

基于系统论的可持续材料选择与低碳家具设计研究

赵润九

武汉工程大学艺术设计学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年12月11日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月26日

摘要

本文系统研究了可持续材料选择与低碳家具设计, 旨在响应全球环境问题的挑战和实现联合国可持续发展目标(SDGs)以及中国的“双碳”目标。文章从系统论的角度出发, 探讨了低碳设计和系统设计的概念, 分析了减量化设计理念、材料减量化设计、回收与循环利用等低碳家具设计策略, 并从系统论的角度解析了基于材料可持续的家具设计策略。研究强调了整体性、相关性、动态性、目的性和层次性在设计过程中的重要性, 并提出了具体的实施细则和评估体系。通过综合考虑家具的生命周期、设计与环境因素的相关性、适应变化的动态环境和需求、追求多重价值和目标的平衡, 以及建立全局视野和合作伙伴关系, 本文为可持续发展领域提供了一些见解和方法。研究旨在促进材料可持续的家具设计实践, 为实现环境、经济和社会的协调发展贡献绵薄之力, 并探索该领域的潜在创新路径。

关键词

可持续材料, 低碳家具设计, 系统论, 减量化设计, 回收与循环利用, 材料可持续性, 生命周期设计, 系统设计, 绿色制造

Research on Sustainable Material Selection and Low-Carbon Furniture Design Based on System Theory

Runjiu Zhao

School of Art & Design, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Dec. 11th, 2024; accepted: Jan. 15th, 2025; published: Jan. 26th, 2025

Abstract

This article systematically investigates sustainable material selection and low-carbon furniture

design, aiming to respond to global environmental challenges and achieve the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) as well as China's "dual carbon" targets. From a systems theory perspective, the paper explores the concepts of low-carbon design and systems design, analyzes strategies for low-carbon furniture design, such as reduction-oriented design, material reduction design, and recycling and reuse, and provides a systems-based analysis of material sustainability in furniture design strategies. The research emphasizes the importance of holism, relevance, dynamics, purpose, and hierarchy in the design process, and proposes specific implementation details and evaluation systems. By comprehensively considering the furniture's lifecycle, the correlation between design and environmental factors, the dynamic environment and changing demands, balancing multiple values and objectives, and establishing a global perspective and partnerships, this study provides insights and methods for the field of sustainable development. The research aims to promote sustainable material-based furniture design practices, contribute to the coordinated development of environmental, economic, and social factors, and explore potential innovative paths in this field.

Keywords

Sustainable Materials, Low-Carbon Furniture Design, System Theory, Reduction-Oriented Design, Recycling and Reuse, Material Sustainability, Lifecycle Design, System Design, Green Manufacturing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 背景介绍

随着全球环境问题的日益严峻,可持续发展已成为当今社会的重要议题。2015年,联合国提出的17项可持续发展目标(SDGs)明确了在2030年前应对社会、经济和环境挑战的关键任务[1]。中国在2020年进一步提出了“双碳”目标,即到2030年实现碳排放达峰,到2060年实现碳中和[2],这为各行业的绿色转型提供了政策指引和目标方向。家具制造业作为资源密集型行业,其原材料采集、能源消耗和废弃物排放对森林资源、水资源和大气环境等方面产生了显著影响,亟需采取有效的减排和节能措施。

近年来,国内外学者围绕可持续材料选择和低碳设计策略开展了多项研究。例如,有研究提出了基于生命周期评价(LCA)的方法,用于评估家具产品在生产、使用和回收过程中的碳足迹[3]。其他研究则关注于绿色材料的开发与推广,如使用回收木材、可再生材料和生物基材料来减少对原生资源的依赖。此外,关于设计阶段的低碳策略的研究也在不断深入,涵盖了模块化设计、轻量化设计和可拆卸设计等方法。系统论在这些研究中提供了重要的理论支持,其强调整体性、动态性和关联性使得研究者能够从更广阔的视角探讨家具设计的可持续路径。

