

基于DEMATEL-ISM-MICMAC的建筑业绿色供应链管理影响因素研究

范晓娜, 刘小红, 苑亚茹, 彭庆艳

贵州大学管理学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年5月20日; 录用日期: 2024年10月15日; 发布日期: 2024年10月22日

摘要

建筑业供应链绿色化是当前社会可持续发展的重要领域之一, 识别建筑业绿色供应链管理影响因素的相互关系及该系统中的关键驱动因素, 对建筑业绿色发展具有重要意义。首先, 基于文献和专家访谈从6个维度构建建筑业绿色供应链管理全过程影响因素体系。其次, 通过构建DEMATEL模型, 定量识别各因素的中心度和原因度, 明确各影响因素的相互关系; 采用ISM-MICMAC模型将影响因素进行层级结构划分, 并对系统影响因素的依赖度和驱动力进行分析, 进一步明确建筑业绿色供应链管理的深层驱动因素。最后, 在实证分析的基础上分别从政府引导, 企业发展, 消费者需求三个角度并结合市场的发展趋势对建筑业绿色供应链的管理提出相关的建议。

关键词

DEMATEL-ISM-MICMAC模型, 建筑业绿色供应链管理, 影响因素

Research on Influencing Factors of Green Supply Chain Management in the Construction Industry Based on DEMATEL-ISM-MICMAC

Xiaona Fan, Xiaohong Liu, Yaru Yuan, Qingyan Peng

School of Management, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: May 20th, 2024; accepted: Oct. 15th, 2024; published: Oct. 22nd, 2024

Abstract

The greenization of the construction industry supply chain is one of the important areas for

文章引用: 范晓娜, 刘小红, 苑亚茹, 彭庆艳. 基于 DEMATEL-ISM-MICMAC 的建筑业绿色供应链管理影响因素研究[J]. 电子商务评论, 2024, 13(4): 602-615. DOI: 10.12677/ecl.2024.1341191

sustainable development in today's society. Identifying the interrelationships among the influencing factors of green supply chain management in the construction industry and the key driving factors in the system is of great significance for the green development of the construction industry. Firstly, based on literature review and expert interviews, a system of influencing factors throughout the entire process of green supply chain management in the construction industry is constructed from six dimensions. Secondly, by constructing the DEMATEL model, the centrality and causality of each factor are quantitatively identified, and the interrelationships among the influencing factors are clarified. The ISM-MICMAC model is used to divide the influencing factors into hierarchy and analyze the dependence and driving force of the system influencing factors, further clarifying the deep driving factors of green supply chain management in the construction industry. Finally, based on empirical analysis, relevant suggestions for the management of green supply chains in the construction industry are proposed from the perspectives of government guidance, enterprise development, and consumer demand, combined with the development trends of the market.

Keywords

DEMATEL-ISM-MICMAC Model, Green Supply Chain Management in the Construction Industry, Influencing Factors

Copyright © 2024 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

国家《第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出，推动绿色发展，促进人与自然和谐共生。建筑产业绿色可持续发展是当今社会的主题之一，对于减少环境污染、提高资源利用效率具有重要意义。传统的建筑业供应链管理存在诸多问题，如高能耗、高排放、低效率等，亟待通过优化和改进来实现绿色化和可持续发展。建筑业绿色供应链管理是指将环境理念融入传统建筑供应链管理之中，在提高建筑业整体经济效益的同时着重考虑整条供应链的环境和社会附加效益的提升[1]。在过去几十年的工业发展中，建筑业的能源消耗和环境影响日益引起人们的关注。作为全球最大的能耗行业之一，建筑业能源消耗总量比重为 45.5% [2]。因此，建筑业绿色供应链管理的研究和实践对资源节约型社会的发展具有重要意义。

建筑业绿色供应链管理是基于建设项目的全生命周期而形成的动态管理过程，涉及诸多参与方，各参与方之间因资金流、物质流、信息流的管理约束形成一个复杂的供应链网络系统。各参与方在建筑业绿色供应链管理的不同阶段产生主导行为和次要行为，对这些行为的管理和约束是建筑业绿色可持续发展的关键切入点。国内外对于建筑业绿色供应链管理的研究集中于局部主要过程，部分参与方的行为和利益分析，Xiao J 等通过对再生骨料混凝土和天然骨料混凝土制成的建筑物在全球升温潜能值和累积能源需求指标数据的对比分析，得出再生骨料混凝土的使用减少了建筑碳足迹的排放，配合相应的回收策略和运输距离的管理大大提高了再生骨料混凝土为建筑行业带来的环境效益[3]；Esa R M 等从建筑全生命周期的角度出发，提出一个基于循环经济的理论体系，为建筑业的规划、设计、采购、施工和拆除阶段制定废物最小化战略[4]；Kim M 等基于对韩国的一家主要建筑公司及其供应商对供应商环境管理能力理解一致性进行调研后，得出供应商对环境的理解能力高于承包商，为建筑行业战略伙伴的选取提供了参考依据[5]；占松林等通过分析建筑节能市场主体间的行为关联，得出消费者的购房行为对于建筑节能市场具有先导作用，指出从制度层面消除各参与方的风险可以大大加快建筑节能的步伐[6]；宋卓洋等

通过构建 AHP-熵权法结构评分模型对供应商的选取进行量化,以期促进建筑施工企业绿色供应链成本的管理和优化[7]; 风亚红等通过分析建筑供应链主要参与主体与总承包商的博弈行为,指出宏观调控和市场调节是构建建筑业绿色供应链的主要途径[8]; 李慧等通过将建筑业生产过程进行阶段划分结合两阶段网络 DEA 模型,从全国领域和区域领域对建筑业绿色全要素生产率进行测算,指出除北京市外,其余被调查省市都存在较大改善空间[9]。

对于建筑业绿色供应链管理的全过程分析国内外研究起步都较晚,且研究多围绕风险管理、仿真模拟和实例应用分析、评价指标识别等方面展开, Mochamad Agung Wibowo 等基于绿色供应链在制造业的实施,从建筑业项目的全生命周期考虑,为建筑绿色供应链作了补充并明确绿色启动和绿色设计可以作为建筑业绿色供应链管理的开始[10]; Pankaj S 等对北印度的建筑业绿色供应链管理展开实例研究,并验证了其研究结果在未来的可行性[11]; 黄桂林等基于社会网络分析模型,从利益相关者和建筑全生命周期的角度出发,识别影响装配式建筑全生命周期绿色供应链的关键风险及其关系和特征[12]。周鹏飞基于系统动力学对建筑供应链进行建模,并进行实例仿真分析,指出建筑绿色供应链是建筑业节能减排的重要环节[13]。仇国芳等人基于绿色供应链管理的理念,利用三角模糊数和灰关联分析方法构建了一个综合评价模型,并将该模型运用于案例分析,验证了该模型的可行性[14]。

基于此,国内外学者对于建筑业绿色供应链管理的研究已经取得一定成就,但对基于全过程管理的建筑业绿色供应链管理影响因素相互关系及内在逻辑的分析还有待深入研究。建筑业绿色供应链系统关键驱动因素的把控对于建筑业的绿色可持续发展具有重要意义。本文从建筑项目的全生命周期出发,充分考虑绿色供应链管理过程的动态性,形成以绿色设计、绿色采购、绿色生产、绿色运输、绿色施工、绿色回收六个维度为主体,构建 DEMATEL-ISM-MICMAC 模型,确定影响因素,判断其相互关系,探寻各因素的作用机制,并根据分析结论提出相关建议,以期为建筑绿色供应链的发展做出些许贡献。

