

人造板工业生命周期评价研究进展

劳万里,段新芳*,李晓玲,张冉

(中国林业科学研究院木材工业研究所,北京 100091)

摘要:随着国家环境保护政策要求的日益严格和消费者健康、环保意识的快速提升,定量评估人造板生产过程的环境负荷,可为人造板行业实现清洁生产和绿色消费提供科学指导,并对人造板行业实现高质量发展具有重要意义。作为一种权威的环境管理工具,生命周期评价(life cycle assessment, LCA)已广泛应用于各个领域。国内外学者将生命周期评价理念和方法引入人造板工业,开展了一系列研究,取得了卓有成效的成果。本研究系统总结了近年来胶合板、纤维板和刨花板等主要人造板产品生命周期评价的研究进展。在此基础上,提出了人造板生命周期评价未来的研究方向和发展趋势。

关键词:生命周期评价;胶合板;纤维板;刨花板;人造板;环境负荷

中图分类号:S781

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)01-0205-07

Research Progress of the Life Cycle Assessment of Wood-Based Panels Industry

LAO Wan-li, DUAN Xin-fang*, LI Xiao-ling, ZHANG Ran

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

Abstract: With the increasingly stringent of environmental protection policies and the improvement of consumer health and environmental protection awareness, quantitative analysis of environmental load in the production of wood-based panel (WBP) can provide the reference for cleaner production and green consumption, which is very important for high quality development of China's WBP industry. As a powerful tool for environmental management, Life Cycle Assessment (LCA) is widely used in different kinds of fields. Researchers have carried lots of studies on LCA of WBP and have obtained abundant research achievements. This study introduced the progress of LCA of plywood, fiberboard and particle board. On this basis, the future research directions and development trends of LCA of WBP were put forward.

Key words: life cycle assessment; plywood; fiberboard; particle board; wood-based panels; environment impact

人造板是以木材或非木材植物材料为主要原料,加工成各种材料单元,施加(或不施加)胶黏剂和其他添加剂,组坯胶合而成的板材或成型制品,主要包括胶合板、刨花板、纤维板等,现已广泛用于室内装饰装修、家具、建筑、包装、交通运输、文体场馆等领域^[1]。近年来,我国人造板产业获得了长足的发展,现已成为世界人造板生产和消费第一大国,形成了较为完备的产业体系^[2]。随着国家环境保护政策

要求的日益严格和消费者健康、环保意识的快速提升,通过科学的分析方法,定量评估人造板生产过程的环境影响,可为人造板行业实现清洁生产和绿色消费提供科学指导,并对人造板行业贯彻新发展理念,构建新发展格局,实现高质量发展具有重要意义。

作为一种权威的环境管理工具,生命周期评价(life cycle assessment, LCA)可以评估产品从原材

收稿日期:2021-10-27 修回日期:2021-11-17

基金项目:国家林草局重点课题“碳中和木竹替代政策和相关技术研究”。

第一作者:劳万里,高级工程师,博士在读。研究方向:木制品生命周期评价。E-mail:laowl@caf.ac.cn

*通信作者:段新芳,研究员,博士。研究方向:木材标准化及产业政策。E-mail:duanxf@caf.ac.cn

料获取到生产、使用和报废处置等整个生命周期中造成的环境影响,识别环境负荷较大的单元过程,进而提出针对性的建议和举措,并预测改进举措的效果,可为相关决策提供科学依据,已广泛应用于各个领域^[3-4]。国外学者积极将 LCA 方法引入人造板行业并开展了大量的研究工作,亦取得了丰硕的研究成果。然而,国内关于人造板 LCA 研究较为匮乏,现有少量文献报道涉及胶合板和定向刨花板。

笔者概述了近年来利用 LCA 方法研究胶合板、纤维板和刨花板等主要人造板产品环境负荷的新进展,在此基础上,提出了人造板 LCA 研究未来的方向和发展趋势,旨为相关研究提供参考和借鉴。

