

基于模糊 DEMATEL-ISM 的前置仓模式下 生鲜农产品供应链风险影响因素研究

林颖, 房曰荣

(福建船政交通职业学院 经济与管理学院, 福州 350007)

摘要: 为系统分析前置仓模式下生鲜农产品供应链风险, 明确风险因素相互之间的逻辑关联和作用关系, 运用文献研究、现场调研及专家访谈等方式, 从五个维度识别并提取前置仓模式下生鲜农产品供应链风险的 16 个影响因素, 构建模糊决策实验室分析-解释结构模型 (DEMATEL-ISM), 研究确定各影响因素的因果属性和重要程度, 对关键因素进行梳理, 建立递阶层级结构模型, 并采用复杂网络分析法对模型的可行性进行验证, 基于研究结果提出对策建议, 为生鲜电商企业优化供应链管理、提高运营效率以及降低供应链风险提供参考。

关键词: 生鲜农产品; 供应链风险; 影响因素; 前置仓; 模糊决策实验室分析-解释结构模型
中图分类号: F252.5 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.06.012

Research on Influencing Factors of Risks in the Fresh Agricultural Product Supply Chain under the Front Warehouse Model Based on Fuzzy DEMATEL-ISM

LIN Ying, FANG Yuerong

(Fujian Chuanzheng Communication College, Fuzhou 350007)

Abstract: To systematically analyze the risks in the fresh agricultural product supply chain under the front-warehouse model and clarify the logical connections and interaction relationships among risk factors, this study identifies and extracts 16 influencing factors of risks in the fresh agricultural product supply chain under the front-warehouse model from five dimensions through literature research, field investigation, and expert interviews. A fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory-interpretative structural modelling (DEMATEL-ISM) is constructed to study and determine the causal attributes and importance of each influencing factor. Key factors are sorted out, and a hierarchical structure model is established. The feasibility of the model is verified through complex network analysis. Based on the research results, countermeasures and suggestions are proposed to provide references for fresh food e-commerce enterprises to optimize supply chain management, improve operational efficiency, and reduce risks in supply chain.

Key words: fresh agricultural products; risks in supply chain; influencing factors; front-warehouse; fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory-interpretative structural modelling

随着电商行业的快速发展, 生鲜农产品的线上销售已成为市场的重要组成部分。近几年由于

大数据技术的应用, 前置仓模式作为一种创新的生鲜电商运作模式应运而生, 该模式通过数据分

析和供应链资源的优化配置,精准预测客户需求,并将商品前置到城市内的小型仓库(即前置仓)进行囤货,当消费者下单后,由就近的前置仓配送人员迅速响应,完成订单的精选拣选、包装,并在规定时间内将生鲜产品高效、准确地送达消费者手中,从而实现生鲜农产品快速、高效配送,显著提升消费者的购物体验。

生鲜农产品供应链受产品质量、冷链物流基础网络与设施等诸多风险因素的影响,开展风险分析和研究对提高生鲜电商企业的运营效率和盈利能力有重要影响,许多学者针对生鲜农产品供应链风险进行了研究。刘明菲等^[1]采用集成决策实验室分析技术与解释性结构建模方法,构建了生鲜物流服务质量风险的多层次递阶模型。付焯^[2]运用供应链风险管控理论,对生鲜农产品的供应链风险传导的机理进行了深入研究,并分析了控制风险的策略。张旭^[3]运用物元可拓理论与 Stackelberg 博弈理论对社区线上到线下(O2O)模式下电商生鲜农产品供应链风险开展了评价与控制研究。孙海雯等^[4]运用解释结构模型(ISM)对生鲜农产品供应链风险影响因素进行了识别与评估。吴洋晖等^[5]基于层次分析法(AHP),定性与定量分析了影响生鲜农产品供应链质量的因素。吴迪等^[6]运用决策实验室分析-解释结构模型(DEMATEL-ISM)建立冷链物流发展影响因素的多层递阶模型。庞燕等^[7]采用 DEMATEL 结合 ISM,以识别影响林果冷链物流脆弱性的关键因素,并绘制了多层递阶结构模型图。阎涛等^[8]采用熵权法确定因素权重,运用交叉影响矩阵相乘法(DEMATEL-ISM-MICMAC)分析农产品供应链脆弱因素的层次及相互作用,以辅助系统分析与决策。Lonsdale 等^[9]对生鲜农产品供应链的供需风险进行了剖析,并识别出技术设备领域存在的风险点,进一步构建了供应链风险等级的框架体系。Trkman 等^[10]依托模型对生鲜电商供应链中的风险进行了辨识,进而对关键风险因素进行了重要性排序,基于排序结果,实施了风险控制策略,以增强相应的应对措施。Guo 等^[11]采用模糊 AHP、模糊 DAMETAL 与模糊多准则妥协解排序(VIKOR)相结合的集成方法,对实证数据进行处理,以评估风险的重要性水平。Hong 等^[12]基于 ISM 和模糊 MICMAC 的方法,构建了进口生鲜食品供应链风险分析的混合模型。Medvediev 等^[13]利用 Matlab 模糊逻辑工具箱开发了农业企业供应链风险管理的模糊逻辑模型。Zhang 等^[14]采用

