

# 全生命周期木/竹产品碳足迹研究进展

朱安明<sup>1,2</sup> 洪奕丰<sup>2</sup> 张旭峰<sup>3</sup> 于海霞<sup>4</sup> 王洪涛<sup>5</sup> 王雅梅<sup>1</sup> 于文吉<sup>6\*</sup>

(1. 内蒙古农业大学材料科学与艺术设计学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 国家林业和草原局华东调查规划院, 浙江 杭州 310019; 3. 北京工业大学经济与管理学院, 北京 100124; 4. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023; 5. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 6. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 从森林经营和产品碳储全生命周期的角度论述了木/竹产品碳足迹研究进展, 分析了其替代高密度化石材料的减排效应, 指出应将森林碳汇动态变化、产品的生命周期影响评价和替代减排效应作为整体进行集成动态分析。在此基础上, 描述了木/竹产品生命周期评价方法框架与指标体系, 旨在为探索木材工业领域碳中和路径提供理论依据。

**关键词:** 气候变化; 木/竹产品; 全生命周期; 碳足迹; 替代减排

中图分类号: TS6 文献标识码: A 文章编号: 1001-5299(2023)02-0083-05

DOI: 10.19531/j.issn1001-5299.202302016

## Research Progress on Carbon Footprint of Wood/Bamboo Products Based on the Life Cycle

ZHU An-ming<sup>1,2</sup> HONG Yi-feng<sup>2</sup> ZHANG Xu-feng<sup>3</sup> YU Hai-xia<sup>4</sup> WANG Hong-tao<sup>5</sup> WANG Ya-mei<sup>1</sup> YU Wen-ji<sup>6</sup>

(1. College of Materials Science and Art and Design, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, P.R.China; 2. East China Survey and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, Zhejiang, P.R.China; 3. School of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P.R.China; 4. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, P.R.China; 5. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, P.R.China; 6. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, P.R.China)

**Abstract:** In this paper, the research progress of carbon footprint of wood/bamboo products from the perspective of the life cycle of forest management and product carbon storage was discussed. The emission reduction effect of wood/bamboo products replacing high-density fossil materials was analyzed, and that the dynamic change of forest carbon sink was pointed out, that the life cycle impact assessment of wood/bamboo products and the replacement emission reduction effect should be carried out as a whole for integrated and dynamic analysis. On this basis, the framework and index system of wood/bamboo products life cycle assessment were described, aiming to provide a theoretical basis for exploring the carbon neutral path in the wood industry.

**Key words:** Climate change; Wood/bamboo products; Life cycle; Carbon footprint; Alternative emission reduction

在“双碳”背景下, 木材资源的高效利用在维护自然生态平衡方面发挥着重要作用。木/竹材是高效廉价的碳封存体, 相比钢材、水泥、陶瓷、塑料、玻璃等材料, 木/竹材制品的加工过程排放量最低, 对环境的负面影响最小<sup>[1]</sup>。在“双碳”战略指引下, 木材工业迎来重要

发展机遇期, 加强木竹建材等低碳建材产品研发应用, 有利于加快推动木材工业领域碳达峰行动<sup>[2-3]</sup>。通过开展基于全生命周期的木/竹碳储量与碳足迹研究, 对更加全面了解森林碳汇在区域碳中和中的贡献, 评估产品的替代减排效应、助力木材加工领域实现碳中和具有重要意义, 同时可为企业进行清洁生产、工艺改进和绿色设计提供规范化指导, 为产业结构调整 and 低碳绿色管理提供数据支撑和决策依据。

### 1 森林经营碳汇与木/竹产品碳足迹研究

当林木被采伐作为生产木质林产品的原料, 经运

基金项目: 中国林科院基本科研业务费专项资助(CAFYBB2021ZX001)

