

生命周期评价体系在我国木材加工领域的应用*

李慧媛 黄思维 周定国

(南京林业大学木材工业学院,南京 210037)

摘要:生命周期评价(LCA)是评价产品、工艺等对能源与材料使用和环境排放影响的一种评价体系,在木材加工领域的应用始于上世纪90年代。文中论述了欧美等发达国家在木材加工领域LCA的应用,从研究林产品碳平衡方法开始,细化到木质面板、地板生产以及住宅用木制品的LCA研究;研究范围也从传统的木材加工行业到新兴产品诸如木塑等新产品,以及目前较为新兴的生物质能源领域。LCA在中国木材加工领域的应用则侧重于传统的木材加工业,包括木制品、竹制品、木质与非木质复合材料、地板、家具等领域。针对目前我国存在的一些诸如理论和方法上的不足、研究结果代表性不明确、数据质量不高等问题,提出了研究内容细致化、建立符合中国国情的木材加工业的生命周期评价模型、开发自主评价软件、建立符合中国国情的生命周期数据库等对策。

关键词:生命周期评价体系,木材加工,应用,对策

中图分类号:TS6

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2013)02-0054-06

A Review of LCA's Application to Chinese Wood-processing Industry

Li Huiyuan Huang Siwei Zhou Dingguo

(College of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Life Circle Assessment (LCA) is a tool to assess the impact that the use of energy and materials has on environments. LCA was introduced into the wood-processing field in the 1990s. The paper described the application of LCA to wood processing industry in North American and European countries, where the study of LCA started from the carbon balance in forest products and extended to the field of wood veneer, flooring manufacturing and wooden architecture frame. LCA also has a widened application from the traditional wood processing industry to emerging products such as wood-plastic composites and to the new area of biomass energy. In China, LCA has been mainly used in traditional wood processing such as wooden products, bamboo products, wooden or non-woody composites, flooring and furniture. We found there are some problems in the LCA's application in China, including the deficiency in theories and methodology, the lack of representative research results and the low quality data, and proposed some countermeasure, i. e., set up a suitable databases and reasonable models for LCA and develop assessment software with fully independent intellectual property rights.

Key words: LCA, wood processing, application, countermeasure

国际环境毒物学和化学学会(SETAC)将生命周期评价(Life Circle Assessment,简称LCA)定义为一个评价与产品、工艺或行动相关的环境负荷的客观过程。该评价涉及产品、工艺或活动的整个生命周期,包括原材料的提取和加工,生产、运输和分配,使用、

再使用和维护,再循环以及最终处置^[1]。LCA在中国的应用领域十分广泛,包括化工、包装、建筑、建材、纺织、机电、能源、运输等产业。LCA应用到中国木材工业领域始于21世纪^[2-6]。

* 收稿日期:2012-03-28

基金项目:木质纤维化学材料及功能化技术(201104004)

作者简介:李慧媛,博士研究生,主要研究方向为木质与非木质复合材料、生物质能源,电话:025-85427518, E-mail: wikilee1986@163.com

1 生命周期评价体系

一般来说,LCA 评价的技术框架分为 4 个部分:

1) 确定研究目标与研究范围。包括明确陈述其应用意图,开展该研究的理由及其沟通对象,这些工作必须要反映出资料收集和影响分析的根本方向。2) 对清单进行分析。即对产品生命周期阶段的资源消耗和向环境的排放(包括废气、废水、固体废物及其他环境释放物)的全部数据进行量化分析。3) 评价环境影响。分为影响分类、特征化和评估 3 个步骤^[2],主要任务是解释清单分析结果对 LCA 中的“保护领域”的潜在影响。目前,被广泛接受的生命周期评价领域是人类健康、生态系统健康以及资源状态。4) 解释评价结果。将从清单分析得到的数据归类到不同的环境影响类型。影响类型通常包括资源耗竭、人类健康影响和生态影响 3 个大类^[2]。

LCA 评价工具主要有德国 Institut für Kunststoffprüfung und Kunst - stoffkunde 开发的 GaBi, 瑞典 Chalmers Industriteknik 开发的 LCAiT (LCA Inventory Tool) 软件,英国 Pira International 公司研发的 PEMS (Pira Environmental Management System), 荷兰 PRe Consultant 公司开发的 Simapro, 美国 Ecobalance 公司开发的软件 TEAM 以及中国在 2009 年开发的 CLCD。