风险评价法(VIKOR)对生鲜供应链风险进行评估,通过灵敏度分析验证了模型的有效性和适用性,构建了一个动态的生鲜供应链风险评估模型。Kumar 等^[15]用模糊决策试验和评估实验室方法分析了农产品冷链物流关键绩效指标之间的相互依赖特征和因果关系。此外,众多学者运用多种方法对生鲜农产品供应链的风险进行了深入探究,如 AHP 法、最佳最劣-客观权重赋权法(BWM-CRITIC)、网络分析法(ANP)、ISM 模型及供应链运作参考模型(SCOR)等。

目前国内外对于生鲜农产品供应链风险影响因素的研究大多基于传统的物流配送模式,而前置仓物流配送模式的相关研究较少。前置仓模式的生鲜农产品供应链(以下简称“前置仓供应链”)与传统供应链相比,更强调快速响应、数据驱动和精准库存控制,对满足消费者即时需求,提升服务品质等方面提出更高要求。但其发展受到产品自身特性、供应链系统与设备、人力资源、管理制度、环境风险等诸多因素影响。

在前置仓供应链模式发展越来越普及的背景下,对其风险影响因素进行深入研究显得尤为重要。综上,本文以前置仓供应链风险为研究对象,运用 DEMATEL、ISM 和复杂网络分析法,分析前置仓供应链风险各影响因素的重要性,建立递阶层级结构模型,识别出关键影响因素,为生鲜电商企业的前置仓供应链风险管理提供参考和借鉴。

1 影响因素识别与指标体系建立

为确定前置仓模式下生鲜农产品供应链风险的影响因素指标体系,通过文献分析法,以“前置仓”“生鲜农产品”“供应链风险”“DEMATEL”“ISM”“supply chain risk”等为关键词,在中国知网和 Web of Science 等国际知名数据库中进行检索,筛选出近几年发表的与本研究相关的文献 72 篇;同时参考《食品冷链物流交接规范》(GB/T 40956—2021)、《冷链物流分类与基本要求》(GB/T 28577—2021)、《鲜食果蔬城市配送中心服务规范》(GB/T 35105—2017)、《仓储服务质量要求》(GB/T 21071—2021)等国家标准,梳理出 20 个影响因素;通过实地走访生鲜电商企业、科研院所、专家访谈等,进一步对影响因素进行补充和提炼,并根据影响因素的性质将其分类,建立包含 5 个一级因素和 16 个二级因素的指标体系,影响因素指标体系如表 1 所示。