1.2. 研究目的和意义

研究的目的是提出一套系统的理论框架和实践策略,以指导家具设计行业在材料选择和产品设计过程中实现可持续性,减少碳排放,并促进环境、经济和社会的协调发展。研究的意义在于,通过研究可持续材料和低碳设计策略,减少家具制造业对环境的负面影响,特别是在资源消耗和废弃物排放方面。此外,研究支持联合国的可持续发展目标和中国的“双碳”目标,为实现这些目标提供了具体的设计和制造策略。通过系统论的应用,研究为家具制造业提供了绿色转型的路径,推动行业创新和可持续发展

实践。同时,研究通过系统设计方法,提高家具设计的质量和效率,确保产品的环保性能和用户满意度。此外,研究强调回收与循环利用的重要性,推动家具行业向循环经济模式转型,减少资源浪费;同时也鼓励设计师与不同领域的专家合作,以获得更全面的视角和更有效的解决方案,最终实现理论与实践的结合,为设计师和制造商提供了具体的实施细则和评估建议。

2. 低碳设计和系统设计

2.1. 低碳设计

低碳设计一词来源于英文的直接翻译,是一种从生命周期视角出发,旨在降低能耗和减少污染的设计实践[4]。其核心理念是通过设计手段在产品或项目的全生命周期中减少碳排放。在设计之初,就需要综合考虑设计对象在生产(建造)、技术工艺、材料选择、运输、销售、使用(运营)、以及废弃(拆除)等环节的碳排放问题。低碳设计的进一步目标是通过推广这种理念,推动全社会形成低碳文化和低碳生活方式[5]。低碳设计的思想可以追溯到20世纪60年代,美国生物学家雷切尔·卡逊在《寂静的春天》中首次提出这一环境保护的理念[6]。随后,维克多·帕帕奈克提出了“绿色设计”概念和“资源有限论”,其核心是基于“3R”原则,即减少资源和能源消耗、降低有害物质排放,同时让产品的零部件易于分类和循环利用。到了80年代,“可持续发展”理念兴起,催生了可持续设计的概念,这一设计思想较绿色设计进一步扩展,涵盖了社会经济政策、文化发展、生产生活等多个领域,并首次将非物质设计(如政策设计)纳入其中。进入90年代,《京都议定书》首次提出了“低碳”这一概念,将环保设计以定量方式表达,成为可持续发展理念的进一步深化。协议中明确了全球碳排放生态平衡的重要性,“碳排放”由此成为国家间博弈的重要议题。

2.2. 系统论和系统设计

“系统”一词源自古希腊文,意为由部分组成的整体。作为科学理论的系统论由美籍奥地利理论生物学家L·Von·Bertalanffy创立,他在《一般系统理论》中提出,系统是由若干要素按特定结构联结形成的有机整体,具有整体功能,远非各部分简单相加所得。

1990年代初,钱学森等人提出“开放的复杂巨系统”概念[7],标志着系统工程思想在中国的重大进展。这些理论在促进人与自然、人与社会协调发展方面发挥了重要作用。在设计领域,乌尔姆设计学院率先将系统论用于工业设计,推动功能模块化设计,提升了产品组装与维护的效率[8]。二战后,人机工程学引入设计实践,将设计对象扩展至“人-机-环境”系统,强调可持续发展。

综上所述,系统思想源远流长,并随着社会变化不断发展,逐渐融入更多因素,尤其是低碳设计和可持续的设计理念日益受到重视。因此,将系统思想应用于家具设计,不仅可以增强家具与环境保护的关联性,推动设计发展,还能理清家具与用户需求的关系,提升其使用体验,并为家具系统设计提供理论和实践支持。

3. 基于低碳的家具设计策略

一、减量化设计理念

第一,遵循“3R”原则(减少量化、再利用、资源化);最大限度地提高资源利用效率,减少资源消耗,并推动绿色低碳技术创新。减量化不仅限于材料的使用减少,还包括生产、流通过程中的能源消耗和污染排放的减少。第二,家具的减碳应从设计源头入手,全面考虑家具的功能、质量、生产、使用、回收等各个环节。在不改变家具总体造型、使用功能和安全性的前提下,通过智能化设计和生产系统优化材料和能源的使用,减少碳排放。第三,利用智能优化技术(如智能开料、大规模定制、数字化设计等)来提高