作者简介: 朱安明, 男, 工程师, 研究方向为木材科学与技术、产品环境足迹, E-mail: 844239445@qq.com

\*通讯作者: 于文吉, 男, 研究员, 研究方向为木基复合材料科学与工程, E-mail: yuwenji@caf.ac.cn

收稿日期: 2022-09-09

输、生产加工过程,碳从森林碳库转移到林产品碳库,林木砍伐和林产品使用影响了森林生态系统和大气之间的碳平衡,本质上减少了森林碳库的碳储量,所造成的碳损失需要较长时间才能得到补偿。森林碳库核算方法多以经验模型为主、过程模型为辅,借助森林资源连续清查数据计算活力木、枯木、林下植被、凋落物和土壤碳库的碳储量,进而整合得到森林碳库总量<sup>[4-6]</sup>。有关木质林产品碳储量变化方法的研究并不多见,白彦锋等<sup>[7-10]</sup>对比分析了联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)缺省法、储量变化法、生产法和大气流动法,估算中国木质林产品碳转移并分析其在建筑领域的减排潜力,在国际气候变化谈判中,木质林产品已被纳入碳核算体系中,不同核算方法将导致碳权在缔约方之间的分配和归属差异,国际社会尚未形成被普遍认可的碳核算方法学<sup>[11]</sup>。张小标等<sup>[12]</sup>对2010—2030年中国木质林产品碳储效能和结构演化进行模拟,认为我国林产品碳库整体碳储效能将在2030年前呈现不断上升趋势。在国际贸易中,我国属林产品国际贸易净进口国,储量变化法在核算时考虑到进出口的碳计量,使用该方法进行核算对中国而言更具有优势<sup>[13-15]</sup>。我国陆地生态系统的碳汇功能抵消了部分工业碳排放,但20世纪80年代以来陆地碳汇抵消同期化石燃料碳排放的比例由30%降至7%~15%<sup>[16]</sup>。有学者研究表明,随林龄的增加,2000—2040年间我国森林植被碳储量将增加6.69 PgC<sup>[17]</sup>,但随着整体林龄增加,森林碳汇能力将逐步降低,到2060和2100年,森林碳汇预计将分别降至0.08PgC a<sup>-1</sup>和0.06 PgC a<sup>-1</sup>,下降率达到56%和67%。通过采取合适的森林管理措施,同时设法延长木材的使用寿命可使幼龄林生长带来的碳汇超过木材分解导致的碳排放增加,产生额外的净碳汇<sup>[18]</sup>。以上研究多侧重从国家或区域等较大尺度对木材产品碳储量和碳排放进行评估,也有学者从材料利用率角度进行研究<sup>[19-20]</sup>,顾蕾等<sup>[21-22]</sup>从微观层面对竹材产品碳转移特征和碳储量进行分析,跟踪计测了产品每道生产工序前后的碳转移率,构建了不同生产技术下基于胸径的毛竹产品碳转移率和碳储量模型。

## 2 生命周期评价体系在木竹加工领域的应用

生命周期评价在国外被应用在木材工业领域起步于20世纪90年代,加拿大、欧洲、美国、日本等将LCA应

用于木材生产、运输、木结构等领域,所研究的产品包括胶合板、定向刨花板(OSB)、中密度纤维板(MDF)、胶合木和单板层积材等<sup>[23]</sup>。Côté<sup>[24]</sup>提出了林产品碳平衡的分析方法,研究森林经营、生产加工和产品使用、废弃填埋等全过程的碳足迹。Nebel<sup>[25]</sup>对德国木质地板进行LCA研究,认为生产和使用木质地板主要通过储碳和提供清洁能源对环境产生影响。我国木材加工领域LCA研究开始较晚,孙启祥<sup>[26]</sup>从全生命周期视角探讨了木材的环境友好性,认为木材从来源、生产、销售使用、回收再利用到废弃填埋都有良好的环境协调性,是一种环境功能性材料。王爱华<sup>[27]</sup>对竹地板、实木地板进行了全面深入的生命周期评价研究,建立了完整的木/竹质产品生命周期评价指标体系。余翔<sup>[28]</sup>对竹集成材地板和竹重组材地板进行LCA对比研究,分析两种竹地板在生命周期全过程的物料、能源消耗和环境排放,量化其“绿色程度”。张方文<sup>[29]</sup>对我国定向刨花板产品进行LCA评价,并与欧美典型定向刨花板产品的LCA结论进行对比,初步建立了基于LCA的中国定向刨花板环境影响评价体系。