2. 建筑业绿色供应链管理影响因素识别

建筑业绿色供应链管理是建筑行业不可缺少的一个环节,它的好坏直接影响到整个工程的建设。为识别建筑业绿色供应链管理的影响因素,本文首先通过以“建筑业绿色供应链”为关键词在 CNKI 库进行检索,符合要求的中外文期刊论文 105 篇,学位论文 31 篇,基于以上检索识别建筑业绿色供应链管理在绿色设计、绿色生产、绿色运输、绿色施工、绿色回收、绿色采购 6 个主要环节的影响因素因素。最后通过调查问卷、专家访谈等方法,依据专家遴选标准共选取 15 名建筑业供应链专家,学历均为博士,其中高级职称 6 名,副高级职称 8 名,讲师 1 名。本次研究中,共进行两轮专家咨询,第一轮发出问卷 15 份,回收 15 份,回收率 100%,有 7 位专家提出了修改意见。第二轮发出问卷 15 份,回收 15 份,回收率 100%,有 2 位专家提出了修改意见。最终构建了建筑业绿色供应链管理影响因素体系并对其进行解释说明,如表 1 所示。

决策实验室分析法(DEMATEL)是利用图论和矩阵工具,对复杂问题进行简化,并对其各方面进行定性和定量分析的方法,通过原始数据计算出中心度和原因度,判断每个因素的作用和地位以及因素间的关联程度。解释结构模型法(ISM)是一种通过布尔逻辑运算将系统进行等级和层次划分的系统科学方法,该方法以层级拓扑图的形式展现结论,可清晰直观地了解系统各因素的层级结构。交叉影响矩阵相乘法(MICMAC)是运用影响矩阵相乘法将系统中各因素按驱动力和影响度进行划分的一种研究方法。

将以上三种方法结合,可实现优势互补,计算每个维度的中心度和原因度的同时,能进一步找出所有影响因素的层次划分,通过对比找出各个维度的最关键因素以及比较重要的维度,再结合 ISM 模型分析各因素关系对建筑业绿色供应链管理提供思路。另外,DEMATEL 模型可以简化 ISM 模型的计算,图论和矩阵的引入简化了各因素之间的复杂层次划分,MICMAC 模型也可以基于 DEMATEL 模型进行累计计算。

Table 1. Influencing factors of green supply chain management in construction industry**表 1.** 建筑业绿色供应链管理影响因素

主要环节	影响因素	编号	解释	指标来源
绿色设计	生产阶段规划	A1	有关产品设计过程中绿色材料的选择, 能源的使用, 绿色生产方式的应用, 技术创新的生产规划	文献[2]-[5]
	施工阶段规划	A2	在绿色建筑施工过程中, 材料和能源在整个施工过程的选择、采购、回收的规划, 确保资源有效利用和减少环境污染	
	使用阶段规划	A3	在建筑物使用期间, 建筑物整体气候、环境适应, 能源供应与节约, 物质排放处理, 都会影响到后期绿色供应链的实施	
	建筑废物回收处理	A4	合理进行回收和处置废弃建筑材料规划, 减少环境污染和资源浪费	
绿色生产	绿色环保原材料	B1	在建筑项目中使用环保、可循环利用或生物降解的材料将有助于提高供应链的可持续性	文献[15] [16]
	生产成本	B2	绿色或环保原材料, 资源节约型设备, 绿色生产方式的使用会造成生产成本的增加	
	生产加工方式	B3	在生产和加工过程中采用环保技术和方法, 以实现绿色化、可持续发展的生产和加工方式	
	市场需求	B4	市场需求影响绿色建筑物流供应链的生产环节, 使其需要根据市场规模、变化速度、质量标准和需求预测的准确性调整生产规模、节奏和策略, 以满足绿色建筑的特性和市场需求	
	产品包装	B5	在绿色建筑物流供应链的生产环节中, 产品包装的设计和材料选择需要满足环保和可持续发展的要求, 以减少对环境的影响并提高资源利用效率	
绿色运输	运输距离	C1	这是决定运输方案主要的因素, 距离会影响运输成本和时间	文献[17] [18]
	运输成本	C2	运输成本包括了运输设备、燃料、劳动力以及其他间接成本	
	运输管理	C3	绿色运输管理的措施和效率, 如是否采用多式联运、共同运输等协同方式, 线上线下两网融合 Original to Destination 运输路径优化水平	
	货物批量类型	C4	不同的商品可能需要不同的运输条件, 例如温度控制, 特殊的装载和卸载设备等	
绿色施工	绿色建筑产品	D1	选择环保建材, 如可再生材料和低挥发性有机化合物(VOC)制作的具有节能、可回收、再循环特点的产品, 以减少对环境的影响	文献 [19]
	绿色施工技术	D2	采用绿色施工技术, 如低能耗设备和节能工艺, 降低能源消耗和碳排放	
	人员数量及其培训	D3	提高绿色专业人员的数量和培训水平, 确保施工过程符合环保标准和最佳实践	
	现场管理与监督	D4	加强施工管理和监督, 采取合理措施降低建筑废弃物和污染排放, 确保环保要求得到有效实施和遵守	
	存储费用	D5	合理控制建筑材料的存储费用, 减少浪费和成本, 提升效益	
绿色回收	经济效益	E1	经济因素包括废弃建筑物回收的成本和回收后的经济利益。如果废弃建筑物回收的成本较高, 或无法获取足够的经济利益, 可能会降低回收的积极性	文献[20] [21]
	废弃物特性	E2	不同种类的废弃物对回收设备、回收处理方式要求不同, 造成的环境效益不同, 针对不同废弃物种类构建相应建筑废弃物分类和回收体系	

续表

	社会环保意识	E3	社会对环境保护和可持续发展的意识程度会对废弃建筑物回收产生影响。管理人员和现场工人对资源节约和环境保护的重要性的认识 and 关注程度与建筑废弃物回收具有正向关系	
	逆向物流关系	E4	建筑材料和装饰材料由供应链下游返回供应链上游渠道的畅通, 促进绿色供应链的循环发展	
绿色采购	供应商审核标准	F1	供应商对社会和环境保护责任的履行是绿色供应链中重要一环, 决定后期的绿色供应链的可持续性进行	文献[7] [8]
	信息沟通渠道	F2	企业之间的生产信息、环保信息、绿色材料采购信息是否公开, 影响绿色采购这一过程的效率	
	采购成本	F3	采购人员培训、采购方案策划与选择、采购实施过程形成的显性经济支出决定采购过程能否正常进行	
	采购标准的选用	F4	绿色标准对不同产品要求各异, 了解国家所规定的建筑产品的绿色标准和绿色清单结合行业所需规范建立统一标准具有重要作用	

3. DEMATEL-ISM-MICMAC 模型的构建

3.1. DEMATEL 模型的构建

构建 DEMATEL 模型, 通过对收集的数据进行矩阵化处理, 计算各影响因素的影响度与被影响度, 然后计算各影响因素的中心度和原因度。

3.1.1. 构建直接影响矩阵 W

$$W = \begin{pmatrix} 0 & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & 0 \end{pmatrix} = w_{ij(n \times n)} \quad (1)$$

其中 w_{ij} 表示因素 i 对 j 因素的影响程度。

3.1.2. 规范化直接影响矩阵并构建综合影响矩阵 T

将初始直接影响矩阵规范化处理, 得到标准直接影响矩阵 K , 在此基础上构建综合影响矩阵 T 。

$$t = \max \left[\sum_{i=1}^n w_{ij}, \sum_{j=1}^m w_{ij} \right] \quad (2)$$

$$K = W/t \quad (3)$$

$$T = \lim_{n \rightarrow \infty} (K + K^2 + K^3 + \cdots + K^n) = A(I - A)^{-1} \quad (4)$$