2 生命周期评价体系在国外木材加工领域的应用

在欧美等发达国家正式将 LCA 应用于木材加工领域始于上世纪 90 年代。1992 年加拿大的 Forintek 研究所设立了木质材料 LCA 项目研究组;1995 年欧共体成立的 E9 小组的 4 个部门中的一个部门就是关注木质制品的制造过程与商品;位于美国华盛顿的 CORRIM 联盟也是致力于木质制品 LCA 的研究,该研究所成立于 1996 年。日本于 1997 年也在木材工业界开展了 LCA 研究,主要研究方向有木材生产及其运输、木质材料、木结构房屋、木材资源利用^[4-5]。近十几年来 LCA 在世界各国的木材工业领域受到了广泛关注,LCA 报告所涉及的木质产品从木质原料到木质加工产品主要包括胶合板、定向刨花板(OSB)、中密度纤维板(MDF)、刨花板、单板层积材、胶合木、地板,并取得了不少研究成果^[6-13]。

W. A. Cote 自 1996 年开始研究林地的碳迹,主要

是森林经理、加工使用和产品废弃过程中的固碳和排碳。在 2002 年他提出了研究林产品碳平衡的方法,在废弃物处理上提出了作为能源和直接填埋 2 种处理方式,并计算出这 2 种不同处理方法对环境的影响值,从而得出林产品工业是环境友好型的可持续产业。1998 年 Jamie K. Meil 分别对木质面板和铁质面板的生产过程作了 LCA 研究,木质面板从森林经理、运输和制作 3 个方面,铁质面板从产品制作和运输 2 个方面进行了 LCA 评价,并对这 2 种面板的 LCA 结果进行对比得出,木质面板比铁质面板更具有环境友好性。2005 年 Maureen E. Puettmann 对各类住宅用木制品进行了 LCA 研究,对比了 CORRIM2004 报告中的木质建筑材料从原料获取、制作和运输 3 个方面的能源消耗和废弃物排放。生命周期清单包括能源、空气污染物、水、胶合木、窑干木、生材、层积材、针叶材胶合板和定向刨花板。他发现生命周期中生产部分的能源消耗量最大,其中一部分包括制胶的消耗量;伐木和运输对环境的影响最小^[14-16]。

2006 年 Barbara Nebel 根据 ISO14040 - 14043 对木质地板进行了生命周期评价,其研究几乎覆盖了全德国 70% 的地板生产行业。清单包括森林经理、锯材、地板生产、铺装磨光和废弃物处理即燃烧,发现制作和使用木地板从固碳和提供清洁能源 2 个方面对环境产生影响,从而得出木地板从生产到使用都有相对较低的能源消耗。为了更好地说明木结构房屋比砖结构房屋具有环保性,Atish Bajpai 对木结构房屋和砖结构房屋进行了 LCA 研究,结果得出建造一座木结构房屋比建造一座砖结构房屋的环境负荷更低^[17-18]。

随着新产品的开发,诸如木塑与 Accoya 木新产品也在传统的木质产品领域拥有了一席之地,LCA 这种新的评价工具也很快被引入了这一新的领域。2009 年 Rosario Vidal 对木塑和塑料进行了 LCA 研究,木塑以回收利用的 PP/HDPE 为基体,稻壳/棉籽为增强材料,塑料的原料为非回收塑料。Rosario 在废弃物处理部分考虑了焚烧和堆填 2 种处理方式,在环境影响方面考虑了全球变暖、非可再生能源的消耗、酸雨以及水体的富氧化等 4 个方面。相对于传统塑料的制作,回收塑料制作的木塑在原料获取和加工方面对环境的影响明显下降。2010 年 Dr. ir. J. G. Vogtländer 使用 ISO 和 MEN 的标准分别对生产 Accoya 木及 Accoya 木作为窗户、地板及桥梁的承重构