表1 影响因素指标体系

Table 1 Indicator system of influencing factors

| 一级因素 | 二级因素 | 释义 |
|-----------------|-----------------------------|--|
| 产品自身特性风险 | 生鲜农产品品质 S_1 | 生鲜农产品保持其原有新鲜度、口感、营养价值等品质特性的能力。 |
| | 生鲜农产品货损成本 S_2 | 在物流环节中,因产品损坏、腐烂等原因导致的经济损失。 |
| | 生鲜农产品温度要求差异性 S_3 | 不同种类的生鲜农产品在储存和运输过程中对温度条件的需求各异,应根据产品特性进行精准温控管理。 |
| 生鲜农产品供应链系统与设备风险 | 生鲜农产品溯源系统 S_4 | 通过信息技术手段,实现对生鲜农产品从生产源头到最终消费的全链条信息追溯,确保产品安全与质量可控。 |
| | 温控与保障系统 S_5 | 物流环节中用于维持产品所需温度环境的系统,包括冷链设备、温度监控及应急保障措施等。 |
| 人力资源风险 | 前置仓支撑下的冷链物流基础网络与设施 S_6 | 在前置仓结构下,支撑冷链物流运作的基础设施体系,包括冷库、冷藏车、配送中心等,是保障前置仓模式下冷链物流顺畅运行的基础。 |
| | 管理层质量意识 S_7 | 企业管理层对冷链物流质量管理的重视程度,直接影响企业质量政策的制定与执行效果。 |
| | 员工工作协同度 S_8 | 供应链各环节员工之间的协作配合程度,高效的协同作业能显著提升物流效率和服务质量。 |
| 管理制度与操作规范风险 | 员工知识技能水平 S_9 | 从业人员在专业知识、操作技能及应急处理等方面的能力,是保障生鲜农产品供应链安全与质量的关键。 |
| | 前置仓布局下生鲜农产品供应链运作成本 S_{10} | 生鲜农产品在前置仓布局下,从生产到消费整个供应链过程中产生的各项费用,包括运输、仓储、包装等成本。 |
| | 前置仓模式下的冷链配送及时性 S_{11} | 前置仓模式下的冷链物流服务的响应速度和配送效率,确保产品在最短时间内送达客户手中,保持最佳品质。 |
| 环境风险 | 前置仓设计及配送路径规划 S_{12} | 通过科学规划前置仓库布局和配送路线,优化资源配置,提高配送效率、降低物流成本。 |
| | 前置仓发展背景下的冷链物流政策与监管 S_{13} | 政府及相关机构在前置仓发展背景下制定的冷链物流行业规范、标准及监管措施,旨在促进行业健康发展,保障消费者权益,支持前置仓模式的合规运营。 |
| | 生鲜农产品价格波动 S_{14} | 受市场供需关系、季节性变化、品质差异等因素影响,生鲜农产品市场价格呈现出的波动现象。 |
| | 行业竞争压力 S_{15} | 冷链物流行业内企业之间的竞争态势,包括市场份额争夺、服务质量提升、价格策略调整等方面。 |
| | 消费者质量安全意识 S_{16} | 消费者对生鲜农产品质量和安全性的关注程度,直接影响其购买决策和市场需求变化。 |

2 模糊 DEMATEL-ISM 的构建

2.1 模糊 DEMATEL-ISM

DEMATEL 方法是一种用于研究复杂系统影响程度的方法,通过矩阵将因素间的相互联系转换为因果关系,并计算出各要素的影响度、被影响度及原因度与中心度。为弥补 DAMATEL 方法主观性偏高的不足,本文引入三角模糊数理论,对专家给出的打分结果进行模糊化处理,再依据重心法将三角模糊数清晰化,以提高分析的客观性和准确性。

ISM 通过构建可达矩阵实现系统要素分层,直观展示各因素的层级关系。ISM 单独使用时只能反映出因素之间是否存在影响关系,缺乏对影响程度的量化。

本文集成 DEMATEL、ISM 两种方法的优

势,构建模糊 DEMATEL-ISM,利用 DEMATEL 的综合影响矩阵构建 ISM 的可达矩阵,将变量繁多且关系复杂的影响因素系统转换为直观明了的多层次递阶结构模型。模糊 DEMATEL-ISM 方法能够克服传统 DEMATEL-ISM 方法主观性较强的缺陷,能够更加科学、合理地理清各影响因素之间的相互影响关系,并确定关键影响因素及其类型。

2.2 复杂网络分析

复杂系统分析是探究系统中各组成要素(节点)的重要性及其相互关联的一种手段。经由对节点连接度与空间分布位置的考察,可识别出复杂系统中的关键节点与主要影响因素。其优势在于能够深入剖析系统结构,精准定位关键节点,进而为预测和控制复杂系统行为提供有力支持。在模糊 DEMATEL-ISM 模型的基础上,结合复杂网络分析,验证该模型的适用性和合理性,通过可视

化处理,使分析结果更加直观明了。

2.3 模型构建步骤

2.3.1 模糊 DEMATEL 模型构建

1) 直接影响矩阵构建

邀请专家在互不干扰的情况下,对前置仓模式下生鲜农产品供应链风险体系内各影响因素的互相影响程度进行打分,用 0~4 分值来表示因素之间的关系强弱,形成 $n \times n$ (n 取值为 16) 的直接影响矩阵 S ,其中 S_{ij} 表示第 i 个影响因素对第 j 个影响因素的影响值大小,当 $i=j$ 时, $S_{ij}=0$,即不考虑因素对自身的影响。