其中, t 表示直接影响矩阵中各行和、各列和的最大值, I 代表单位矩阵, K 代表标准直接影响矩阵。

3.1.3. 计算影响度、被影响度、中心度和原因度

综合影响矩阵 T 进一步明确了各因素之间的间接影响, 但数据存在冗余现象, 通过对综合影响矩阵数据进行整合, 计算各因素的影响度和被影响度指数, 并在此基础上得到各因素的中心度和原因度, 进而明确各因素的重要性权重。

$$D_i = \sum_{i=1}^k T_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^k T_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$B_i = D_i + E_i \quad (7)$$

$$C_i = D_i - E_i \quad (8)$$

其中, D_i 为第 i 个影响因素驱动其它因素变动的程度; E_i 为第 i 个影响因素随其它影响因素变动而变动的程度; B_i 和 C_i 分别表示第 i 个影响因素与其它因素之间的被动或主动影响关系, 中心度越大说明该因素越重要; 原因度中正值表示该因素为原因要素, 负值表示该因素为结果要素。

3.2. ISM-MICMAC 模型构建

构建 ISM-MICMAC 模型, 通过对综合影响矩阵进行矩阵运算, 得到整体影响矩阵和可达矩阵, 并在此基础上绘制系统各要素的递阶层级结构图以及驱动力和依赖度象限图。

3.2.1. 构建整体影响矩阵 K

在综合影响矩阵将系统各因素之间的影响关系传递的基础上, 与单位矩阵相加, 得到整体影响矩阵 K

$$K = T + I \quad (9)$$

其中, T 为综合影响矩阵, I 代表单位矩阵。

3.2.2. 设置阈值和构建可达矩阵 S_{ij}

将综合影响矩阵中的数据的均值设置为经验阈值 λ , 剔除系统各因素之间影响程度较小的关系, 构建可达矩阵 S_{ij}

$$S_{ij} = \{1 | K_{ij} \geq \lambda\}, (i=1, \dots, n; j=1, \dots, n) \quad (10)$$

$$S_{ij} = \{0 | K_{ij} < \lambda\}, (i=1, \dots, n; j=1, \dots, n) \quad (11)$$

其中, λ 代表阈值, S_{ij} 代表可达矩阵。

3.2.3. 确定可达集、先行集和共同集

基于可达矩阵, 确定可达集、先行集和共同集。某元素的可达集为矩阵中该元素对应的行数据之和; 某元素的先行集为矩阵中该元素对应的列数据之和; 某元素的共同集为该元素可达集和先行集的交集

$$R(S_i) = M(S_i) \cap N(S_i), (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

其中, $M(S_i)$ 代表可达矩阵中第 i 个元素的可达集, $N(S_i)$ 代表可达矩阵中第 i 个元素的先行集, $R(S_i)$ 代表可达集和先行集中的共同元素组成的共同集, 继而绘制系统各要素的递阶层级结构。

3.2.4. 计算驱动力和依赖度

以可达矩阵为基础, 分别对其各行和列进行求和得到系统各影响因素的驱动力 Q 和依赖度 Y , 驱动力 Q 越高表示该因素的改进对其他因素的促进作用越大, 依赖度 Y 越高表示该因素的改进对其他因素的依赖性越大。

4. 实证研究与结果分析

4.1. 建筑绿色供应链影响因素相互关系分析——基于 DEMATEL 方法

4.1.1. 数据获取

邀请 15 位建筑与供应链领域的专家, 基于他们的从业经验和学业知识, 按照 0~4 分(0 分指无影响, 1 分指低影响, 2 分指中影响, 3 分指高影响, 4 分指极高影响)进行打分。通过 SPSS 对收集的打分问卷