件进行了LCA评价^[19-20]。

1998年Jamie K. Meil在一份LCA报告中明确指出,改性木材如防腐木、阻燃木等比其他替代材料如水泥、钢铁等更具有环境友好性^[21]。

与此同时,LCA的研究也扩展到生物质能源领域。2003年Helena Malkki利用LCA分析比较了以采伐剩余物和木材加工剩余物作为生物燃料原料对环境的影响;Binod Neupane和Anthony Halog使用LCA评价了美国东北部的生物质能源制作,以木片来源不同(营种林地和已存林地)分2个清单得出,使用木片制作生物质能源对环境影响较大的是从林地到工厂的运输。2009年Linus Hagberg使用RED规则对瑞士的颗粒燃料生产链进行了LCA评价,结果表明,影响较大的生产部分是对原料干燥以及运输^[22-24]。

加拿大Forintek的报告指出,LCA在木制品领域未来要发展的方向有生物质能源、纤维高分子材料、纳米结晶纤维素等。为使LCA更加符合木材加工领域的实际情况,需要不断完善LCA评价系统以及更新LCA的数据库。与此同时,LCA的全球化趋势也在不断增强^[25]。

3 生命周期评价体系在我国的应用及存在问题

3.1 应用情况

欧美和日本等在上世纪90年代就将LCA评价体系引入木材加工领域。与这些国家相比,LCA在中国木材加工领域的应用较晚,开始于21世纪,但目前也已取得了一定的发展^[4]。

3.1.1 木材的LCA研究

2001年安徽农业大学的孙启祥首次从生命周期角度评估了木材的友好性,他分别从木材来源、木材加工过程中的耗能、木材使用、木材循环再利用以及废弃再生几个方面表明木材在其生命周期的整个过程中具有较低的环境负荷值,是环境友好型的绿色材料^[26]。

3.1.2 木质和非木质复合材料的LCA研究

2006年刘文金对中密度纤维板的生态循环周期评价进行了理论研究,以MDF为研究对象,评价范围定位于生产和使用过程中的所有环节,以“环境负荷”为综合性指标,以资源、能源、废弃物、使用过程中的挥发物污染等4项内容为分项指标,探讨了中密

度纤维板生态循环周期评价的数学模型,确定了研究过程中采样点的选择、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^[27]。2006年薛拥军、向仕龙等参照纸模包装生命周期评价模式构建了纤维板生命周期评价模式,对原材料的获取(厂区以及原料)、板材制备、后期加工3个部分进行了分析,再对纤维板生产各阶段的工序进行层次分析,构成4个层次,分别是:底层为不同的纤维板企业;第2层为投资额、运行费用、能耗、运行稳定性、产品合格率、全球变暖、酸化、三废处理、噪音、敏感点等10个影响因子;第3层为经济、技术和环境3个单向目标;最高层为综合效益。该模式可以为纤维板生产系统合理化发展提供一定的指导作用^[28]。2006年薛拥军、向仕龙等以生命周期评价模式对纤维板的生产过程进行了分析,并对各生产阶段对环境的影响进行了细分:1)能源消耗:干燥与热压2个加工阶段的耗能最多,而前期的原料采伐、运输、剥皮、削片、热磨、分选、施胶、铺装、预压以及后期的冷却、裁边、砂光等过程则耗能较少;2)环境污染:制胶阶段产生的废水,施胶、预压及热压、冷却和锯边等过程中产生的大量游离甲醛,纤维的制备、干燥、板子砂光等过程中产生的大量粉尘、木质微粒和碳氢化合物等有害粉尘物,备料、裁边工序中产生的固体废弃物以及中纤板生产过程中机械转动和空气动力性噪声污染^[29]。

2007年向仕龙、魏新莉等以生产1 m³刨花板为研究对象,评价指标包括原料、消耗能源和环境3个方面,研究得出,刨花板制备中能源消耗的主要过程是刨花板制备和板坯铺装热压,原料消耗的瓶颈在于木材资源的消耗,并计算出影响环境的废气、废水和噪声3个指标的数值,得出刨花板整个生产过程具有较低的环境负荷值。2008年燕鹏飞与杨军将通过实地调研取得的规格材、胶合木和定向刨花板3种木结构产品的实际数据,运用丹麦的工业产品环境设计(EDIP)方法,在SETAC所规定LCA评价的技术框架基础上建立了建筑材料生命周期环境影响评价模型。通过模型计算评估规格材、胶合木和定向刨花板3种木材加工产品物化环境影响负荷和不可更新资源消耗,得出定向刨花板的物化环境影响负荷和不可更新资源消耗最大,胶合木其次,规格材最小。2010年李晓平利用生命周期评价法对农作物秸秆人造板全生命周期的环境特性进行了定性评价,将范围定于生产线建设、生产加工、销售(包括包装与运输)、使用和