1 人造板 LCA 研究现状

1.1 胶合板

Wilson 等^[5]通过对美国代表性企业进行调研,梳理了针叶材胶合板制造过程的生命周期清单,为后续由胶合板构成的墙、地板、屋顶等产品的生命周期评价奠定了基础。Puettmann 等^[6]调研了美国东南地区 8 个代表性胶合板企业,发现干燥和热压工序能耗和排放较大;胶合板生产过程的环境负荷远大于森林经营阶段;生产 1 m³ 胶合板固碳 698 kg CO₂,耗能 3.8 GJ,耗电 139 kW/h,需要原木和单板 724 kg。美国太平洋西北地区生产 1 m³ 胶合板固碳量少于东南地区,为 674 kg CO₂;耗能也小于东南地区,为 2.2 GJ;耗电量比东南地区高,为 145 kW/h;所需原木量少于东南地区,为 640 kg^[7]。Bergman 等^[8]的研究结果表明,美国西北地区生产 1 m³ 胶合板的总体环境影响、能耗小于东南地区;产生的固废多于东南地区;消耗的非可再生材料多于东南地区;消耗可再生材料和淡水比东南地区少。

Bergman 等^[9]对美国太平洋西北地区单板层积材(LVL)进行了生命周期评价,结果表明,生产 1 m³ LVL 总耗能 8.97 GJ/m³,其中 52.5%来自木质燃料,41.8%来自非可再生化石燃料,3.5%来自核能,1.8%来自水电、风能、太阳能和地热等;排放 CO₂ 199 kg;与单板干燥过程相比,LVL 制备阶段能耗较小,原因在于单板干燥过程耗能较高,且 LVL 制备阶段在袋式除尘器外安装了排放控制装置;LVL 生产过程排放远大于森林经营阶段,主要来自锅炉、热压和锯切工序。美国东南地区与太平洋西北地区情况有所不同,1 m³ LVL 总耗能 9.98 GJ/m³,其中 36.2%来自木质燃料,56.2%来自非可再生化石燃料,7.4%来自核能,0.2%来自水电、风能、太阳能和地热等;排放 CO₂ 310 kg^[10]。

Jia 等^[11]对中国江苏宿迁某胶合板厂进行了调

研,结果表明,单板干燥是胶合板生产中环境影响最大的过程,单板复合过程是环境影响最大的工序,其次为原木剥皮工序。建议采用以裂解生物质油生产的胶黏剂来替代酚醛树脂,采用胶合湿木材的新技术,工厂的位置应靠近木材资源集聚区等措施来改善胶合板生产过程的环境影响。也有研究表明,真空吸塑成型法制备胶合板比传统制备方法生产胶合板的环境负荷显著降低,主要原因在于真空吸塑成型法可以胶合湿单板,减少了单板干燥过程的能耗^[12]。

总体来看,关于胶合板生命周期评价研究较少,现有的研究主要以美国为主,其他国家鲜有报道;研究的系统边界多为从原料获取到板材生产阶段,几乎没有涉及使用和废弃回收阶段;所用功能单元多为 1 m³,少量研究使用了 1 000 平方英尺(0.884 m³);大多使用 SimaPro 软件,数据来源主要为工厂调研,辅助性数据来自公开发表的文献、报告,以及相关的数据库等;主要使用质量和经济法进行分配,评价方法多为 TRACI;所选的主要环境影响类别为:全球气候变暖、酸化、富营养化、臭氧损耗、光化学烟雾等。

1.2 纤维板

西班牙学者 Rivela 等^[13]研究表明,中密度纤维板(MDF)生产中纤维制备阶段对人体健康、生态系统质量和资源的影响最大,相对贡献度分别达 91.1%、94.8%和 94.1%;对生态系统的影响主要是由于脲醛树脂(UF)的使用;此外,产品运输和电力生产的环境影响也较大。美国学者 Wilson^[14]研究发现,MDF 生产过程中生物源 CO₂、CO 和干燥,以及热压过程产生的 VOC、悬浮颗粒物、甲醛和甲醇等的排放较大,化石源的 CO₂、氮氧化物、硫氧化物的排放较小。美国学者 Puettmann 等^[15]研究表明,MDF 生产过程的排放大于森林经营阶段,主要源自锅炉、干燥和热压工序;生产能耗 40%来自木材燃料,54%来自化石燃料,6%来自核能,其他能源不足 1%。巴西学者 Piekarski^[16]发现,MDF 生产能耗中 76.6%为热能,23.4%为电能;生产过程的主要排放是 CO₂,其中天然气贡献了 96.7%的化石燃料源 CO₂,通过使用木材燃料替代天然气,可以减少源自能源工厂排放的 CO₂,及对非可再生资源的依赖度。德国学者 Diederichs^[17]和美国学者 Bergman 等^[8]研究证实,就全球气候变暖、酸化、富营养化、光化学烟雾、臭氧层破坏、非生物资源消耗(化石和非化石)而言,MDF 的指标值均低于 HDF。爱尔兰学者 Murphy 等^[18]研究发现,对于 MDF 生产过程的温室气体排放,合成树脂的使用贡献最大,