进行信度检验，得到整体 Cronbach's α 值为 0.96，满足要求。

4.1.2. 构建直接影响矩阵

综合考虑各专家作答的数据，建立直接影响矩阵 $W = [W_{ij}]_{n \times m}$ ，其中 W_{ij} 表示因素 i 对因素 j 的影响程度。

$$W = \begin{bmatrix} 0.0 & 2.8 & 2.4 & 2.2 & 3.4 & 3.8 & 3.4 & 3.4 & 2.0 & 2.2 & 2.2 & 2.0 & 2.0 & 3.0 & 3.0 & 2.4 & 2.4 & 3.0 & 2.8 & 2.4 & 2.6 & 2.2 & 3.0 & 2.8 & 2.8 & 3.4 \\ 2.2 & 0.0 & 2.6 & 2.4 & 2.4 & 2.6 & 2.6 & 2.2 & 2.0 & 2.4 & 2.2 & 2.0 & 1.4 & 2.8 & 3.6 & 3.0 & 3.2 & 3.0 & 2.6 & 2.2 & 2.8 & 2.0 & 2.2 & 2.4 & 2.2 & 2.6 \\ 2.6 & 3.2 & 0.0 & 2.6 & 3.2 & 3.0 & 2.8 & 2.4 & 1.8 & 2.0 & 2.0 & 1.8 & 1.8 & 2.8 & 3.0 & 2.2 & 2.2 & 2.4 & 3.0 & 2.2 & 2.8 & 2.2 & 3.2 & 2.4 & 2.4 & 2.4 \\ 2.2 & 2.4 & 2.2 & 0.0 & 3.6 & 2.0 & 3.2 & 1.6 & 2.4 & 1.4 & 1.8 & 2.0 & 1.8 & 2.8 & 2.8 & 2.4 & 2.4 & 2.2 & 2.6 & 3.8 & 3.2 & 2.2 & 1.8 & 2.0 & 1.8 & 3.0 \\ 2.2 & 2.2 & 2.8 & 2.6 & 0.0 & 3.6 & 3.4 & 2.6 & 3.2 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 2.4 & 3.6 & 2.0 & 2.6 & 2.2 & 2.0 & 3.6 & 3.4 & 3.4 & 2.6 & 3.2 & 1.4 & 3.0 & 3.8 \\ 3.4 & 2.8 & 2.8 & 3.2 & 3.0 & 0.0 & 3.0 & 3.2 & 3.0 & 1.8 & 2.4 & 2.2 & 2.4 & 3.4 & 3.0 & 3.2 & 2.6 & 3.0 & 3.2 & 1.6 & 1.6 & 1.0 & 2.6 & 1.8 & 3.2 & 3.0 \\ 2.8 & 2.6 & 1.8 & 2.8 & 3.6 & 3.6 & 0.0 & 2.0 & 2.2 & 1.4 & 1.6 & 1.6 & 3.0 & 3.4 & 2.0 & 3.2 & 2.8 & 1.8 & 3.0 & 3.2 & 1.6 & 1.4 & 2.6 & 1.8 & 2.0 & 3.2 \\ 2.2 & 1.6 & 1.6 & 2.0 & 2.6 & 2.4 & 2.4 & 0.0 & 1.6 & 1.4 & 1.2 & 1.2 & 2.0 & 2.4 & 2.6 & 2.2 & 1.8 & 1.4 & 2.4 & 2.0 & 2.2 & 1.6 & 1.4 & 1.4 & 2.4 & 2.4 \\ 1.6 & 1.0 & 1.0 & 2.2 & 2.4 & 3.0 & 2.6 & 1.8 & 0.0 & 1.4 & 1.8 & 1.8 & 2.4 & 1.4 & 1.4 & 1.6 & 1.6 & 2.0 & 2.0 & 2.2 & 2.2 & 1.6 & 1.4 & 0.8 & 1.6 & 2.4 \\ 2.4 & 2.6 & 1.6 & 1.2 & 1.4 & 1.8 & 1.4 & 1.8 & 1.2 & 0.0 & 2.4 & 3.0 & 2.2 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 1.4 & 2.6 & 2.2 & 1.4 & 0.8 & 2.2 & 2.0 & 1.8 & 2.6 & 1.6 \\ 2.6 & 2.8 & 2.4 & 2.4 & 1.8 & 2.0 & 1.4 & 1.6 & 2.0 & 3.2 & 0.0 & 3.8 & 3.0 & 1.4 & 1.0 & 1.2 & 1.6 & 3.0 & 2.8 & 1.6 & 0.8 & 2.4 & 2.0 & 2.0 & 2.6 & 2.0 \\ 2.4 & 2.4 & 2.0 & 1.8 & 1.2 & 2.0 & 1.6 & 1.6 & 2.0 & 2.0 & 3.2 & 0.0 & 3.0 & 1.8 & 1.6 & 1.6 & 2.2 & 2.6 & 2.2 & 2.2 & 0.8 & 2.2 & 1.8 & 2.0 & 2.2 & 1.4 \\ 2.8 & 2.4 & 2.0 & 1.8 & 2.4 & 2.4 & 2.6 & 3.2 & 2.8 & 1.6 & 2.6 & 3.4 & 0.0 & 2.4 & 2.2 & 2.0 & 2.4 & 2.6 & 2.6 & 1.8 & 1.6 & 1.4 & 2.4 & 2.4 & 3.2 & 3.2 \\ 3.0 & 2.4 & 2.6 & 1.8 & 3.6 & 3.0 & 3.4 & 3.2 & 1.8 & 1.4 & 1.4 & 2.2 & 2.4 & 0.0 & 3.8 & 3.4 & 3.4 & 2.8 & 2.8 & 2.4 & 3.0 & 2.6 & 3.2 & 2.4 & 3.4 & 4.0 \\ 3.0 & 3.0 & 2.8 & 3.2 & 3.6 & 3.0 & 3.0 & 2.6 & 2.0 & 1.0 & 1.0 & 1.2 & 2.4 & 3.6 & 0.0 & 4.0 & 3.4 & 2.2 & 3.4 & 3.0 & 2.4 & 1.4 & 2.4 & 1.6 & 2.4 & 3.2 \\ 2.0 & 2.4 & 2.2 & 2.6 & 3.2 & 2.4 & 2.6 & 1.8 & 1.6 & 1.2 & 1.4 & 1.8 & 2.2 & 3.2 & 4.0 & 0.0 & 3.4 & 1.6 & 2.4 & 1.4 & 3.0 & 2.4 & 2.6 & 1.8 & 2.0 & 3.0 \\ 1.4 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 2.2 & 2.2 & 1.8 & 1.2 & 1.4 & 1.2 & 1.0 & 1.6 & 1.8 & 2.8 & 3.0 & 2.6 & 0.0 & 2.2 & 2.0 & 2.2 & 2.0 & 2.2 & 1.8 & 2.4 & 2.0 & 2.2 \\ 2.2 & 3.0 & 1.6 & 3.2 & 2.4 & 1.6 & 1.6 & 1.8 & 2.6 & 3.4 & 3.6 & 3.0 & 3.8 & 2.4 & 2.0 & 1.8 & 2.6 & 0.0 & 2.6 & 2.8 & 0.8 & 2.2 & 2.4 & 2.4 & 3.2 & 3.4 \\ 3.4 & 2.8 & 3.2 & 3.0 & 3.2 & 3.4 & 2.8 & 2.8 & 2.4 & 3.0 & 3.0 & 3.0 & 3.0 & 3.2 & 2.6 & 2.4 & 2.8 & 3.4 & 0.0 & 2.0 & 2.2 & 2.4 & 2.2 & 3.4 & 3.4 \\ 1.8 & 1.4 & 2.2 & 2.8 & 3.6 & 2.2 & 3.6 & 1.2 & 2.0 & 1.6 & 1.4 & 1.8 & 2.4 & 2.4 & 2.0 & 1.2 & 2.2 & 1.8 & 2.0 & 0.0 & 2.2 & 1.8 & 2.4 & 1.4 & 2.2 & 3.2 \\ 2.2 & 2.4 & 2.4 & 2.6 & 2.8 & 2.0 & 2.6 & 2.6 & 2.8 & 1.8 & 1.8 & 2.0 & 1.4 & 2.4 & 2.0 & 2.4 & 2.2 & 2.0 & 2.4 & 2.6 & 0.0 & 2.2 & 2.0 & 1.2 & 2.0 & 1.8 \\ 1.6 & 1.2 & 1.6 & 2.0 & 1.8 & 1.6 & 2.0 & 1.8 & 1.8 & 2.6 & 2.8 & 3.2 & 1.8 & 1.8 & 1.4 & 1.6 & 2.0 & 2.2 & 2.6 & 2.6 & 1.6 & 0.0 & 2.6 & 3.0 & 2.2 & 2.2 \\ 2.0 & 2.2 & 1.6 & 2.4 & 3.0 & 3.0 & 3.2 & 1.4 & 1.8 & 1.8 & 1.8 & 2.2 & 2.8 & 3.2 & 3.0 & 2.4 & 2.0 & 2.0 & 2.6 & 2.6 & 2.6 & 2.8 & 0.0 & 3.0 & 2.8 & 3.6 \\ 1.4 & 1.4 & 1.4 & 2.2 & 2.0 & 3.0 & 2.4 & 1.6 & 2.2 & 1.6 & 1.6 & 2.0 & 2.2 & 2.2 & 1.8 & 2.0 & 1.8 & 2.0 & 2.6 & 2.2 & 1.6 & 3.4 & 2.8 & 0.0 & 2.8 & 2.6 \\ 2.6 & 2.0 & 2.2 & 1.4 & 3.2 & 3.0 & 2.6 & 1.8 & 2.6 & 2.6 & 1.6 & 3.0 & 2.2 & 2.6 & 1.8 & 2.0 & 1.4 & 3.4 & 3.6 & 1.8 & 1.4 & 2.2 & 2.6 & 2.6 & 0.0 & 2.6 \\ 2.6 & 1.8 & 2.4 & 2.8 & 3.8 & 3.0 & 3.2 & 2.4 & 2.4 & 1.6 & 1.4 & 2.2 & 1.8 & 3.2 & 2.8 & 2.4 & 2.6 & 2.8 & 3.6 & 3.0 & 2.0 & 2.4 & 3.2 & 3.2 & 4.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