材料的利用率，从而达到减量化的目的。

二、材料减量化设计

低碳性材料的选择对家具的整体碳排放有决定性作用。木质材料作为自然的低碳资源，其固碳和替代效应比其他工业材料(如水泥、钢铁)更具环保优势。选择高效利用木材的低碳人造板，如三聚氰胺板、木皮板等，可以有效减少木材的消耗。其次，在家具设计过程中，选择易加工和高利用率的木材品种，减少加工时的浪费。对于多样化的板材和饰面材料，通过合理规划，减少材种种类，提升材料的整体利用率。在保证家具使用功能和安全性的基础上，采用轻质天然材料(如藤、竹、麻等)和轻质人造板材替代传统的重质木材，既能减少木材消耗，又能降低家具的重量，减少物流和运输的碳排放。

三、回收与循环利用

对于废弃家具，尤其是木质家具，应制定回收计划并考虑其可再利用性。废弃家具应被回收后重新加工或修复，减少垃圾填埋的碳排放。废旧木材可以通过回收站或与环卫系统合作处理，将其转化为木料、木塑产品或用于人造板生产。其次，家具生产中会产生大量边角料，这些废弃物往往浪费较多。设计阶段应提前规划利用这些边角料，如将中型余料加工成木条、木方或复合板材，提升这些边角料的价值，减少资源浪费。对于废弃的木质家具，可以通过修复和翻新再利用，这样可以大大降低废弃木材的碳排放。通过强化家具的耐用性和可维修性，减少家具的报废数量，也是实现减碳目标的重要途径。

4. 基于材料可持续的家具设计策略——从系统论的角度解析

一个拥有良好循环周期的家具在规划好可持续流程后，还需考虑使用合适的可持续设计策略。可持续材料的设计与常见的设计方式不同，可持续材料设计是在保证材料绿色、环保的前提下，对家具产品提前做好设计规划避免后期产生诸多使用问题。从结构、外观、模块化等角度根据不同的情况进行思考，可以发现不同的人群在使用家具时所面临可能出现的问题，并根据产生的问题提出合理的设计策略。

4.1. 整体性：考虑家具设计的生命周期

材料可持续性涉及家具设计全生命周期，包括原材料获取、制造、使用及废弃处理。设计师需要采用系统思维，以整体的方式来审视家具的生命周期，并找到减少资源消耗和环境影响的机会。选择可再生材料或回收材料作为原材料是一大热点，近年来有许多新兴可持续材料被运用于家具设计的领域，例如：

1) 生物基材料：从可再生生物资源(如植物纤维、藻类、菌类等)中提取，竹子和麻绳等天然纤维就是其中之一，还有利用菌类生长技术生产的生物基复合材料。

2) 再生木材：是利用回收木材或废弃木材进行再加工，以生产新的木材产品。这种材料可以减少对原始森林资源的依赖，同时也减少了废弃木材的浪费。再生木材在家具制造中可以用来制作桌子、椅子、柜子等。

3) 可降解材料：可降解材料是指在特定条件下可以分解为无害物质的材料。这些材料可以是天然的，如木质纤维板和竹子，也可以是合成的，如可降解塑料。家具制造中使用可降解材料有助于减少塑料废弃物的产生，并减少对有限资源的消耗。

4) 再生纤维：再生纤维是利用废纸、废纺织品和其他纤维废弃物进行再加工的纤维材料。这些纤维可以用于制造织物和填充材料，适用于家具的面料和填充。

5) 植物基塑料：植物基塑料是使用植物原料制造的可替代传统塑料的材料，植物基塑料的制造通常使用植物中的淀粉、纤维素或油脂等作为原料。这些植物原料经过加工和化学处理后，转化为可用于塑料制造的原料。植物基塑料的制造过程中产生的温室气体排放较低，相比石油基塑料，可以显著降低碳