## 3 木竹产品LCA指标体系研究

随着LCA研究的不断深入和产品环境基础数据的日益丰富,产品环境影响类型的评价内容也更加准确、全面。欧盟产品环境足迹(Product Environmental Footprint,PEF)体系制订了产品环境足迹评价标准,评价内容包括自然资源、温室气体、酸化、颗粒物、光化学烟雾、富营养化、生态毒理、人体健康影响、电离辐射等10余种评价指标<sup>[30]</sup>。结合木竹产品环境影响的特点,在生产阶段主要考虑表1<sup>[31-32]</sup>所列的五种环境影响类型,生命周期清单因子归入各影响类型,采用表2中相应的特征化因子定量计算各影响类型指标值。

表1 木竹质重组材料环境影响评价指标选择  
Tab.1 Selection of environmental impact assessment indexes for wood bamboo recombinant materials

影响类型	清单因子
总一次能源消耗	电力、煤、石油、天然气等
全球暖化	木质原料等
酸化	氨氮、总氮、非甲烷总烃、有机挥发物、悬浮物等
可吸入颗粒	粉尘及细微颗粒物、非甲烷总烃、有机挥发物、甲醛
富营养化潜能	化学需氧量、生物需氧量、酚类、总磷、甲醛、挥发酚、悬浮物等

注:其他未列入因子,可考虑更多环境影响,如胶黏剂、固化剂、防腐剂、防虫剂、石蜡乳液防水剂、阻燃剂、防腐剂等归类为人体毒性和生态毒性。

表2 木竹质重组材料生命周期影响评价的特征化因子  
Tab.2 Characterizing factors of life cycle impact assessment of wood bamboo recombinant materials

环境影响类型	特征化因子
总一次能源消耗	能源折算为标准煤系数 (kg ce)
全球暖化	温室气体100 a内的全球变暖潜力 (kg CO <sub>2</sub> eq.)
酸化	物质的酸化潜力 (kg SO <sub>2</sub> eq.)
可吸入颗粒	物质转化为可吸入颗粒的潜力 (kg PM <sub>2.5</sub> eq.)
富营养化潜能	物质的富营养化潜力 (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.)

#### 4 木竹产品替代减排研究

作为一种新型替代材料,木竹质重组材料兼具高强度、高耐候性、高尺寸稳定性、阻燃性和高环保性等特点,其力学性能实现跨级增强,拉伸强度与耐候结构钢相当,已广泛应用于户外地板、交通护栏、风电叶片、建筑结构产品、园林产品、家具及家居装饰产品<sup>[33]</sup>。基于生产过程中能耗与CO<sub>2</sub>当量排放,木竹质重组材料作为生物质复合材料,具有低消耗、低能耗、低排放等特征。其中,在能耗方面,木竹制品仅为水泥的21.64%,钢铁的3.40%,玻璃的6.97%和陶瓷的6.71%;在碳排放方面,木竹制品仅为水泥的36.74%,钢铁的13.90%,玻璃的31.07%和陶瓷的32.62%。同时,从生产、运输、安装、维护,到最后处理的全生命周期角度分析,在上述各种材料中,仅有木(竹)质材料的碳存储大于碳释放,净碳排放为-14.89 kg/m<sup>3</sup>,具有明显固碳功能,是典型固碳储碳材料<sup>[34-36]</sup>。