4.1.3. 直接影响矩阵规范化和构建综合影响矩阵

基于规范化的直接影响矩阵 W_{ij} 构建综合影响矩阵 T ，根据公式(2)~(4)对直接影响矩阵 W_{ij} 进行规范。

$$T = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.21 & 0.19 & 0.21 & 0.25 & 0.25 & 0.24 & 0.21 & 0.19 & 0.17 & 0.17 & 0.19 & 0.20 & 0.24 & 0.22 & 0.20 & 0.21 & 0.22 & 0.24 & 0.21 & 0.19 & 0.19 & 0.22 & 0.19 & 0.23 & 0.25 \\ 0.19 & 0.15 & 0.18 & 0.19 & 0.22 & 0.21 & 0.21 & 0.18 & 0.17 & 0.16 & 0.16 & 0.18 & 0.17 & 0.22 & 0.21 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.22 & 0.19 & 0.18 & 0.17 & 0.19 & 0.17 & 0.20 & 0.22 \\ 0.20 & 0.20 & 0.15 & 0.20 & 0.24 & 0.22 & 0.22 & 0.18 & 0.17 & 0.16 & 0.16 & 0.18 & 0.18 & 0.22 & 0.21 & 0.19 & 0.19 & 0.20 & 0.23 & 0.19 & 0.18 & 0.18 & 0.21 & 0.17 & 0.21 & 0.23 \\ 0.18 & 0.18 & 0.17 & 0.16 & 0.23 & 0.20 & 0.22 & 0.16 & 0.17 & 0.14 & 0.15 & 0.17 & 0.18 & 0.21 & 0.19 & 0.18 & 0.19 & 0.19 & 0.21 & 0.21 & 0.18 & 0.17 & 0.18 & 0.16 & 0.19 & 0.22 \\ 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.21 & 0.21 & 0.24 & 0.24 & 0.20 & 0.20 & 0.16 & 0.17 & 0.19 & 0.20 & 0.24 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.25 & 0.22 & 0.20 & 0.19 & 0.22 & 0.17 & 0.23 & 0.26 \\ 0.22 & 0.20 & 0.20 & 0.22 & 0.25 & 0.19 & 0.23 & 0.20 & 0.20 & 0.16 & 0.18 & 0.19 & 0.20 & 0.24 & 0.22 & 0.21 & 0.21 & 0.22 & 0.24 & 0.19 & 0.17 & 0.17 & 0.21 & 0.17 & 0.23 & 0.25 \\ 0.20 & 0.19 & 0.17 & 0.20 & 0.24 & 0.23 & 0.18 & 0.17 & 0.18 & 0.15 & 0.15 & 0.17 & 0.20 & 0.22 & 0.19 & 0.20 & 0.20 & 0.19 & 0.22 & 0.20 & 0.16 & 0.16 & 0.20 & 0.16 & 0.20 & 0.23 \\ 0.16 & 0.14 & 0.14 & 0.16 & 0.19 & 0.18 & 0.17 & 0.12 & 0.14 & 0.12 & 0.12 & 0.14 & 0.15 & 0.18 & 0.16 & 0.15 & 0.15 & 0.15 & 0.18 & 0.15 & 0.14 & 0.14 & 0.15 & 0.13 & 0.17 & 0.18 \\ 0.14 & 0.13 & 0.12 & 0.15 & 0.17 & 0.17 & 0.17 & 0.13 & 0.11 & 0.11 & 0.12 & 0.14 & 0.15 & 0.15 & 0.14 & 0.14 & 0.14 & 0.15 & 0.16 & 0.15 & 0.13 & 0.13 & 0.14 & 0.11 & 0.15 & 0.17 \\ 0.15 & 0.14 & 0.13 & 0.13 & 0.22 & 0.15 & 0.14 & 0.13 & 0.12 & 0.09 & 0.13 & 0.15 & 0.14 & 0.14 & 0.13 & 0.12 & 0.13 & 0.15 & 0.16 & 0.13 & 0.11 & 0.13 & 0.14 & 0.12 & 0.16 & 0.16 \\ 0.17 & 0.17 & 0.16 & 0.17 & 0.26 & 0.18 & 0.17 & 0.15 & 0.15 & 0.15 & 0.12 & 0.18 & 0.17 & 0.17 & 0.15 & 0.15 & 0.16 & 0.18 & 0.19 & 0.16 & 0.13 & 0.16 & 0.17 & 0.15 & 0.19 & 0.19 \\ 0.16 & 0.16 & 0.14 & 0.15 & 0.25 & 0.17 & 0.16 & 0.14 & 0.14 & 0.13 & 0.15 & 0.12 & 0.17 & 0.17 & 0.15 & 0.15 & 0.16 & 0.17 & 0.18 & 0.16 & 0.12 & 0.14 & 0.16 & 0.14 & 0.17 & 0.17 \\ 0.19 & 0.18 & 0.17 & 0.18 & 0.22 & 0.21 & 0.21 & 0.19 & 0.18 & 0.15 & 0.16 & 0.19 & 0.15 & 0.21 & 0.19 & 0.18 & 0.19 & 0.19 & 0.21 & 0.18 & 0.16 & 0.16 & 0.19 & 0.17 & 0.21 & 0.23 \\ 0.22 & 0.21 & 0.20 & 0.21 & 0.26 & 0.24 & 0.25 & 0.21 & 0.19 & 0.16 & 0.17 & 0.20 & 0.21 & 0.20 & 0.23 & 0.22 & 0.23 & 0.22 & 0.24 & 0.21 & 0.20 & 0.20 & 0.23 & 0.19 & 0.24 & 0.27 \\ 0.21 & 0.20 & 0.19 & 0.21 & 0.21 & 0.23 & 0.23 & 0.19 & 0.18 & 0.15 & 0.15 & 0.17 & 0.20 & 0.24 & 0.17 & 0.22 & 0.22 & 0.20 & 0.24 & 0.21 & 0.18 & 0.17 & 0.21 & 0.17 & 0.20 & 0.25 \\ 0.18 & 0.18 & 0.17 & 0.19 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.16 & 0.16 & 0.14 & 0.14 & 0.17 & 0.18 & 0.21 & 0.21 & 0.15 & 0.20 & 0.18 & 0.21 & 0.17 & 0.18 & 0.17 & 0.19 & 0.16 & 0.19 & 0.22 \\ 0.15 & 0.15 & 0.14 & 0.15 & 0.18 & 0.17 & 0.17 & 0.13 & 0.14 & 0.12 & 0.12 & 0.14 & 0.15 & 0.18 & 0.17 & 0.16 & 0.13 & 0.16 & 0.17 & 0.16 & 0.14 & 0.14 & 0.16 & 0.14 & 0.17 & 0.18 \\ 0.19 & 0.19 & 0.17 & 0.20 & 0.22 & 0.20 & 0.20 & 0.17 & 0.18 & 0.17 & 0.18 & 0.19 & 0.21 & 0.21 & 0.19 & 0.18 & 0.19 & 0.16 & 0.22 & 0.20 & 0.15 & 0.17 & 0.20 & 0.17 & 0.22 & 0.23 \\ 0.23 & 0.21 & 0.21 & 0.22 & 0.26 & 0.25 & 0.24 & 0.21 & 0.20 & 0.19 & 0.19 & 0.21 & 0.22 & 0.25 & 0.22 & 0.21 & 0.22 & 0.23 & 0.21 & 0.21 & 0.19 & 0.20 & 0.22 & 0.19 & 0.25 & 0.26 \\ 0.16 & 0.15 & 0.16 & 0.18 & 0.21 & 0.18 & 0.20 & 0.14 & 0.15 & 0.13 & 0.13 & 0.15 & 0.17 & 0.19 & 0.17 & 0.15 & 0.17 & 0.16 & 0.19 & 0.14 & 0.15 & 0.15 & 0.17 & 0.14 & 0.18 & 0.21 \\ 0.17 & 0.17 & 0.16 & 0.18 & 0.20 & 0.18 & 0.19 & 0.16 & 0.17 & 0.14 & 0.14 & 0.16 & 0.16 & 0.19 & 0.17 & 0.17 & 0.17 & 0.17 & 0.19 & 0.18 & 0.12 & 0.16 & 0.17 & 0.14 & 0.18 & 0.19 \\ 0.15 & 0.14 & 0.14 & 0.16 & 0.18 & 0.17 & 0.17 & 0.14 & 0.15 & 0.14 & 0.15 & 0.17 & 0.15 & 0.17 & 0.15 & 0.15 & 0.16 & 0.16 & 0.19 & 0.17 & 0.14 & 0.12 & 0.17 & 0.15 & 0.17 & 0.19 \\ 0.19 & 0.18 & 0.17 & 0.19 & 0.23 & 0.22 & 0.22 & 0.17 & 0.17 & 0.15 & 0.16 & 0.18 & 0.19 & 0.22 & 0.20 & 0.19 & 0.19 & 0.19 & 0.22 & 0.20 & 0.18 & 0.18 & 0.16 & 0.18 & 0.21 & 0.24 \\ 0.16 & 0.15 & 0.14 & 0.17 & 0.19 & 0.19 & 0.18 & 0.15 & 0.16 & 0.13 & 0.14 & 0.16 & 0.16 & 0.18 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.17 & 0.19 & 0.17 & 0.14 & 0.17 & 0.18 & 0.12 & 0.19 & 0.20 \\ 0.19 & 0.17 & 0.17 & 0.17 & 0.21 & 0.21 & 0.20 & 0.17 & 0.18 & 0.16 & 0.15 & 0.18 & 0.18 & 0.21 & 0.18 & 0.18 & 0.17 & 0.20 & 0.22 & 0.18 & 0.15 & 0.17 & 0.19 & 0.17 & 0.17 & 0.22 \\ 0.20 & 0.19 & 0.19 & 0.21 & 0.23 & 0.23 & 0.23 & 0.19 & 0.19 & 0.16 & 0.16 & 0.19 & 0.19 & 0.23 & 0.21 & 0.20 & 0.20 & 0.21 & 0.24 & 0.21 & 0.18 & 0.18 & 0.22 & 0.17 & 0.24 & 0.20 \end{bmatrix}$$