占比达 62%, 电力消耗占 19%, 生物质原材料占 8%; 对于累计能量需求, 合成树脂生产过程占比达 66%, 其次为电力使用(15%), 最后为生物质的使用(6%)。伊朗学者 Kouchaki-Penchah 等^[19]研究表明, MDF 生产中纤维准备阶段环境影响较大; UF 胶的生产是主要的环境热点, 天然气、电力和运输及生产过程对于非生物资源损耗、酸化、臭氧破坏和光化学烟雾的贡献较大。此外, 旋转干燥器、热压机、刨片机和锤式粉碎机、真空泵及柴油燃料的使用导致生产过程的排放较大。使用木材加工剩余物等其他材料生产热能可以降低 MDF 生产过程的排放量。美国学者 Puettmann 等^[20]研究表明, 由于 MDF 生产中使用了大量的化石燃料, 导致板材制备阶段的环境负荷最大; 纤维制备阶段的环境负荷因分配方法不同而异, 经济分配法计算出的结果显著低于质量分配法; 对于 MDF 生产过程来说, 不采取任何分配方法时, 与质量分配法的计算值相比, 各环境影响指标略有下降; 整体来看, 从原料获取到板材生产阶段的生命周期内, 质量法和经济法得到的结果相似。巴西学者 Piekarski 等^[21]研究发现, MDF 生产过程中主要的环境热点为热能工厂的天然气消耗、UF 胶的使用、能量消耗、木片消耗, 以及木片的运输。故可通过避免热能工厂的天然气消耗、减少电力消耗, 缩减木片原料的运输距离等措施来改善环境表现。此外, 该研究还与刨花板(PB)进行了对比, 发现 PB 生产过程的环境负荷更小。日本学者 Nakano 等^[22]研究表明, 胶黏剂对 MDF 生产过程各环境影响指标的影响均最大, 相对贡献度在 28%~55%; 随着产品环保等级的提升, 产品对人体健康的影响大幅下降。

西班牙学者 Gonzalez-Garcia 等^[23]对硬质纤维板(HB)生产过程进行了生命周期评价, 结果表明: 木材准备阶段贡献了超过 50% 的环境负荷, 其次为板材成型阶段, 再次为板材终处理阶段; 酚醛树脂生产、电力生产、木纤维制备以及生物质燃烧产热工序是主要的环境热点。Gonzalez-Garcia 等^[24]还探讨了以双组分胶黏剂(基于漆酶活化酚醛体系)制备 HB 的环境影响, 结果表明, 与传统 HB 的制备过程相比, 该方法的环保性能全面提升。漆酶、热能和电能的生产及切片阶段的环境影响较大。

巴西学者 Freire 等^[25]分析了 3 种椰子碎料为基础的纤维板的环境表现, 并与传统纤维板进行了对比。结果表明, 与传统密度板相比, 升级优化后的椰子碎料基中密度板和高密度板具有一定的环境优势, 但以椰子壳为基础材料制备纤维板仍需进一步优化, 以提升其在质量分配法时的环境性能。可以

减少椰子碎料的运输距离, 优化处理过程, 以及耕作种植的过程。智利学者 Casas-Ledon 等^[26]以桉树皮纤维制造新型绝缘材料, 探讨了 4 种密度板材的环境影响。结果表明, $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的板材环境负荷最大, 原因在于基本单元的质量更大。板材制造、森林经营和生物质运输阶段具有较大的环境负荷, 分别主要是因为合成纤维用于黏合树皮纤维, 森林经营阶段大量的农药使用, 以及较长的生物质运输距离。研究还发现与传统绝缘材料相比, $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 密度板材具有较低的内置能量和碳排放。因此, 桉树皮纤维是一种生产绝缘板材非常有前景的材料。