2) 三角模糊与清晰直接影响矩阵构建

采用三角模糊数对专家的打分进行模糊化处理,尽可能降低专家打分的主观性影响。三角模糊数可记为 $X=(l,m,r)$,其中 l 为左侧保守值, m 为中间值, r 为右侧乐观值^[16]。 $X_{ij}^k=(l_{ij}^k,m_{ij}^k,r_{ij}^k)$ 代表第 k 个专家评估出的第 i 个因素对第 j 个因素影响强弱的三角模糊数值。

利用重心法对三角模糊直接影响矩阵进行清晰化处理,得到对应的清晰值,进而得到清晰直接影响矩阵,计算表达式为

$$q_{ij}^k = \frac{(r_{ij}^k - l_{ij}^k) + (m_{ij}^k - l_{ij}^k)}{3} + l_{ij}^k \quad (1)$$

$$q_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m q_{ij}^k}{m} \quad (2)$$

$$Q = (q_{ij})_{n \times n} \quad (3)$$

式中: q_{ij}^k 、 q_{ij} 分别代表专家 k 评估出的第 i 个因素对第 j 个因素影响强弱的清晰值,以及专家评估的平均清晰值; Q 代表清晰化处理后的直接影响矩阵。

三角模糊数语义转换规则及清晰值的计算结果如表 2 所示。

表 2 三角模糊数语义转换规则及清晰值计算结果

Table 2 Triangular fuzzy number semantic conversion rules and crisp value calculation

| 语义变量 | 专家打分值 | 三角模糊数 | 清晰值 |
|------|-------|-----------------|---------|
| 没有影响 | 0 | (0,0,0.25) | 0.083 3 |
| 影响很低 | 1 | (0,0.25,0.5) | 0.250 0 |
| 影响中等 | 2 | (0.25,0.5,0.75) | 0.500 0 |
| 影响较高 | 3 | (0.5,0.75,1) | 0.750 0 |
| 影响很高 | 4 | (0.75,1,1) | 0.916 6 |

3) DEMATEL 综合影响矩阵构建

将上述求得的清晰直接影响矩阵 Q 通过行和最大值法归一化得到规范化影响矩阵^[17] N ,其计

算式为

$$N = \left[\frac{Q}{\max_{1 \leq i \leq n} \left(\sum_{j=1}^n q_{ij} \right)} \right]_{n \times n} \quad (4)$$

由规范化影响矩阵 N 求得综合影响矩阵^[17] T ,即

$$T = N(I - N)^{-1} \quad (5)$$

式中 I 为单位矩阵。

4) 相关分析指标计算

影响度 (E) 是综合影响矩阵 T 中每行元素的和,表示第 i 个因素对系统内其他因素作用的强度,其表达式为

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

被影响度 (F) 是综合影响矩阵 T 中每列元素的和,表示第 i 个因素受到系统内其他因素作用的强度,其表达式为

$$F_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

中心度 (M) 是影响度和被影响度之和,体现该因素在系统中的重要程度,其表达式为

$$M_i = E_i^T + F_i^T \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

原因度 (R) 是影响度和被影响度之差,当原因度数值为正,则标记为原因因素,表示该因素对系统内其他因素具有较大影响力;当原因度数值为负,则标记为结果因素,表示该因素受系统内其他因素所影响,其表达式为

$$R_i = E_i^T - F_i^T \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

2.3.2 ISM 模型构建

基于模糊 DEMATEL 模型,进一步构建 ISM 模型,对各影响因素的层级结构进行划分,分析各影响因素间的相互作用关系。

1) 建立邻接矩阵

设置截距 λ , λ 由综合影响矩阵 T 进行统计得到,即 $\lambda = \alpha + \beta$, α 为矩阵 T 中所有元素的均值, β 为矩阵 T 的总体标准差。计算综合影响矩阵 T 的邻接矩阵 $A = \{a_{ij}\}_{n \times n} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 为^[18]

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & t_{ij} \geq \lambda \\ 0, & t_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