4.1.4. 计算影响度、被影响度、中心度和原因度

根据公式(5)~(8)计算各因素的影响度、被影响度、原因度和中心度，结果如表 2 所示。

Table 2. Centrality and causality degree of influencing factors in green supply chain management in the construction industry
表 2. 建筑业绿色供应链管理影响因素的中心度和原因度

变量	影响度	被影响度	中心度	原因度
A1	5.44	4.73	10.18	0.71
A2	4.95	4.55	9.50	0.40
A3	5.05	4.32	9.37	0.73
A4	4.81	4.76	9.57	0.05
B1	5.41	5.60	11.01	-0.19
B2	5.37	5.29	10.66	0.08
B3	4.97	5.26	10.23	-0.30
B4	3.96	4.34	8.30	-0.39
B5	3.67	4.34	8.01	-0.68
C1	3.54	3.81	7.35	-0.27
C2	4.27	3.93	8.20	0.34
C3	3.99	4.45	8.45	-0.46
C4	4.83	4.63	9.46	0.20
D1	5.60	5.28	10.87	0.32
D2	5.28	4.80	10.07	0.48
D3	4.73	4.60	9.34	0.13
D4	3.96	4.74	8.70	-0.78
D5	4.96	4.82	9.78	0.14
E1	5.71	5.43	11.15	0.28
E2	4.30	4.73	9.03	-0.43
E3	4.39	4.16	8.55	0.23
E4	4.11	4.25	8.35	-0.14
F1	5.00	4.84	9.84	0.15
F2	4.26	4.07	8.33	0.19
F3	4.75	5.19	9.94	-0.43
F4	5.26	5.62	10.88	-0.35

4.1.5. 中心度和原因度分析

根据表 4，以中心度 N_i 、原因度 P_i 建立坐标轴，以中心度的平均值 $N_i = 9.43$ ，原因度 $P_i = 0$ 划分象限，绘制各影响因素的影响关系如图 1 所示。

从图 1 可以看出，生产阶段规划、建筑废物回收处理、施工阶段规划等位于第一象限，主要属于绿色设计和绿色施工两个维度，对其他因素有较大影响，属于关键因素，说明绿色设计阶段的合理规划和绿色施工阶段的科学把控是建筑业绿色供应链管理的要点；绿色或环保原材料、生产加工方式、产品采

购成本等位于第四象限，属于绿色生产和绿色采购两个维度，中心度较高，对建筑业绿色供应链管理有较大影响，原因度为负值，属于结果要素，易受其他因素的影响，在进行建筑业绿色供应链管理时要充分考虑其重要性和受影响敏感度；使用阶段规划、运输成本、绿色专业人员数量及其培训等位于第二象限，主要属于绿色设计、绿色运输、绿色回收、绿色采购四个维度，原因度较高，对其他因素有较大影响，应促进这些因素的持续优化对所属维度下其他因素的推动作用；市场需求、产品包装、运输距离等位于第三象限，主要属于绿色生产、绿色运输、绿色回收三个维度，易受其他因素的影响，是建筑业绿色供应链管理不容忽视的结果因素，应充分考虑这些因素受影响的灵敏度，保证整个维度的系统性。

4.2. 建筑业绿色供应链管理影响因素层级划分——基于 ISM 方法

4.2.1. 构建整体影响矩阵和计算可达矩阵

基于综合影响矩阵 T 构建整体影响矩阵 K ，计算综合影响矩阵中各项的平均值为阈值 $\lambda = 0.21$ ，若整体影响矩阵中的元素大于等于 λ ，则在可达矩阵中表示为“1”，若整体影响矩阵中的元素小于阈值 λ ，则在可达矩阵中表示为“0”。按照公式(9)~(11)，从而构建可达矩阵 S_{ij} 。