国内学者对 MDF 生命周期评价的研究较少。薛拥军等^[27]依据生命周期评价的原则和框架, 初步构建了我国现有的纤维板生产系统在环境效益、经济效益和技术性能方面生命周期综合评价的模式, 并对 MDF 生产和使用过程的资源利用、能源消耗、污染物的产生、废弃物的利用等因素对环境的影响进行了简要分析。刘文金^[28]对 MDF 生态循环周期评价进行了理论研究, 确定了研究过程中采样点选择、数据收集、编目分析、评价模型建立、权重系数确定等具体工作的方法, 明确了 MDF 生态循环周期评价综合分析的内容和要求。Zhang 等^[29]的研究表明, MDF 生产中影响环境的因素主要有固碳量、种苗、电力和木材燃料的使用。今后可以改变化肥的种类和使用方法, 减少电力消耗及木材燃料的使用来提升环境表现。

总体来看, 研究主要集中在欧美国家; 研究的系统边界大多选用从原料获取到板材生产阶段或仅为板材生产阶段, 很少选用从原料获取到废弃回收阶段的全生命周期阶段; 所用功能单元以 1 m^3 为主; 所用软件大多为 SimaPro, 数据来源主要来自工厂调研, 辅助性数据来自公开发表的文献、报告, 以及相关的数据库等; 主要使用质量分配法; 评价方法主要为 CML、TRACI 和 USEtox; 主要环境影响类别为: 全球气候变暖、酸化、富营养化、臭氧损耗、光化学烟雾、生态毒性和人体毒性等。

1.3 刨花板

西班牙学者 Rivela 等^[30]的研究表明, PB 生产过程后处理阶段对人体健康的损害最大, 板材成型阶段对生态环境质量和资源的影响最大。综合考虑环境、经济和社会效益, 森林剩余物用于生产 PB 比作为燃料更合适。美国学者 Wilson^[31]从资源、排放、能源和碳足迹的角度, 研究了 PB 生产过程的生命周期清单, 为后续生命周期评价奠定了基础。巴西学者 Silva 等^[32]研究表明, 除生态毒性外, PB 生

产阶段对各环境影响指标影响远大于森林经营阶段,主要原因在于重燃油的使用和 UF 胶的制备;森林经营阶段草甘膦除草剂的使用产生了较强的生态毒性;以木质颗粒或柴油替代重燃油可以显著减少环境影响。美国学者 Puettmann 等^[33]研究表明, PB 生产过程的排放主要源自锅炉、干燥、热压过程; PB 生产所需能源的 25% 来自生物质, 68% 来自非可再生化石燃料, 6% 来自核能, 1% 来自太阳能、风能等, 生产 1 m³ PB 固碳 1 289 kg CO₂。伊朗学者 Kouchaki-Penchah 等^[34]研究显示, 减少或避免使用 UF 胶, 优化电机使用效率, 减少停工时间, 使用环保运输车辆, 减少运输距离, 采用排放控制系统, 提升能源利用效率等措施可以提升 PB 生产过程的环境表现。巴基斯坦学者 Hussain 等^[35]研究表明, UF 胶生产、原材料运输和板材配送阶段的环境负荷最大; 重燃油、天然气的消耗对非生物资源损耗、光化学烟雾、臭氧破坏、海洋水生生态毒性等指标的影响较大; 旋转干燥器和热压工序的排放最大; 生产 1 m³ PB 耗能 15 632 MJ。日本学者 Nakano 等^[22]的研究表明, 胶黏剂对刨 PB 生产过程各环境指标的影响均最大, 相对贡献度在 28%~55%; 随着 PB 环保等级的逐步提升, 产品对人体健康的影响大幅下降。西班牙学者 Gonzalez-Garcia 等^[36]对比了巴西和西班牙 PB 生产过程的环境影响, 发现巴西 PB 生产过程使用了重油等化石燃料作为能源, 导致非生物资源损耗、酸化、全球气候变暖和光化学烟雾的指标值更高, 而西班牙 PB 生产过程中使用的柴油量较大, 导致富营养化、生态毒性和人体健康毒性的指标值更高。