产品和技术的资源环境问题需要对全过程及其技术进行系统全面、客观量化的分析,LCA结果和结论并非一成不变,会随着产品和技术不断发展产生变化。木质林产品替代减排作用表现在两方面:1)生产木质林产品所带来的资源环境影响普遍明显低于钢筋、水泥、塑料、混凝土等能源密集型材料;2)木质林产品的使用避免了以上各类能源密集型材料生产、运输和使用过程中的资源环境影响。短期来看,木质材料替代减排作用主要通过大量加工、使用来实现,木质能量和不同木质林产品可能在短时间内保持碳负债<sup>[5]</sup>,替代效应所带来的气候效益并不明显。但在较长时间尺度上,随着木质材料的使用,加之通过工艺改进等措施延长产品使用寿命,木质林产品替代效应反而比本身所储存的碳影响更大,其替代高耗能的非木质材料能够对降低化石能源消耗和温室气体排放做出贡献。

#### 5 森林及其产品净减排效应的集成评估

Chen等<sup>[37]</sup>从林分尺度对森林碳汇和林产品碳储集成核算方法的原理进行分析,描述了“不砍伐条件下的森林碳储”“次生林碳储+木质林产品全生命周期分析结果”“次生林碳储+木质林产品全生命周期分析结果+木质林产品替代减排效应”等三种情景下的碳储或碳排放。王珊珊等<sup>[38]</sup>在林产品生命周期碳足迹评价中,将时间因素和生物碳通量考虑在内,进行动态生命周期分析,认为林产品使用及对化石能源的替代有利于实现长期的气候减排,在100 a内可弥补因森林采伐造成的碳损失,从而实现碳中和。周国模等<sup>[39-40]</sup>研究了集成、重组、展开等三种技术条件下生产的竹板材和拉丝材,分析不同胸径毛竹产品碳转移率和碳储量模型,结合毛竹胸径的Weibull分布概率模型估算区域尺度伐后毛竹板材的碳储量。

#### 6 结语

当前对于木竹产品的研究多集中在工艺和技术改进,旨在不断提升材料各项物理力学性能,对于材料和产品全生命周期碳足迹和低碳绿色评价相关研究还较少,对于其固碳减排潜力相关研究则更为缺乏。已有关于木竹材产品碳储量相关研究多为全球和国家尺度,且多利用宏观统计数据进行估测,结果有较大不确定性。基于实地调查的林分尺度、企业微观层面的研究较为缺乏,更加微观的如不同质地、不同生产工艺的木竹质重组材料全生命周期碳足迹研究不足。现有研究较少提到量化木质林产品替代效应的时间价值,缺乏对其气候效益的数量化分析,在国家“双碳”目标战略背景下,缺乏替代效应“碳中和”时间的估计。此外,对木质林产品替代能源密集型材料的替代因子应分行业进行研究,预测其碳减排潜力。森林从光合作用、生长发育、采伐收获、运输、生产加工、使用废弃到分解释放的完整生命周期,即碳足迹,当前对于森林碳汇的研究呈现割裂状态,仅侧重于森林培育或产品加工的某一方面,而解读碳在森林中的足迹需要基于树木从生长到消亡全生命周期<sup>[41-42]</sup>。只有将森林碳汇动态变化、木质林产品的生命周期影响评价和替代减排效应作为整体进行集成动态分析,才可相对准确核算森林经营和木质林产品净减排效应及实现碳中和所需要的时间,从而对产业进行管理和动态评估。

在方法层面,LCA体系在具体操作层面存在一些

困难和质疑,主要表现在:1) LCA数据收集困难,尤其是难以找到合适的、尤其是本土化的基础数据库,导致很多LCA工作草草收场,甚至半途而废;2) 经过复杂的数据收集、采用无法透明追溯的数据库得到的LCA结果往往难以相信,并且包括ISO系列标准在内的多个LCA体系一直未能建立系统的数据质量评估方法,甚至缺乏严格的数据质量定义,易被质疑;3) 尽管理论上,LCA可以分析产品和技术的资源环境问题、提出改进建议,但实践中技术可行性、经济可行性才是常见的瓶颈问题,因此LCA方法还要准确定位自身作用。当前,在木材工业领域尚无国家标准、行业标准、团体标准和企业标准等碳计量标准发布,相关基础研究也较为滞后,亟待结合行业特点开展全生命周期碳排放核查。