足迹，也有更好的可降解性能。这种材料可以用于制造椅子、桌子等家具零件。

6) 循环利用材料：循环利用材料是指从废弃物和回收材料中获得的材料。例如，利用回收的塑料瓶制造的纤维板和塑料木材来进行家具的设计制造。

本文提出若干实施细则：包括优先使用可再生材料：如生物基材料、再生木材、再生纤维、植物基塑料。制定材料选择清单，列明可接受的可持续材料及其来源。对材料供应商进行资质审核，确保符合可持续性标准。其次，使用生命周期评估(LCA)工具评价材料的环境影响[3]。扩大循环材料使用，采用回收塑料、废弃木材加工材料。建立与回收企业的合作机制，确保原料供应。

除此之外，采用可持续的制造流程也是系统设计中整体性思考十分重要的一部分，这一流程的关键方面包括：

1) 能源管理：采取有效的能源管理措施是实现低碳制造的关键。优化工厂和生产线的能源利用效率，采用高效的设备和技术，减少能源浪费。此外，利用可再生能源，如太阳能和风能，以替代传统的化石燃料能源，进一步降低碳排放。

2) 生产过程优化：通过优化生产过程，可以减少废弃物和排放物的产生。采用清洁生产技术，包括废物回收和处理系统、水循环利用系统等，最大限度地减少对环境的污染。

3) 设计和创新：在可持续和低碳的家具制造中，注重设计和创新，以减少材料浪费和能源消耗。优化产品设计，采用模块化和可拆卸结构，以便于维修和再利用。同时，鼓励创新的制造方法和工艺，如数字化制造、3D 打印等，以提高生产效率和减少资源消耗。

4) 供应链管理：在可持续和低碳的家具制造中，供应链管理至关重要。与供应商建立合作伙伴关系，确保材料和零部件的来源符合环境和社会责任标准。加强供应链的可追溯性和透明度，确保所采购的材料符合可持续和低碳的要求。

工厂在实际运行中应实施能效审计，优化能源利用。通过引入可再生能源，如安装太阳能电池板或风能设备，降低目标生产能耗。其次要注重生产过程清洁化，定期维护废水回收系统、废气净化设备等。在条件允许的情况下，投资开发清洁生产技术，如无溶剂涂装和数字化制造工艺。同时应参考模块化设计，优化家具设计流程，采用模块化或可拆卸结构，提升维修性和可重复使用性，尽可能使产品接口标准化以便更换部件。供应链管理方面应提高材料可追溯性，要求供应商提供材料来源证明，采用区块链技术记录关键数据；并优化采购政策，优先选择本地供应商，减少运输碳足迹。

综上所述，采用可持续的制造流程，以及考虑家具的维修和再利用能力，都是整体性思考的重要方面。

4.2. 相关性：综合考虑设计与环境因素

材料的可持续性与设计和环境因素的关联可以通过多方面进行细化和实践。首先，设计师在选材时需要采用生命周期分析(LCA)的方法，全面评估材料从原料开采、生产加工、使用到废弃处理整个过程中的环境影响[9][10]。包括：优先选择可再生资源、低碳排放的材料，如 FSC 认证的木材或回收塑料，同时避免使用含有高污染成分或不可降解的材料。设计过程中，应结合产品功能需求和美学目标，优化材料利用率。例如，采用模块化设计以减少材料浪费，或利用轻量化设计实现运输和安装的能耗降低。

在供应链管理方面，与具有可持续认证的供应商合作[11]，例如选择符合 ISO 14001 标准的制造商，确保生产环节中的环保规范。同时，在生产工艺中，可优先选择低能耗、低水耗或不使用有毒化学品的技术，如水性涂料替代溶剂型涂料。对于消费者需求的响应，设计师可以通过市场调研，分析用户对可持续产品的偏好，从而在设计中加入可维修性或多功能性，延长产品使用寿命。

评估指标方面，材料选择的可持续性可通过碳足迹、能耗强度和废弃物回收率进行量化。例如，通过比较不同材料的碳排放量，选择对环境更友好的方案。此外，消费者满意度和市场反响也是重要指标，