美国学者 Kline^[37]收集了定向刨花板(OSB)生产中物质、能源及碳循环等生命周期清单, 为 OSB 生命周期评价奠定了基础。卢森堡学者 Benetto 等^[38]的研究发现, 与传统干燥技术相比, 采用蒸汽干燥生产 OSB 时气候变化和人体健康损害显著降低, 分别为 15%~20% 和 50%~75%。美国学者 Earles 等^[39]研究证明, 与传统 OSB、乙醇和乙酸的生产过程相比, OSB 生物炼制技术可以减少 OSB 制造过程 VOC 排放, 进而可以显著改善人体和生态系统健康; 但该技术也增加了温室气体排放, 需要优化工艺来控制。美国学者 Puettmann 等^[40]的研究表明, 与 PB 相似, OSB 生产过程的排放(主要来自干燥和热压过程)远大于森林经营阶段; OSB 生产过程的所需能量 38% 来自可再生燃料, 49% 来自非可再生化石燃料。生产 1 m³ OSB 固碳 1 142 kg CO₂。爱尔兰学者 Murphy 等^[18]的研究发现, OSB 生产过程的温室气体排放比 MDF 少, 主要是由于

OSB 电力和树脂量的使用量更少; 电力使用产生的温室气体排放量约占总排放量的 34%, 树脂使用产生的温室气体排放量占比 35%。美国学者 Bergman^[8]的研究发现, 生产 1 m² OSB(9.5 mm 厚)累计能量需求 74.0 MJ, 其中 50% 源自生物质; 全球气候变暖潜值 1.97 kg CO₂; 板材生产过程使用木质生物质能源可以减少对气候变化的影响。张方文等^[41]研究表明, 酸化效应、光化学臭氧创造潜力和全球气候变暖是 OSB 生产中最主要的环境影响类别; 主要环境影响工序为施胶、热压成型和刨片。可通过提高机械设备的能源转化率, 减少火力发电和能源工厂燃烧中 SO₂ 的排放, 减少胶黏剂生产过程中的氮氧化物 NMHC 和碳氢化合物 CH 等一次大气污染物, 减少生产过程中燃烧煤和木屑所直接排放的 CO₂; 提高再生能源在电力中的比例等措施, 降低 OSB 生产过程的环境负荷。张方文等^[42]研究发现, 我国 OSB 企业消耗的不可再生能源更多, 欧洲 OSB 企业生产偏向使用清洁的天然气能源; 2 家 OSB 企业生产中 CO₂ 排放量接近; 我国企业 OSB 产品产生的酸化效应、富营养化和全球气候变暖的环境影响值相对较高, 臭氧层损耗和光化学烟雾的环境影响值相对较低。巴西学者 Ferro 等^[43]研究发现, 用于提升木材防腐性能的拟除虫菊酯白蚁消除剂的生产对臭氧损耗、自由水富营养化、人体毒性、淡水毒性的影响最大, 采用硼基白蚁消除剂可以显著提升 OSB 生产过程的环境表现。

德国学者 Diederichs^[17]对比分析了 PB、三聚氰胺饰面刨花板和 OSB 的环境影响, 结果表明, 全球气候变暖: PB<OSB<三聚氰胺饰面刨花板; 酸化和光化学烟雾、非生物资源损耗(非化石燃料与化石燃料): PB<三聚氰胺饰面刨花板<OSB; 富营养化和臭氧损耗: OSB<PB<三聚氰胺饰面刨花板。

中国香港学者 Hossain 等^[44]研究证明, 以废弃木材和氧化镁水泥为原料, 采用 CO₂ 固化技术制备水泥刨花板的技术可行性; 与传统硅酸盐水泥刨花板相比, 采用新技术制备的水泥刨花板可节省 9% 的温室气体排放。巴西学者 Silva 等^[45]研究表明, 以甘蔗渣为原料生产 PB 的环境性能优于传统 PB, 故而甘蔗渣基 PB 可以替代传统 PB; 甘蔗渣基 PB 生产制备阶段是环境负荷最大的阶段; 建议甘蔗渣的添加比例为 75%。巴西学者 Souza 等^[46]研究证明, 采用环氧树脂油墨废弃物和木材废弃物生产 PB 的技术可行性, 及环境、社会和经济方面的优越性。巴西学者 Dossantos 等^[47]对比分析了甘蔗渣基 PB 和松木基 PB 的环境影响, 结果表明, 甘蔗渣基 PB 的环境负荷更小, 影响环境表现的主要是原材料的