在国家“双碳”战略政策背景下,木材工业领域LCA受到普遍关注。国外木材加工领域LCA应用包括木材产品碳平衡方法,地板、住宅<sup>[43]</sup>木制品LCA研究,研究范围从传统木材工业产品如木竹制品、木质与非木质复合材料,拓展到生物质能源等新兴领域。国内木材工业领域LCA研究则侧重于传统木材加工业地板、家具等领域,但尚存在理论和方法上的不足,以及结果不明确、数据质量不高等诸多问题。

木材加工不同领域的应用工艺和生产线不尽相同,每个阶段资源损耗和环境影响也不同,针对各木材加工细分领域应进行深入研究,以揭示不同加工模式的主要影响因子及作用,可为建立本土化生命周期评价模型提供依据。针对包括木竹质重组材料在内的木材加工业LCA研究大多参照其他产品的生命周期评价模型,其评价软件多使用欧美国家开发的如Gabi、Simapra等,且多借鉴欧美国家的LCA基础数据库,但考虑我国木材加工业实际情况,其消耗等量资源环境负荷不同。开展木竹质重组材料碳科学研究工作,对包括不同质地、不同生产工艺在内的重组材产品进行资源环境、技术性、减排潜力和替代效应进行集成动态评估,可推动木竹质重组材料产业创新发展进程,为探索木材工业领域碳中和路径提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 邓侃.做好固碳减碳的林业文章[N/OL].中国自然资源报(理论版),2021-11-19[2022-09-14].DOI:10.28291/n.cnki.ngtzy.2021.003775.
- [2] 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[N/OL].人民日报,2021-10-25[2022-09-14].http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\_5644613.htm..
- [3] 2030年前碳达峰行动方案[N/OL].人民日报,2021-10-27[2022-09-14].http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\_5644984.htm.
- [4] 杨红强,余智涵.全球木质林产品碳科学研究动态及未来的重点问题[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(04):219-228.
- [5] 陈家新,杨红强.全球森林及林产品碳科学研究进展与前瞻[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(04):1-8.
- [6] 张颖,李晓格,温亚利.碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究[J].北京林业大学学报,2022,44(01):38-47.
- [7] 白彦锋,姜春前,鲁德.木质林产品碳储量计量方法学及应用[J].世界林业研究,2006(05):15-20.
- [8] 白彦锋,姜春前,张守攻,等.气候变化谈判中木质林产品的相关概念及其碳储量核算[J].林业科学,2011,47(01):158-164.
- [9] 白彦锋.中国木质林产品碳储量[D].北京:中国林业科学研究院,2010.
- [10] 白彦锋,姜春前,张守攻.中国木质林产品碳储量及其减排潜力[J].生态学报,2009,29(01):399-405.
- [11] 杨红强,王珊珊.IPCC框架下木质林产品碳储核算研究进展:方法选择及关联利益[J].中国人口·资源与环境,2017,27(02):8.
- [12] 张小标,杨红强.基于GFPM的中国林产品碳储效能及碳库结构动态预测[J].资源科学,2015,37(07):1403-1413.
- [13] 王兰会,符颖佳,许双.林产品行业隐含碳的测定研究[J].林业经济评论,2014,4(02):37-42.
- [14] 杨红强,季春艺,杨惠,等.全球气候变化下中国林产品的减排贡献:基于木质林产品固碳功能核算[J].自然资源学报,2013,28(12):2023-2033.
- [15] 白冬艳,翟印礼,李智勇,等.基于木质林产品国际贸易隐含碳研究的国家碳核算模型[J].林业经济,2012(12):59-63.
- [16] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法,进展,展望[J].中国科学:地球科学,2022,52(06):1010-1020.
- [17] YAO Y,PIAO S,WANG T.Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests[J].Science Bulletin,2018,63(17):1108-1117.
- [18] 朴世龙,岳超,丁金枝,等.试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J].中国科学:地球科学,2022,52(07):1419-1426.
- [19] 张建,汪奎宏,李琴,等.我国竹材利用率现状分析与建议[J].林业机械与木工设备,2006(08):7-10.
- [20] 王小青,赵行志,高黎,等.竹木复合是高效利用竹材的重要途径[J].木材加工机械,2002(04):25-27.
- [21] 顾蕾,沈振明,周宇峰,等.浙江省毛竹竹板材碳转移分析[J].林业科学,2012,48(01):186-190.
- [22] 周宇峰,顾蕾,刘红征,等.基于竹展开技术的毛竹竹板材碳转移分析[J].林业科学,2013,49(08):96-102.
- [23] 李慧媛,黄思维,周定国.生命周期评价体系在我国木材加工领域的应用[J].世界林业研究,2013,26(02):54-59.
- [24] CÔTÉ W A,YOUNG R J,RISSE K B,et al.A carbon balance method for paper and wood products[J].Environmental Pollution,2002,116: S1-S6.
- [25] NEBEL B,WEGENER G,ZIMMER B.Life cycle assessment of wood floor coverings[J].International Journal of Life Cycle Assessment,2006,11(03):172-182.
- [26] 孙启祥.从生命周期角度评估木材的环境友好性[J].安徽农业大学学报,2001(02):170-175.
- [27] 王爱华.竹/木质产品生命周期评价及其应用研究[D].北京:中国林业科学研究院,2007.
- [28] 余翔.竹集成材地板和竹重组材地板生命周期评价(LCA)比较研究[D].福州:福建农林大学,2011.
- [29] 张方文.定向刨花板生命周期评价(LCA)及环境影响评价研