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2.2. 确定可达集、先行集和共同集

基于可达矩阵，按照公式(12)，确定可达集、先行集和共同集。根据所得结果，按照模型建构步骤对

系统各因素进行层级划分，划分结果见图 2 所示。

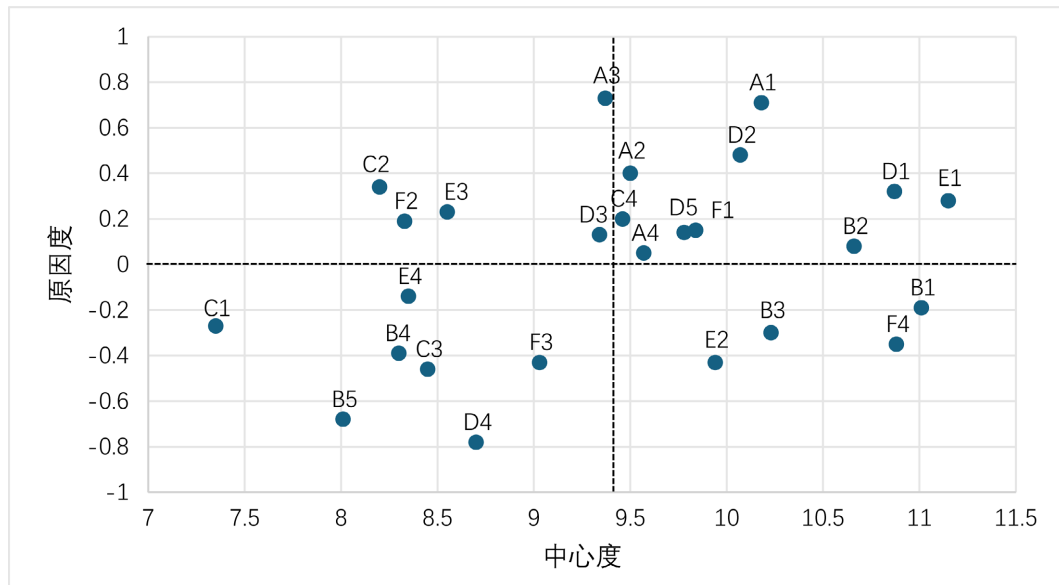


Figure 1. Relationship diagram of influencing factors
图 1. 影响因素关系图

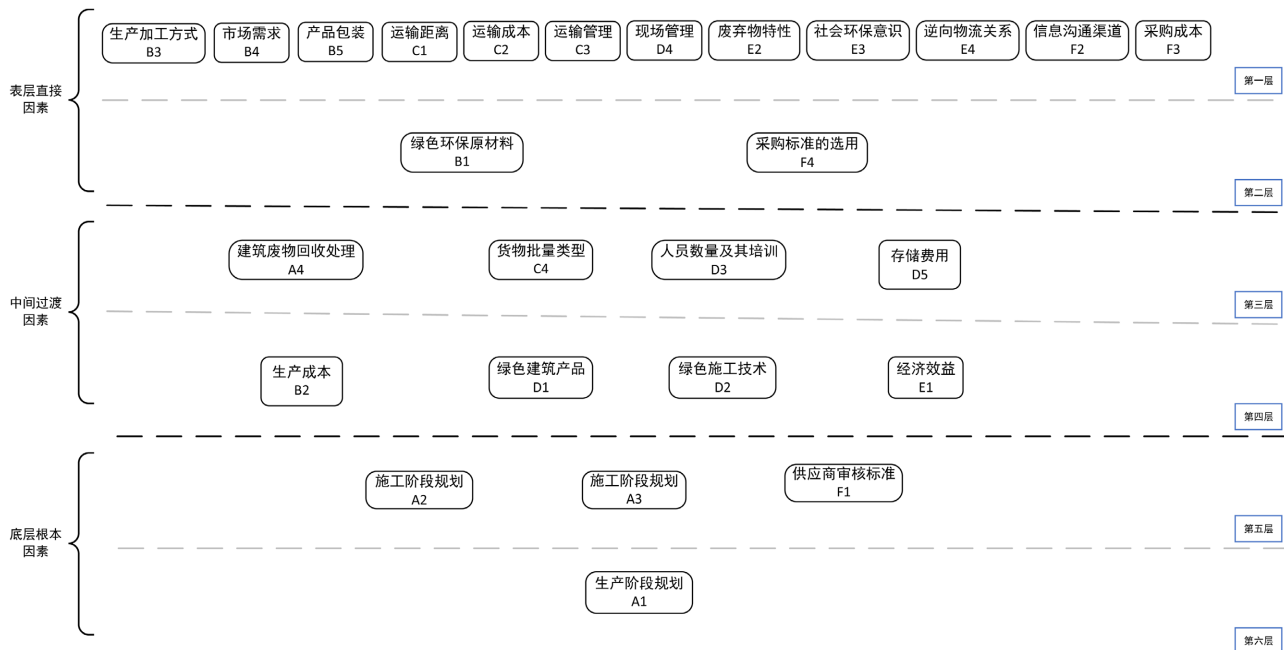


Figure 2. Multilevel interpretative structural modeling
图 2. 多层次 ISM 结构模型

4.2.3. 影响因素的层级结构分析

将结构模型图进一步划分，可以明确整个因素系统的底层根本因素、中间过渡因素、表层直接因素，根据影响因素的属性特征进行针对性把控，对建筑业绿色供应链管理效率的提高具有重要意义。位于一、二层的影响因素为表层直接因素，包括绿色生产、绿色运输、绿色采购等阶段的 14 个因素，表层因素是

影响建筑业绿色供应链管理的最直接因素，是促进建筑绿色物流供应链显著优化的入手点，下层因素对该层因素都有或深或浅的影响，要综合考虑下层因素的牵动效应；位于第三、四层的因素为中间过渡因素，包括绿色生产、绿色运输、绿色施工等阶段的 8 个因素，直接影响表层因素，同时受到深层次因素的影响，是影响建筑业绿色供应链管理的潜在因素；位于第五、六层的因素为底层根本因素，包括绿色设计和绿色采购阶段的 4 个因素，对其他层次的因素有长期持久的影响，是建筑业绿色供应链管理的核心要素，要加以重视。

4.2.4. 基于 MICMAC 方法的实证分析

根据上述的可达矩阵，计算矩阵的驱动力 Q 和依赖度 Y，其结果见表 3。

Table 3. Driving forces and dependency of influencing factors in green supply chain management in the construction industry
表 3. 建筑业绿色供应链管理影响因素的驱动力和依赖度

影响因素	Q	Y	影响因素	Q	Y
A1	11	4	D1	13	12
A2	5	2	D2	11	5
A3	7	1	D3	4	3
A4	4	4	D4	1	4
B1	9	16	D5	5	5
B2	11	10	E1	16	14
B3	6	11	E2	1	2
B4	1	1	E3	1	1
B5	1	1	E4	1	1
C1	1	1	F1	8	6
C2	1	1	F2	1	1
C3	1	2	F3	4	11
C4	5	2	F4	8	16

根据表 3 的数据的结果，以驱动力为横坐标，依赖度为纵坐标建立直角坐标系，如图 3 所示。分别以驱动力和依赖度数值范围的中点将第一象限划分为四个区域，顺时针分别为自治因素，依赖因素，关联因素，独立因素 4 个象限。其中，自治因素范围在第三区域，依赖度和驱动力都较弱；关联因素范围在第一区域，两种特征较强；依赖因素范围在第二区域，依赖度较强而驱动力较弱，独立因素集在第四区域，驱动力较强而依赖度较弱。

由图 3 可以看出，施工阶段规划 A2，使用阶段规划 A3 及建筑废物回收处理 A4，市场需求 B4，产品包装 B5，运输距离 C1，运输成本 C2，运输管理 C3，货物批量和类型 C4，人员数量及其培训 D3，现场管理与监督 D4，存储费用 D5，废弃物类型及其物质组成 E2，社会环保意识 E3，与供应商之间是否建立逆向物流关系 E4，供应商审核标准 F1，信息沟通渠道 F2，绿色产品采购标准的选用 F4，这 18 个因素位于第三区域，驱动力和依赖度都较低，与其他因素之间的影响关系较小，属于较为独立的部分，这些因素的改进可以不考虑因素之间的相互作用。

依赖度较高而驱动力较低的依赖因素为生产加工方式 B3、产品采购成本 F3，这两个因素较容易受其他因素影响，往往需要依赖其他因素的发展与提升而被解决。比如生产加工方式比较容易受绿色建筑产

品, 生产成本的影响, 并紧紧依赖人员数量及其培训的提升而优化, 产品采购成本会受经济效益和市场需求的影响, 并随着绿色产品采购标准的选用的改变而改变。

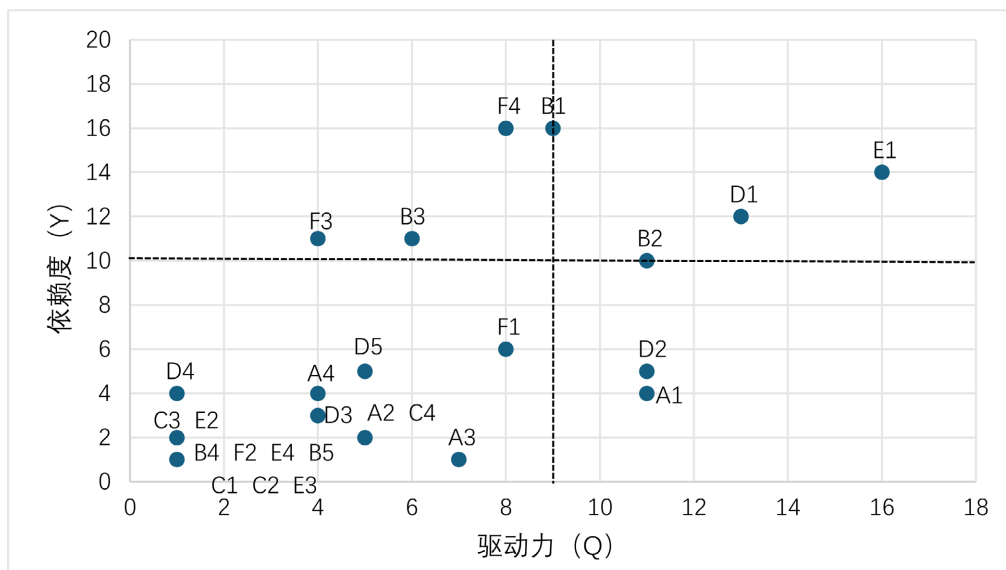


Figure 3. Driving force and dependency quadrant diagram of influencing factors

图 3. 影响因素的驱动力和依赖度象限图

驱动力较高但依赖度较低的独立因素包括生产阶段规划 A1、绿色施工技术 D2, 这两个因素受其他因素影响较小, 但对其他因素影响较大, 这就要求绿色建筑供应链必须在绿色设计阶段做好生产阶段规划, 在绿色施工阶段对绿色施工技术做严格的监督, 否则, 将对生产, 运输, 回收和采购环节造成一定的损失。