运输距离和 UF 胶黏剂的使用量。

总体来看,研究主要集中在欧美国家,亚洲日本、中国等也有少量研究;与胶合板和纤维板相似,研究的系统边界很少选用从原料获取到废弃回收阶段的全生命周期阶段;所用功能单元以 1 m^3 为主;大所用软件多为 SimaPro 和 GaBi,数据来源主要来自工厂调研,辅助性数据来自公开发表的文献、报告,以及相关的数据库等;主要使用质量分配法和经济分配法;评价方法主要为 CML、USEtox 和 TRACI;主要环境影响类别为:全球气候变暖、非生物资源损耗酸化、富营养化、臭氧损耗、光化学烟雾、生态毒性和人体毒性等。

此外,美国学者 Taylor 等^[48]探讨了人造板 LCA 评价过程中质量与经济分配法的结果差异,表明使用木质碎料生产的人造板(如纤维板)采用经济分配法时环境负荷稍有下降;非采用木质废料生产的人造板(如胶合板)采用经济分配法时环境负荷有所上升。建议木制品 LCA 评价时采用质量分配法与经济分配法相结合。

2 展望

作为一种权威的环境管理工具,生命周期评价在人造板行业中展现出极大的应用潜力。国内外学者积极将生命周期评价理念和方法引入人造板工业,开展了一系列研究,取得了卓有成效的成果。然而,整体来看,现有人造板生命周期评价研究仍相对薄弱,未来的研究可从以下几个方面开展。

1)推动生命周期评价在人造板及其制品中的深度应用。加强生命周期评价在胶合板、功能型人造板、秸秆人造板,以及木地板、木门、衣柜和橱柜等领域的应用研究。作为最主要的人造板品种之一,当前关于胶合板生命周期评价研究非常薄弱。而胶合板是人造板中工业化程度最低,劳动密集度最高的产业,未来应着重加强胶合板生命周期评价研究,引领胶合板产业高质量发展;随着人造板工业的逐渐发展,人造板的产品种类日趋丰富,应将生命周期评价理念积极引入其他人造板产品及不同用途人造板,如秸秆人造板、饰面人造板、功能型人造板等;人造板制品直接面向消费者,与消费者的生活息息相关。应对主要人造板制品进行生命周期评价,帮助消费者科学认识人造板制品的环境性能。

2)加强人造板生产新技术、新工艺、新原料的生命周期评价研究。随着消费者对家具产品要求日益升高,倒逼人造板工业研发新技术、新工艺、新原料,不断提高产品质量,来满足市场的新需求。因此,应加强将生命周期评价在生产新技术、新工艺、新原料

方面的应用研究,引领新技术、新工艺及新原料绿色化和环保化。

3)拓宽人造板生命周期评价研究的系统边界。当前研究多针对人造板生产过程,少量研究涉及木质原材料的获取过程即森林经营阶段,对后续使用维护和废弃处置阶段的研究亦不足。今后,应进一步扩展人造板生命周期评价研究的系统边界,开展全生命周期的评价研究,以便生产者、消费者、行业管理者和政策制定者等有关人士全方位认识人造板的环境性能。

4)研发人造板专用生命周期评价软件。当前人造板生命周期评价研究均采用通用生命周期评价软件,而每个产品都有其独特性,故研究的精确度有待进一步提高。因此,今后可结合人造板的特点,开发专用评价软件,进一步提高研究的可靠度。

5)构建人造板行业生命周期评价标准体系。目前人造板生命周期评价主要参照 ISO 14040—14044 系列标准和 GB/T 24040—24044 系列标准。国内关于人造板行业的生命周期评价标准仅有 1 项 LY/T 3045—2018《人造板生产生命周期评价技术规范》。今后,应进一步丰富人造板行业生命周期评价标准,推动人造板行业生命周期评价的标准化和规范化。

6)完善世界人造板行业生命周期数据库。现有生命周期研究多集中在欧美国家,而中国、俄罗斯等国的研究基础较薄弱。今后,应进一步加大力度推广生命周期评价方法在上述国家人造板行业的应用,丰富和完善世界人造板行业生命周期数据库。

参考文献:

- [1] 周定国,华毓坤.人造板工艺学[M].2版.北京:中国林业出版社,2011.
- [2] 钱小瑜.调整结构积极创新推动我国人造板产业升级[J].林产工业,2015,42(3):3-10.
QIANG X Y. Promoting wood-based panel industry upgrading through structure adjustment and positive innovation[J]. China Forest Products Industry, 2015, 42(3): 3-10. (in Chinese)
- [3] 江映其,雷亚芳,孟祥彬.基于生命周期评价的 3 种木质类家具环境影响比较研究[J].西北林学院学报,2014,29(4):232-236.
JIANG Y Q, LEI Y F, MENG X B. Lifecycle assessment based study of the influences of three wooden furniture on environment[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 232-236. (in Chinese)
- [4] 孙建平,高万辉.家具产品生命周期成本分析[J].西北林学院学报,2012,27(5):222-225.
SUN J P, GAO W H. Life cycle cost analysis on furniture products[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 222-225. (in Chinese)