可以通过产品回购率和用户反馈数据加以衡量。

以宜家(IKEA)为例,其 BILLY 书架的设计中采用了可再生材料的刨花板,且生产过程中优化了工艺以减少木材浪费,同时其模块化设计便于运输和组装,降低了物流过程中的碳排放。这种设计实现了环境效益与功能美学的平衡,同时通过合理的价格和良好的用户体验,满足了消费者对可持续性产品的需求,成为业内可持续设计的成功案例之一。

4.3. 动态性：适应不断变化的环境和需求

材料可持续性的家具设计策略需要以动态性为核心,紧密围绕不断变化的环境和需求。设计师在实践中应从多个方面入手,以确保设计的灵活性和适应性。首先,在材料选择上,应优先使用可再生、可循环利用且生物友好的材料,例如竹材、回收金属、生物基塑料和人造皮革等。同时,应建立材料替代性评估体系,通过分析供应链的稳定性和环境影响,选择在市场和环境变化中可快速调整的材料来源[12]。具体实施细则包括建立材料库,记录各类可持续材料的性能参数、适用场景和供应渠道,以应对未来可能的变化需求。

在设计层面,应引入模块化设计理念,允许家具的部件独立拆装、更换和升级[13]。例如,设计标准化的连接件和接口,确保新旧部件能够轻松兼容;采用可调节的结构设计,如可伸缩桌腿或多功能组合柜,以适应不同使用场景和空间需求。此类灵活设计不仅延长了家具的使用寿命,还降低了更换家具时产生的资源浪费。

家具的动态性也与其生产和供应链密切相关。设计师和企业可以通过数字化制造技术(如 3D 打印)实现按需生产,降低库存压力和过度生产的风险。同时,利用物联网技术追踪产品生命周期中的使用情况,为后续维护、升级或回收提供数据支持。在废弃阶段,设计应确保材料的易分解性或可回收性,例如避免使用多种材料复合的部件,减少回收处理的复杂度。

评估动态性策略效果的指标可以从多个维度展开,包括部件替换率、用户需求适应性(如客户定制化需求满足率)、产品生命周期延长幅度,以及废弃物回收率。

以 Herman Miller 的 Aeron 椅为例,其模块化设计允许用户更换受损或升级部件,延长产品使用寿命;其主要材料为回收铝和塑料,确保产品生命周期结束后可以进行高效回收。此外,公司通过持续的设计优化,不断满足办公家具市场对人体工程学和环保的需求,成为动态性设计的标杆案例。

4.4. 目的性：追求多重价值和目标的平衡

基于材料可持续性的家具设计策略强调目的性,需要在多重价值和目标之间取得平衡。设计师在实践中应综合考虑环境影响、社会责任、经济可行性和用户满意度,通过明确的实施细则和评估体系来实现多方面的协调与优化。

在材料选择上,设计师应优先考虑成本效益与环境友好性的结合[14]。例如,选择价格适中的可再生材料(如竹材或废弃木材复合板)替代昂贵或高能耗的传统材料,同时确保材料符合耐用性和安全性的基本要求。实施建议包括对原材料供应链的社会责任审查,选择不涉及环境破坏的供应商,从而在经济目标与社会责任之间取得平衡。

功能与美学方面,设计多功能家具是一种有效策略。通过优化设计让家具具有灵活用途,例如沙发床、可折叠餐桌等,可以减少用户购买多件家具的需求,从而降低资源消耗[15]。同时,家具的美学设计应满足多样化的用户偏好,例如通过中性色调和简约造型,提升家具的适配性和市场接受度。具体实施包括:通过用户调研收集需求,结合现代设计趋势,开发满足不同场景使用的产品线。

在生产环节,应优先采用经济高效的制造工艺,如利用数字化工具进行优化排版以减少材料浪费,

或采用能源效率高的生产设备以降低碳排放[16]。此外，设计师可以引入产品生命周期的成本评估方法，将家具的使用周期和维护成本纳入设计决策，从而平衡短期生产成本与长期经济效益。