废弃后处理等5个主要阶段,并与木质人造板的环境特性进行对比分析,得出利用农作物秸秆生产的人造板相对于木质人造板在保护土地资源、固碳和保护森林资源方面都具有明显的优势,而在钢材、混凝土、玻璃、化石能源、人力、电力和水资源等消耗方面与木质人造板无明显差异的结论。提出通过加快生产设备的标准化进程,提高设备的循环利用率,延长设备的使用寿命,提高厂址的选择水平以及企业的管理和经营水平,充分进行废物再利用,提高经营者的环保意识等方法来改善产品的LCA评价^[30-32]。

3.1.3 木/竹质制品的LCA研究

2007年王爱华采用SimaPro 6.0环境影响评价软件对竹地板与实木地板的生产过程进行生命周期评价得出,在竹地板整个生命周期中,环境负荷最大的环节是竹条生产阶段,其次为板坯生产、地板成品生产和使用阶段,生产阶段最大损害类型均为资源损害;而在实木地板的生命周期中,环境危害最大的是地板生产阶段,随后为废弃和使用阶段,最大损害类型为资源损害,最大环境影响类型为能源消耗,气候变化影响类型为负值,实木地板的环境影响优于竹地板,但影响结果相差不大^[33]。随后,2011年余翔在其硕士论文中采用SimaPro 6.0环境影响评价软件对竹集成材地板和竹重组材地板进行了生命周期评价,得出竹重组材地板的原料利用率高,经济效益显著,但从环境的观点上看,其对环境造成的负面影响要大于竹集成材地板。竹集成材地板在生产阶段中竹条制造工艺过程造成的环境负荷和对人体健康的影响最大,其次为地板成品生产阶段,最小为板坯制造阶段;对于生态系统和资源的损耗,竹条制造阶段最大,其次为板坯制造,最后为成品制造。竹重组材地板在板坯制造阶段对环境负荷、人体健康和生态系统质量的影响最大,其次为竹束制造阶段,成品生产阶段的环境负荷最低;而对于资源的损耗,板坯制造阶段最大,成品制造阶段次之,竹束制造阶段最小^[34]。

2009年薛拥军和王珺以流水线生产的中纤板家具产品为研究对象,范围界定为中纤板和板式家具产品2个部分,就板式家具生产过程对环境的影响进行评价。发现中密度纤维板加工中资源消耗量最大的为木材,而板式家具企业生产时消耗最多的是稀释剂,其次是涂料,胶黏剂的消耗较少。在中纤板家具产品流水线生产过程中,全球性环境影响主要表现在全球变暖,区域性影响主要来源于酸化,局地性影响

主要是固体废弃物排放^[35]。

3.2 目前研究中存在的不足

1)理论和方法上的不足。一方面系统边界、数据收集和影响类型等是通过主观界定,人为主观判断的随意性大;另一方面木材工业用胶黏剂以及相关能源、电力和运输等系统缺乏权威的统计标准,无法准确计算产品的环境负荷,使得在研究人造板LCA时不得不避开胶黏剂或使用他国的统计标准。不仅研究结果的准确性难以保障,而且也不符合我国实情,亦给人造板的下游产品,如家具的LCA研究带来不利影响^[33]。

2)研究结果代表性不明确。LCA的研究结果是针对全球和区域的,可能不适用于地方,但是地方条件不能代表全球或者区域的状况^[1]。

3)数据质量不高。LCA对数据质量要求高,因此数据资料的获得成为一个关键点。在评价一个产品的生命周期时,研究人员参照的往往是产品的典型生产工艺和全国平均水平,同时需要通过个人的专业判断等来获取数据,这都容易造成数据不准确,产生偏差,得出错误结论。同时由于许多参数不能简化表示,数据又有着相当快的更新速度,权重过程中使用的假设可能与现实有偏差,因此得出的结论不能作为消费者认定一个产品有绝对优势的参考^[1]。