2) 建立可达矩阵

将邻接矩阵 A 加上单位矩阵 I ,得到初始可达矩阵 D_0 ,即

$$D_0 = A + I \quad (11)$$

通过幂运算捕捉所有间接路径,直到矩阵不再变化,迭代计算公式为

$$D_0^{k+1} = D_0^k \otimes D_0 \quad (12)$$

式中 \otimes 为布尔乘,即乘法后非零元素置1。

直到 D_0^{k+1} 与 D_0^k 相同时停止,得到可达矩阵

$D = D_0^k$,记为

$$D = \{d_{ij}\}_{n \times n} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

3)可达集、先行集和交集的计算

可达集 U 与先行集 V 分别对应于可达矩阵 D 中某一特定因素所在行内值为1的元素集合,以及该因素所在列中值为1的元素集合;定义 W 为可达集 U 与先行集 V 形成的交集,即

$$U(S_i) = \{S_j \mid S_j \in S, r_{ij} = 1\} \quad (14)$$

$$V(S_i) = \{S_i \mid S_i \in S, r_{ij} = 1\} \quad (15)$$

$$W(S_i) = U(S_i) \cap V(S_i) \quad (16)$$

4)划分层级结构、绘制递阶层级结构图

找出满足 $U(S_i) = W(S_i)$ 的因素,构成层级L1,接着在可达矩阵 D 中剔除层级L1中的因素所对应的行和列,得到缩减后的矩阵 D' ,重复计算式(14)~(16)步骤,依次确定层级L2, L3, ..., 直到所有影响因素被成功划分,并依据各因素被划分的次序,构建递阶层级结构图。

2.3.3 复杂网络分析

利用可达矩阵 D 绘制出复杂网络图,各影响因素被视作网络节点,因素之间的相互作用构成连接边。可达矩阵 D 中值为1的元素所指向的因素,在网络图中作为入边的起始点。最后计算并分析该复杂网络图的相关参数^[19]。

3 实证研究与结果分析

3.1 实证研究

3.1.1 基于三角模糊 DEMATEL 模型的计算

邀请12位物流与供应链行业的专家,涵盖高校教师、科研院所学者、企业专业人士及行业协会专家等不同背景的人员。专家依据调查问卷,对各因素间关联性的强弱程度进行打分,收集并系统整理所有专家评分的数据,引入三角模糊数对专家的评分结果进行模糊化处理,得到三角模糊直接影响矩阵。为了验证专家样本的合理性,利用SPSS软件对样本数据进行可靠性分析,采用的“同类相关系数”(ICC),选择“双向随机”模型进行计算得出单个测量ICC值为0.879,平均测量ICC值为0.989。ICC值大于0.75,表示一致性优秀;ICC值为0.5~0.75表示中等;ICC值小于0.5表示较差。本文专家样本的ICC值远高于0.75,表明可靠性高,统计结果具备合理性,符合进一步研究分析的要求。

利用Matlab2023a对数据进行处理,根据式(1)~(3),利用重心法对三角模糊直接影响矩阵进行去模糊化处理,得到清晰直接影响矩阵 Q 。进而根据式(4)~(5)得出综合影响矩阵 T ,结果如表3所示。