用户满意度也是目的性平衡的重要部分。企业可以通过提升售后服务质量(如提供维修或升级服务)来延长家具使用寿命，同时通过透明化的生产信息，让用户了解产品的环保优势，从而增强其购买信心和品牌忠诚度。

评估指标可以涵盖多个维度，例如材料使用成本与可持续性得分、产品多功能性及其市场需求适配性、产品生命周期内的碳排放量，以及用户满意度评分[17]-[20]。以瑞典家具品牌 IKEA 为例，其 KALLAX 搁架单元采用可再生刨花板材料，设计简洁且功能灵活，可适配家庭、办公室等多种场景。通过规模化生产降低成本，同时提供透明的材料来源信息和优质的售后服务，IKEA 成功在环境影响、经济效益和用户满意度之间实现了平衡，成为目的性设计的典范。

4.5. 层次性：建立全局视野和合作伙伴关系

在材料可持续性的家具设计中，层次性思维至关重要，它要求设计师具备全局视野，并与各方合作伙伴建立紧密的合作关系[21]。要实现这一目标，设计师应主动与材料供应商、制造商、消费者以及其他利益相关者进行合作，确保从多角度理解设计需求，并共同推动创新的材料选择、设计方案以及生产方式的探索。包括与材料供应商建立长期合作关系，确保所选材料不仅符合可持续性标准，还能够稳定供应。这可以通过供应商认证、材料质量标准的制定以及供应链透明化来实现。同时，与制造商的合作应侧重于共同研发新型生产工艺，例如利用绿色制造技术，减少能耗和废料排放。在此过程中，设计师需要关注生产环节的环境足迹，通过与制造商密切沟通，改进生产工艺并验证每个环节的环保效果。

跨学科合作在设计中也扮演着重要角色。例如，设计师可以与环境科学家、工程师、甚至社会学家共同探讨材料对环境的长远影响，或与消费者行为学专家合作，了解市场需求和用户使用习惯。通过这种跨学科合作，设计师能够获得更多元的思考方式，从而在家具设计中考虑到更多的社会和环境因素，提升设计的综合性能。

在与消费者的互动中，设计师可以通过市场调研、用户反馈等方式了解他们对于家具可持续性和功能性的实际需求。例如，通过定期举办消费者工作坊或在线问卷调查，收集关于材料、设计、功能等方面的反馈，以便不断优化设计方案。这种与消费者的持续对话有助于设计师了解市场趋势，改进产品的可用性和可持续性。

评估层次性策略的效果，可以通过以下几个指标：供应链的可持续性评分(包括原材料的来源、运输方式、生产过程的碳足迹等)、跨学科合作的有效性(例如合作项目的创新成果、各方贡献的整合程度)，以及消费者满意度和市场反响(如产品的市场占有率、用户反馈的环境意识等)。

以 Patagonia 为例，该公司在家具设计中引入了与可再生材料供应商和环境保护组织的深度合作，确保产品在各个环节都具备可持续性。同时，Patagonia 还与消费者建立了密切的联系，通过品牌倡导环保理念和提供维修服务，延长产品的生命周期，进一步提高了品牌的社会责任感和市场认可度，成为行业内推动可持续设计的典范。

4.6. 结论

基于材料可持续的家具设计策略需要从系统论的角度进行思考和实施。整体性、相关性、动态性、目的性和层次性是设计师应该关注的关键方面。通过综合考虑家具的生命周期、设计与环境因素的相关性、适应变化的动态环境和需求、追求多重价值和目标的平衡，以及建立全局视野和合作伙伴关系，设计师可以为可持续发展做出贡献，并在材料可持续的家具设计领域实现创新和实践。