4 在国内木材加工领域的应用展望

从目前LCA在国内木材加工领域的研究现状来看,在木材科学、木质及非木质复合材料、地板家具等领域的研究取得了诸多成果。尽管如此,由于木材加工领域所涉及的工艺、参数较多,因此影响因素非常复杂,已有研究尚存在一些不足,还需要从以下几个方面进一步加强,以提高评价的精确性。

1)研究内容细致化。广义的木材加工包括木材加工、木质与非木质复合材料的制作以及木材及地板家具等终端产品的加工,每个加工领域的应用工艺及生产线都不尽相同。例如,木质与非木质复合材料包括胶合板、纤维板、刨花板及木塑材料等,他们的加工方式各不相同,每一阶段的资源损耗和环境负荷也不相同。因此,针对各个木材加工的小领域应该进行专门研究,揭示出每一种加工模式的主要影响因子及其作用,为建立本土化的LCA评价模型提供依据。到目前为止,已经开展的木材加工中密度纤维板、竹地板及板式家具的研究,仅选择了木材加工领域中典型

的加工方式,今后应更广泛地研究其余木材加工形式的 LCA,为建立适合中国国情的生命周期数据库提供数据支撑。

2)理论模型准确化。建立符合中国国情的木材加工业的生命周期评价模型,开发自主评价软件。目前国内木材加工业的 LCA 大都是参照其他产品的生命周期评价模型,且评价软件也多是使用欧美国家开发的,但每个产品都有其独特的生产消耗模型,其对资源环境的影响各个国家也不尽相同。如果仅参照其他产品的模型则难以精确地对木制产品进行生命周期评价。因此,为了准确使用 LCA 评价模式,需要建立本土化的 LCA 评价模型,开发具有自主知识产权的评价软件,计算适合我国使用的权重系数。

3)数据库本土化。LCA 结论的可靠性很大程度上取决于 LCA 基础数据库。目前我们在木材加工领域 LCA 的应用是借鉴欧美国家的数据库。尽管许多国家已经建立了较为完整的数据库,但是我国木材加工产业的实际却与国外大不相同,如中国水、电、煤炭等能源与欧美国家不同,因此消耗等量能源的环境负荷是不一样的。我们需要对数据进行本土化修正,建立符合中国国情的生命周期数据库。