- [5] WILSON J B, SAKIMOTO E T. Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood plywood production[J]. *Wood and Fiber Science*, 2005(37):58-73.
- [6] PUETTMANN M, KAESTNER D, TAYLOR A M. Life cycle assessment of softwood plywood production in the US south-east[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2016:1-47.
- [7] PUETTMANN M, KAESTNER D, TAYLOR A M. Life cycle assessment of softwood plywood production in the US pacific northwest[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2016:1-47.
- [8] BERGMAN R, TAYLOR A M, KAESTNER D. Life cycle impacts of North American wood panel manufacturing[J]. *Wood and Fiber Science*, 2016, 48:40-53.
- [9] BERGMAN R, ALANYA-ROSENBAUM S. . Cradle-to-gate life-cycle assessment of laminated veneer lumber produced in the pacific northwest region of the United States[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2017:1-89.
- [10] BERGMAN R, ALANYA-ROSENBAUM S. Cradle-to-gate life-cycle assessment of laminated veneer lumber produced in the southeast region of the United States[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2017:1-89.
- [11] JIA L, CHU J, MA L, *et al.* Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(11):2037.
- [12] POMMIER R, GRIMAUD G, PRINCAUD M, *et al.* LCA (Life cycle assessment) of EVP-engineering veneer product: plywood glued using a vacuum moulding technology from green veneers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 124:383-394.
- [13] RIVELA B, MOREIRA M T, FEIJOO G. Life cycle inventory of medium density fiberboard[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(3):143-150.
- [14] WILSON J B. Life-cycle inventory of medium density fiberboard in terms of resources, emissions, energy and carbon [J]. *Wood and Fiber Science*, 2010, 42:107-124.
- [15] PUETTMANN M, ONEIL E, WILSON J. Cradle to gate life cycle assessment of U. S. medium density fiberboard production[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2013:1-43.
- [16] PIEKARSKI C M, FRANCISCO A C, LUZ L M, *et al.* Environmental profile analysis of MDF panels production; study in a Brazilian technological condition[J]. *Cerne*, 2014, 20(3):409-418.
- [17] DIEDERICHS S K. 2010 Status quo for life cycle inventory and environmental impact assessment of wood-based panel products in Germany[J]. *Wood and Fiber Science*, 2014, 46(3):340-355.
- [18] MURPHY F, DEVLIN G, MCDONNELL K. Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 92:134-141.
- [19] KOUCHAKI-PENCHAHA H, SHARIFI M, MOUSAZADEH H, *et al.* Gate to gate life cycle assessment of flat pressed particleboard production in Islamic Republic of Iran[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112:343-350.
- [20] PUETTMANN M, BERGMAN R, ONEIL E. Cradle to gate life cycle assessment of North American cellulosic fiberboard production[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2016:1-66.
- [21] PIEKARSKI C M, FRANCISCO A C D, LUZ L M D, *et al.* Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575:103-111.
- [22] NAKANO K, AADO K, TAKIGAWA M, *et al.* Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23:957-969.
- [23] GONZALEZ-GARCIA S, FEIJOO G, WIDSTEN P, *et al.* Environmental performance assessment of hardboard manufacture[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2009, 14:456-466.
- [24] GONZALEZ-GARCIA S, FEIJOO G, HEATHCOTE C, *et al.* Environmental assessment of green hardboard production coupled with a laccase activated system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(5):445-453.
- [25] FREIRE A L F, JUNIRO C P A, ROSA M F, *et al.* Environmental assessment of bioproducts in development stage: the case of fiberboards made from coconut residues[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 153:230-241.
- [26] CASAS-LEDON Y, SALGADO K D, CEA J, *et al.* Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark fibers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249:119356.
- [27] 薛拥军, 向仕龙, 刘文金. 中密度纤维板产品的生命周期评价[J]. *林业科技*, 2006, 31(6):47-49.
- XUE Y J, XIANG S L, LIU W J. Life cycle assessment of MDF[J]. *Forestry Science & Technology*, 2006, 31(6):47-49. (in Chinese)
- [28] 刘文金. 中密度纤维板生态循环周期评价理论的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2006, 26(4):117-120.
- LIU W J. The theory of life cycle assessment (LCA) for MDF [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2006, 26(4):117-120. (in Chinese)
- [29] ZHANG X, ZHANG W, XU D. Life cycle assessment of complex forestry enterprise: a case study of a forest-fiberboard integrated enterprise[J]. *Sustainability*, 2020, 12(10):4147.
- [30] RIVELA B, HOSPIDO, MOREIRA, *et al.* Life cycle inventory of particleboard: A case study in the wood sector[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(2):106-113.
- [31] WILSON J B. Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon[J]. *Wood and Fiber Science*, 2010, 42:90-106.
- [32] SILVA D A L, LAHR F A R, GARCIA R P, *et al.* Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(7):1404-1411.
- [33] PUETTMANN M, ONEIL E, WILSON J B. Cradle to gate life cycle assessment of U. S. particleboard production[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2013:1-44.
- [34] KOUCHAKI-PENCHAHA H, SHARIFI M, MOUSAZADEH

