G. Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 69: 117 – 127.
- [33] SALAZAR J, BUSHI L, MEIL J. A carbon footprint of four Canadian wood products delivered to the UK as per PAS 2050 methodology: background paper prepared for Forestry Innovation Investment[EB/OL].(2010-11-06)[2023-04-12]. [https://www.bcfii.ca/wp-content/uploads/2021/02/fii268-pas-2050-carbon-footprint-full-report\\_final-1.pdf](https://www.bcfii.ca/wp-content/uploads/2021/02/fii268-pas-2050-carbon-footprint-full-report_final-1.pdf).
- [34] GAN J L, CHEN M L, SEMPLE K. Life cycle assessment of bamboo products: review and harmonization[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 849: 157937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157937.