参 考 文 献

- [1]王寿新,杨建新,胡聘. 生命周期评价方法及其进展[J]. 上海环境科学,1998,17(11):7-10.
- [2]郑艳华. 生命周期评价法在公路建设项目环境影响分析中的应用[D]. 南京:南京林业大学,2009.
- [3]王涛. 基于全生命周期理论的发动机再制造 3E 评价研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [4]陆一新. 化工产品生命周期评价系统设计研究[D]. 成都:西南交通大学,2000.
- [5]夏欢. 绿色机电产品全生命周期评估原型系统研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2007.
- [6]黄煜焜,范英儒,钱觉时,等. 绿色生态建筑材料[M]. 北京:化学工业出版社,2011:19-24.
- [7]郭伟祥. 生命周期评价(LCA)方法概述[J]. 通信技术与标准,2009(9/10):7-10.
- [8]黄春林,张建强,沈松涛,等. 生命周期评价综论[J]. 环境技术,2004,22(1):29-31.
- [9]谢力生. 木材工业生命周期评价研究现状[J]. 木材工业,2010,24(5):28-31.
- [10]David H, Itaru Y, Ryoichi Y. LCA in Japan: policy and progress [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3(3):124-130.
- [11]Beatriz R, Almudena H, Teresa M. Life cycle inventory of particle-board: a case study in the woods sector[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2):106-113.
- [12]Beatriz R. Life cycle inventory of medium density fiberboard[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(5):143-150.
- [13]Luca G, Filippo M, Marco A, et al. Assessing environmental impact of green buildings through LCA methods: a comparison between reinforced concrete and wood structures in the European context[J]. Procedia Engineering, 2011(21):1199-1206.
- [14]Murphy R J, Hiller W. An introduction to life cycle assessment (LCA) of painted timber components[J]. Surface Coating International, 1999, 82(10):482-487.
- [15]Lippke B, Wilson J, Perez-Garcia J, et al. Life-cycle environmental building materials[J]. Forest Products Journal, 2004, 54(6):8-19.
- [16]Günther A, Langowski H C. Life cycle assessment study on resilient floor coverings[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1997, 2(2):73-80.
- [17]Richter K, SELL J. Life-cycle analysis: a useful approach to promote wood as a construction material[J]. Wood Design Focus, 1993, 4(2):14-17.
- [18]Barbara N, Bernhard Z, Gerd W. Life cycle assessment of wood floor coverings[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(3):172-182.
- [19]Cote W A, Young R J, Risse K B, et al. A carbon balance method for paper and wood products[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(sup 1):S1-S6.
- [20]Jamie K M. A Life cycle analysis of solid wood and steel cladding[R/OL]. (1998). [2012-03-28]. http://calculatelca.com/wp-content/themes/athena/images/LCA%20Reports/Solid_Wood_And_Steel_Cladding.pdf.
- [21]Maureen E P, James B W. Life-cycle Analysis of wood products: cradle-to-gate LCI of residential wood building materials[J]. Wood and Fiber Science, 2005, 37:18-29.
- [22]Barbara N, Bernhard Z, Gerd W, et al. Life cycle assessment of wood floor coverings[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(3):172-182.
- [23]Atish B, Nelson E, Wang X, et al. A Comparative life cycle assessment of a wooden house and a brick house [R/OL]. (2005). [2012-03-28]. <http://www.infra.kth.se/fms/utbildning/lca/project%20reports/Group%206%20-%20House.pdf>.
- [24]Rosario V, Pilar M, Daniel G. Life cycle assessment of composite materials made of recycled thermoplastics combined with rice husks and cotton linters[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(1):73-82.
- [25]Vogtländer G. Life cycle assessment of accoya? wood and its applications [R/OL]. (2010). [2012-03-28]. <http://www.accoya.com/wp-content/uploads/2011/05/Life-cycle.pdf>.
- [26]Treated Wood Council. Life cycle assessment comparison of treated wood to alternate materials - overview, results and lessons[R/OL].

- (2010). [2012-03-28]. <http://www.irg-wp.com/IRG42-Presentations/IRG%2011-50282.pdf>.
- [28] Malkki H, Virtanen Y. Selected emissions and efficiencies of energy systems based on logging and sawmill residues [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 24(4): 321-327.
- [29] Binod N, Anthony H. Life cycle assessment of wood chips for biofuels production in northeast region of US [R/OL]. (2005). [2012-03-28]. <http://ieclass.tripod.com/ilss>.
- [30] Linus H, Erik S, Jenny G. LCA calculations on sedish wood pellet production chains [R/OL]. (2009). [2012-03-28]. <http://www.ivl.se/download/18.7df4c4e812d2da6a416800072063/B1873.pdf>.
- [31] Jennifer O'Connor. LCA in wood products research [R/OL]. (2005). [2012-03-28]. http://www.reseauvco.ca/fileadmin/vco/Workshops/Life_Cycle_Analysis_and_Sustainability/05_Research_Institute_Perspective.pdf.
- [32] 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, 28(2): 70-175.
- [33] 刘文金. 中密度纤维板生态循环周期评价理论的研究[J]. *中南林学院学报*, 2006, 26(4): 117-119.
- [34] 薛拥军, 向仕龙, 刘文金. 纤维板产品的生命周期评价模式的构建[J]. *中国人造板*, 2006, 13(11): 29-32.
- [35] 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.
- [36] 向仕龙, 魏新莉, 刘文金. 从生命周期角度评价刨花板的环境特性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(6): 166-168.
- [37] 燕鹏飞, 杨军. 木结构产品物化环境影响的定量评价[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2008, 48(9): 15-17.
- [38] 李晓平, 周定国, 于艳春, 等. 利用生命周期评价法评价农作物秸秆人造板的环境特性[J]. *浙江林学院学报*, 2010, 27(2): 210-216.
- [39] 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.
- [40] 余翔. 竹集成材地板和竹重组材地板生命周期(LCA)比较研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [41] 薛拥军, 王君. 板式家具产品的生命周期评价[J]. *木材工业*, 2009, 23(4): 22-25.