参考文献

- [1] Opoku, A. (2016) SDG2030: A Sustainable Built Environment's Role in Achieving the Post-2015 United Nations Sustainable Development Goals. *Proceedings of the 32nd Annual ARCOM Conference*, Manchester, 5-7 September 2016, 1101-1110.
- [2] Xu, X. (2024) Assessing China's Path to Carbon Neutrality: Analyzing Historical and Projected Electricity-Related Carbon Emissions in the Context of the Dual Carbon Plan. *E3S Web of Conferences*, **528**, Article 03017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452803017>
- [3] Asman, N.S.A., Raymond, M.B., Mohamad, H.M., et al. (2023) Life Cycle Assessment of Plastic Waste into Furniture Using Open LCA Software. *Transactions on Science and Technology*, **10**, 88-94.
- [4] 张付英, 段晶莹, 陈建垒, 等. 面向产品可持续设计的关键功能模块识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1828-1838.
- [5] 康欢, 曹国忠, 赵超凡. 基于产品生命周期的多功能家具设计[J]. 包装工程, 2018, 39(14): 39-43.
- [6] 张威. 美国环境新闻的轨迹及其先锋人物(1844-1966) [J]. 国际新闻界, 2004(3): 25-29.
- [7] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990(1): 3-10, 64.
- [8] 刘娟. 系统论在工业设计领域的应用与研究[J]. 艺术科技, 2016, 29(1): 290.
- [9] Muthu, S.S. (2014) Estimating the Overall Environmental Impact of Textile Processing: Life Cycle Assessment (LCA) of Textile Products. In: Muthu, S.S., Ed., *Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain*, Woodhead Publishing, 105-131. <https://doi.org/10.1533/9781782421122.105>
- [10] Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., et al. (2013) Critical Aspects in the Life Cycle Assessment (LCA) of Bio-Based Materials—Reviewing Methodologies and Deriving Recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, **73**, 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.006>
- [11] Lewis, T., Liu, F. and Song, J. (2014) A Dynamic Mechanism for Achieving Sustainable Quality Supply. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2513103>
- [12] Blagoeva, D., Alves, D.P., Marmier, A., et al. (2016) Assessment of Potential Bottlenecks Along the Materials Supply Chain for the Future Deployment of Low-Carbon Energy and Transport Technologies in the EU: Wind Power, Photovoltaic and Electric Vehicles Technologies, Time Frame: 2015-2030. Office of the European Union. <https://doi.org/10.2790/198578>
- [13] Wang, S. (2022) Application of Product Life Cycle Management Method in Furniture Modular Design. *Mathematical Problems in Engineering*, **2022**, Article ID: 7192152. <https://doi.org/10.1155/2022/7192152>
- [14] Kumi, L. and Jeong, J. (2023) Optimization Model for Selecting Optimal Prefabricated Column Design Considering Environmental Impacts and Costs Using Genetic Algorithm. *Journal of Cleaner Production*, **417**, Article 137995. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137995>
- [15] da Silva Cavalcante, R.L. (2024) Integrating Sustainability in Furniture Design: A Holistic Analysis of Materials, Manufacturing Processes, and Circular Economy. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, **18**, e04570. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n4-035>
- [16] Duflou, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., et al. (2012) Towards Energy and Resource Efficient Manufacturing: A Processes and Systems Approach. *CIRP Annals*, **61**, 587-609. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.002>
- [17] 向东, 段广洪, 汪劲松, 等. 基于产品系统的产品绿色度综合评价[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(8): 12-16.
- [18] Willskytt, S. and Brambila-Macias, S.A. (2020) Design Guidelines Developed from Environmental Assessments: A Design Tool for Resource-Efficient Products. *Sustainability*, **12**, Article 4953. <https://doi.org/10.3390/su12124953>
- [19] 闫志国, 吴元欣, 袁华, 等. 化工产品的绿色设计及其集成评价方法的研究[J]. 化学与生物工程, 2006, 23(8): 1-3, 10.
- [20] Cordova, M. and Coronado, F. (2020) Supply Chain Innovation and Sustainability Frontiers: A Balanced Scorecard Perspective. In: Park, S.H., Gonzalez-Perez, M.A. and Floriani, D.E., Eds., *The Palgrave Handbook of Corporate Sustainability in the Digital Era*, Springer International Publishing, 479-501. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42412-1_24
- [21] Adams, R., Jeanrenaud, S., Bessant, J., et al. (2012) Innovating for Sustainability. A Systematic Review of the Body of Knowledge. Network for Business Sustainability.