- 究[D].北京:中国林业科学研究院,2017.
- [30] 王莹,李慧洁,郭英玲,等.基于全生命周期的产品环境足迹研究[J].机电产品开发与创新,2018,31(06):38-39+43.
- [31] 国家林业和草原局.LY/T 3045—2018人造板生产生命周期评价技术规范[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [32] 国家林业和草原局.LY/T 3227—2020木地板生产生命周期评价技术规范[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [33] 张海雁,刘文金,陈新义.木-竹家具设计中木竹构件的配置策略[J].林产工业,2022,59(07):53-58.
- [34] 丁美荣.水泥行业碳排放现状分析与减排关键路径探讨[J].中国水泥,2021(07):46-49.
- [35] 刘志海.我国平板玻璃行业碳排放现状与减排措施[J].玻璃,2020,47(01):1-6.
- [36] 王彦静,刘宇,崔素萍,等.我国建筑陶瓷行业碳排放及减排潜力分析[J].材料导报,2018,32(22):3967-3972.
- [37] CHEN J,TER-MIKAELIAN M T,YANG H,et al.Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in Canada[J].Forestry:An International Journal of Forest Research,2018,91(02):193-205.
- [38] 王珊珊,张寒,聂影,等.林产品生物碳通量的动态生命周期评估[J].中国人口·资源与环境,2020,30(03):65-73.
- [39] 周国模,顾蕾.竹材产品碳储量与碳足迹研究[M].北京:科学出版社,2017.
- [40] 周国模.毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [41] 费本华,马欣欣,石雷,等.竹材碳足迹内涵及其对产业发展的调控作用[J].世界竹藤通讯,2020,18(02):12-17.
- [42] 费世民.竹产品全生命周期碳足迹研究进展及其测定框架[J].四川林业科技,2021,42(06):1-10.
- [43] 徐伟涛.基于LCA法的木结构建筑使用阶段碳排放探讨[J].林产工业,2021,58(02):36-38.