生产成本 B2, 绿色建筑产品 D1, 经济效益 E1 属于关联因素区域, 它们的驱动力和依赖度都较强, 在整个供应链的发展中有较重要的地位, 属于敏感因素, 容易受其他因素影响也容易影响其他因素, 因此, 要合理控制, 加强这三个方面的管理。

除此之外, 绿色或环保原材料 B1 介于关联因素与独立因素之间, 其依赖度较高, 驱动力位于平均水平, 能够在一定程度上影响下层因素。

5. 对策建议

基于上文对影响因素研究和模型分析结果, 分别从政府引导、企业发展、消费者需求三个角度并结合市场发展趋势对绿色建筑物流供应链提出相关的建议:

5.1. 政府引导发展绿色建筑产业, 建立相关法律体系

政府大力提倡绿色理念, 鼓励使用绿色材料, 绿色施工技术, 对相关企业给予政策支持, 加大优惠力度。建立相关的法律法规, 鼓励人才引进, 给相关科研人员经费支持, 加大对绿色建筑产业的宣传, 建立合适的材料采购标准。鼓励废物回收利用, 检查每次施工后废弃物类型及其物质组成, 针对不同的废弃物采取不同的回收方式, 多方面了解供应链下游返回供应链上游渠道, 促进绿色供应链的循环发展。

5.2. 企业加强对供应链的过程管理, 与绿色理念结合发展

企业组织引进专业人才, 使用新材料技术, 标准化技术, 安全检测技术, 建立专业的绿色建筑评估

体系,提高管理的质量与效率。提高员工专业素养和知识水平,注重员工培训,明确相关法律法规和标准,建立领导安全责任制,杜绝一切管理凭经验,有一定的专业知识与市场相结合。加强与供应商之间的合作关系,调动企业积极性,增强环保意识。

5.3. 鼓励消费者购买绿色建筑产品,保证物流供应链稳定运作

对市场进行调查,根据大多数消费者的喜好,满足消费者潜意识里的需求,增强顾客对产品的信任度,提升绿色建筑产品的竞争性。加大对绿色建筑产品的宣传,可以通过政府补贴,购买房产优惠等措施提高消费者绿色消费理念。

6. 结语

本文从建筑业绿色供应链管理的角度入手,通过文献识别法和专家打分法,得出了建筑业绿色供应链管理的影响因素,并通过 DEMATEL-ISM-MICMAC 模型对建筑业绿色供应链管理影响因素之间进行逻辑分析、层次划分和特性把控,识别关键驱动因素,提供不同优化措施方案,促进建筑业绿色供应链生产效率最大化。本文的研究仍存在进步和改善空间,专家访谈法具备一定的主观性。未来,建筑业绿色供应链管理的应用会更加广泛,因素的识别和分析会有更多的客观数据支撑,建筑业绿色供应链管理的研究也将更具科学性和实践性。

基金项目

贵州省哲学社会科学规划课题一般项目(21GZYB10);贵大 SRT 字(2023)160 号。

参考文献

- [1] 曹小琳,晏永刚.绿色供应链管理与建筑业可持续发展[J].经济管理,2006(17):81-83.
- [2] 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院.中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J].建筑,2023(2):57-69.
- [3] Xiao, J., Wang, C., Ding, T. and Akbarnezhad, A. (2018) A Recycled Aggregate Concrete High-Rise Building: Structural Performance and Embodied Carbon Footprint. *Journal of Cleaner Production*, **199**, 868-881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.210>
- [4] Esa, M.R., Halog, A. and Rigamonti, L. (2016) Developing Strategies for Managing Construction and Demolition Wastes in Malaysia Based on the Concept of Circular Economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **19**, 1144-1154. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0516-x>
- [5] Kim, M., Woo, C., Rho, J. and Chung, Y. (2016) Environmental Capabilities of Suppliers for Green Supply Chain Management in Construction Projects: A Case Study in Korea. *Sustainability*, **8**, Article 82. <https://doi.org/10.3390/su8010082>
- [6] 占松林,韩青苗,刘长滨.基于行为选择理论的建筑节能市场需求影响因素分析[J].北京交通大学学报(社会科学版),2009,8(1):65-69.
- [7] 宋卓洋,刘玘玘.建筑施工企业绿色供应链成本的管理和优化[J].企业科技与发展,2022(1):193-195.
- [8] 凤亚红,王社良.建筑业绿色供应链构建中的博弈分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2010,42(5):674-678.
- [9] 李慧,许浩雷,张金帅,彭夏清,张静晓.基于网络 DEA 模型的我国建筑业绿色全要素生产率评价研究[J].建筑经济,2021,42(8):86-91.
- [10] Wibowo, M.A., Handayani, N.U., Farida, N. and Nurdiana, A. (2019) Developing Indicators of Green Initiation and Green Design of Green Supply Chain Management in Construction Industry. *E3S Web of Conferences*, **115**, Article ID: 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911502006>
- [11] Pankaj, S. and Kumar, M.G. (2016) Scope of Green Supply Chain Management in North Indian Construction Industries. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences*, **4**, 53-73.
- [12] 黄桂林,张闯.基于 SNA 的装配式建筑绿色供应链风险[J].土木工程与管理学报,2020,37(2):41-49.

-
- [13] 周鹏飞, 陈栋, 王秋良. 建筑绿色供应链实施的仿真分析: 以大连为例[J]. 系统仿真学报, 2014(1): 173-180.
- [14] 仇国芳, 张海洋, 曹婷. 基于绿色理念的建筑业供应商选择方法研究[J]. 物流技术, 2014(9): 146-148, 285.
- [15] 雷颖, 肖建庄, 王春晖. 太原市再生混凝土建筑结构碳排放研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 97-105.
- [16] 蒋业浩, 姜艳艳, 吴书安, 沙瑞媛, 杜彬. 建筑垃圾再生骨料清洁生产及工程应用研究[J]. 施工技术, 2014, 43(24): 37-39, 100.
- [17] 杨晓晗, 韩纪琴. 国内绿色供应链管理研究述评与展望[J]. 天津农业科学, 2014, 20(9): 38-42.
- [18] 梅强, 仝红, 刘素霞, 张菁菁. 面向中小制造企业的绿色供应链协同创新模式多案例研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2023, 44(5): 50-61.
- [19] 张宇嘉, 瞿富强, 陈初一. 基于 PCSCOR-FANP 的装配式建筑供应链绩效评价研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(S1): 172-176.
- [20] 李星苇, 韩雅婷, 丁佐意. 回收商互惠偏好下建筑废弃物资源利用供应链决策[J]. 工程管理学报, 2024, 38(1): 36-41.
- [21] 钮立新. 关于企业实施逆向物流的对策建议[J]. 中国商贸, 2010(25): 154-155.