- H, *et al.* Life cycle assessment of medium-density fiberboard manufacturing process in I. R. Iran[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 351-358.
- [35] HUSSAIN M, MALIK R N, TAYLOR A M. Environmental profile analysis of particleboard production; a study in a Pakistani technological condition[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23: 1542-1561.
- [36] GONZALEZ-GARCIA S, FERRO F S, SILVA D A L, *et al.* Cross-country comparison on environmental impacts of particleboard production in Brazil and Spain[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 150: 104434.
- [37] KLINE D E. Gate-to-gate life cycle inventory of oriented strand board production[J]. *Wood and Fiber Science*, 2005, 37: 74-84.
- [38] BENETTO E, BECKER M, WELFRING J. Life cycle assessment of oriented strand boards (OSB): from process innovation to eco-design[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(15): 6003-6009.
- [39] EARLES J M, HALOG A, SHALER S. Improving the environmental profile of wood panels via co-production of ethanol and acetic acid[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22): 9743-9749.
- [40] PUETTMANN M, ONEIL E, KLINE D E, *et al.* Cradle to gate life cycle assessment of oriented strand board production from the southeast[R]. Corvallis, OR; CORRIM, 2013: 1-35.
- [41] 张方文, 陈水龙, 张海孝, 等. 定向刨花板生产过程的生命周期评价[J]. *木材工业*, 2017, 31(3): 31-34.
ZHANG F W, CHEN S L, ZHANG H X, *et al.* Lifecycle assessment of oriented strand board production[J]. *China Wood Industry*, 2017, 31(3): 31-34. (in Chinese)
- [42] 张方文, 张亚慧, 于文吉. 基于生命周期评价的 OSB 生产环境影响分析[J]. *木材工业*, 2017, 31(5): 22-26.
ZHANG F W, ZHANG Y H, YU W J. Environmental impacts of oriented strand board based on life cycle assessment[J]. *China Wood Industry*, 2017, 31(5): 22-26. (in Chinese)
- [43] FERRO F S, LOPES SILVA D A L, ROCCO LAHR F A, *et al.* Environmental aspects of oriented strand boards production—a Brazilian case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 710-719.
- [44] HOSSAIN M U, WANG L, YU I K M, *et al.* Environmental and technical feasibility study of upcycling wood waste into cement-bonded particleboard[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 173: 474-480.
- [45] SILVA D A L, LAHR F A R, PAVAN A L R, *et al.* Do wood-based panels made with agro-industrial residues provide environmentally benign alternatives? an LCA case study of sugarcane bagasse addition to particle board manufacturing[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19: 1767-1778.
- [46] SOUZA A M, MARIA F. Nascimento, Diego H. Almeida, *et al.* Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: a cleaner production alternative[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 549-562.
- [47] DOSSANTOS M F N, BATTISTELLE R A G, BEZERRA B S, *et al.* Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum spp.*) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64: 345-355.
- [48] TAYLOR A M, BERGMAN R, PUETTMANN M E, *et al.* Impacts of the allocation assumption in LCAs of wood-based panels[J]. *Forest Products Journal*, 2017, 67(5-6): 390-396.