(责任编辑 陈悦)

(上接第82页)

## 参考文献

- [1] MIN S,ZACHARIA Z G,SMITH C D.Defining supply chain management:in the past,present,and future[J].Journal of Business Logistics,2019,40(01):1-12.
- [2] HALISCELIK E,SOYTAS M A.Sustainable development from millennium 2015 to Sustainable Development Goals 2030[J].Sustainable Development,2019,27(04):1-28.
- [3] SEURING S,MULLER M.From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management[J].Journal of Cleaner Production,2008,16(15):1699-1710.
- [4] MINCER J.The color of money:Sustainability has become more than a buzzword among corporations.It has become smart business[J].Wall Street Journal,2008,6.
- [5] YK A,DY B,MDS C,et al.A green dual-channel closed-loop supply chain network design model[J].Journal of Cleaner Production,2022,332:130062.
- [6] BATISTA L,BOURLAKIS M,SMART P,et al.In search of a circular supply chain archetype—a content-analysis-based literature review[J].Production Planning & Control,2018,29(06):438-451.
- [7] HE P,HE Y,XU H.Channel structure and pricing in a dual-channel closed-loop supply chain with government subsidy[J].International Journal of Production Economics,2019,213:108-123.
- [8] KUMAR A,MOKTADIR A,LIMAN Z R,et al.Evaluating sustainable drivers for social responsibility in the context of ready-made garments supply chain[J].Journal of Cleaner Production,2020,248:1-14.
- [9] DEVIKA K,JAFARIAN A,NOURBAKHSH V.Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques[J].European Journal of Operational Research,2014,235(03):594-615.
- [10] ZHALECHIAN M,TAVAKKOLI-MOGHADDAM R,ZAHIRI B,et al.Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty[J].Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review,2016,89:182-214.
- [11] SAHEBJAMNIA N,FATHOLLAHI-FARD A M,HAJIAGHAEI-KESHTELI M.Sustainable tire closed-loop supply chain network design:Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks[J].Journal of Cleaner Production,2018,196:273-296.
- [12] TALEZADEH A A,HAGHIGHI F,NIKI S.Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products[J].Journal of Cleaner Production,2019,207:163-181.
- [13] MIRJALILI S,LEWIS A.The whale optimization algorithm[J].Advances in engineering software,2016,95:51-67.
- [14] SHE J,CHUNG W,VERGARA H. Multiobjective record-to-record travel metaheuristic method for solving forest supply chain management problems with economic and environmental objectives[J].Natural Resource Modeling,2020,34(01).
- [15] MARDAN E,GOVINDAN K,MINA H,GHOLAMI-ZANJANI S M. An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem[J].Journal of Cleaner Production,2019,235(C).
- [16] TAUTENHAIN CAMILA P S,BARBOSA POVOA ANA PAULA,MOTA BRUNA,et al. An efficient Lagrangian-based heuristic to solve a multi-objective sustainable supply chain problem[J].European Journal of Operational Research,2021,294(01).
- [17] 林秋丽,方海,郭琼.基于钻石模型的广东传统家具产业可持续发展分析[J].林产工业,2021,58(10):27-32.
- [18] 蒋宏飞,陈勇,张曦等.“一带一路”背景下我国林产品加工业产业转移研究[J].林产工业,2022,59(12):58-63.
- [19] 郑庆华.我国造纸供应链中木材资源的物质流分析[J].中国造纸,2013,32(06):21-27.
- [20] MARINI F,WALCZAK B.Particle swarm optimization (pso). a tutorial[J].Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2015,149:153-165.
- [21] SAHANA S K.Ba-PSO:A Balanced PSO to solve multi-objective grid scheduling problem[J].Applied Intelligence,2021(12):4015-4027.
- [22] 邓雪,林影娴.基于改进粒子群算法的复杂现实约束投资组合研究[J].运筹与管理,2021,30(04):142-147.
- [23] 万春林,张卫.基于改进粒子群算法的基数受限最优化问题研究[J].统计与决策,2021,37(20):20-24.
- [24] 卢志刚,申康.基于粒子群蚁群算法的供应链合作伙伴选择研究[J].计算机工程与科学,2016,38(05):946-953.
- [25] KRSTIC M,KANELAKOPOULOS I,KOKOTOVIC P V.Nonlinear and Adaptive Control Design[M].New York:Wiley-Interscience Publication,1995.
- [26] 李炳宇,萧蕴诗,吴启迪.一种基于粒子群算法求解约束优化问题的混合算法[J].控制与决策,2004(07):804-807.

(责任编辑 余珊)