表3 综合影响矩阵 T

Table 3 Comprehensive influence matrix T

| 因素 | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 | S_9 | S_{10} | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{14} | S_{15} | S_{16} |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| S_1 | 0.078 9 | 0.314 1 | 0.054 1 | 0.071 0 | 0.071 4 | 0.077 4 | 0.071 0 | 0.057 0 | 0.054 1 | 0.265 3 | 0.111 1 | 0.077 3 | 0.054 1 | 0.054 1 | 0.063 7 | 0.054 1 |
| S_2 | 0.059 3 | 0.083 3 | 0.040 6 | 0.053 3 | 0.053 6 | 0.058 1 | 0.053 4 | 0.042 8 | 0.040 6 | 0.102 9 | 0.083 4 | 0.058 0 | 0.040 6 | 0.040 6 | 0.047 8 | 0.040 6 |
| S_3 | 0.082 9 | 0.316 2 | 0.056 8 | 0.074 6 | 0.075 0 | 0.081 4 | 0.074 7 | 0.059 9 | 0.056 8 | 0.343 6 | 0.116 8 | 0.081 2 | 0.056 8 | 0.056 8 | 0.067 0 | 0.056 8 |
| S_4 | 0.278 5 | 0.147 1 | 0.051 6 | 0.067 8 | 0.068 1 | 0.073 9 | 0.067 8 | 0.054 4 | 0.051 6 | 0.156 8 | 0.106 0 | 0.073 8 | 0.051 6 | 0.051 6 | 0.060 8 | 0.051 6 |
| S_5 | 0.077 4 | 0.308 5 | 0.053 1 | 0.069 7 | 0.070 1 | 0.076 0 | 0.069 7 | 0.055 9 | 0.053 1 | 0.241 4 | 0.109 0 | 0.075 8 | 0.053 1 | 0.053 1 | 0.062 5 | 0.053 1 |
| S_6 | 0.093 6 | 0.334 8 | 0.064 2 | 0.084 3 | 0.084 7 | 0.091 9 | 0.084 3 | 0.067 6 | 0.064 2 | 0.286 8 | 0.277 4 | 0.198 7 | 0.064 2 | 0.064 2 | 0.075 6 | 0.064 2 |
| S_7 | 0.224 9 | 0.223 7 | 0.068 8 | 0.202 7 | 0.203 2 | 0.269 7 | 0.090 4 | 0.072 5 | 0.068 8 | 0.223 6 | 0.166 4 | 0.116 7 | 0.068 8 | 0.068 8 | 0.081 1 | 0.068 8 |
| S_8 | 0.079 1 | 0.111 2 | 0.054 2 | 0.071 2 | 0.071 6 | 0.077 6 | 0.071 2 | 0.057 1 | 0.054 2 | 0.312 0 | 0.271 9 | 0.077 5 | 0.054 2 | 0.054 2 | 0.063 9 | 0.054 2 |
| S_9 | 0.106 4 | 0.143 6 | 0.067 4 | 0.095 8 | 0.096 3 | 0.107 5 | 0.152 8 | 0.124 5 | 0.067 4 | 0.255 9 | 0.387 6 | 0.267 0 | 0.067 4 | 0.067 4 | 0.079 5 | 0.067 4 |
| S_{10} | 0.059 3 | 0.083 3 | 0.040 6 | 0.053 3 | 0.053 6 | 0.058 1 | 0.053 4 | 0.042 8 | 0.040 6 | 0.102 9 | 0.083 4 | 0.058 0 | 0.040 6 | 0.040 6 | 0.047 8 | 0.040 6 |
| S_{11} | 0.059 3 | 0.083 3 | 0.040 6 | 0.053 3 | 0.053 6 | 0.058 1 | 0.053 4 | 0.042 8 | 0.040 6 | 0.102 9 | 0.083 4 | 0.058 0 | 0.040 6 | 0.040 6 | 0.047 8 | 0.040 6 |
| S_{12} | 0.078 4 | 0.110 2 | 0.053 7 | 0.070 5 | 0.070 9 | 0.076 9 | 0.070 6 | 0.056 6 | 0.053 7 | 0.248 4 | 0.320 7 | 0.076 8 | 0.053 7 | 0.053 7 | 0.063 3 | 0.053 7 |
| S_{13} | 0.213 7 | 0.260 7 | 0.078 5 | 0.274 9 | 0.282 6 | 0.328 3 | 0.156 6 | 0.082 7 | 0.078 5 | 0.257 5 | 0.192 7 | 0.135 3 | 0.078 5 | 0.078 5 | 0.092 5 | 0.078 5 |
| S_{14} | 0.071 7 | 0.100 8 | 0.049 2 | 0.064 6 | 0.064 9 | 0.070 4 | 0.064 6 | 0.051 8 | 0.049 2 | 0.334 8 | 0.101 0 | 0.070 3 | 0.049 2 | 0.049 2 | 0.057 9 | 0.049 2 |
| S_{15} | 0.081 4 | 0.114 5 | 0.055 8 | 0.073 3 | 0.073 7 | 0.079 9 | 0.073 3 | 0.058 8 | 0.055 8 | 0.341 0 | 0.289 4 | 0.079 8 | 0.055 8 | 0.055 8 | 0.065 8 | 0.055 8 |
| S_{16} | 0.126 3 | 0.159 3 | 0.069 8 | 0.113 7 | 0.114 2 | 0.133 5 | 0.287 8 | 0.073 5 | 0.069 8 | 0.234 1 | 0.202 0 | 0.210 3 | 0.069 8 | 0.069 8 | 0.260 5 | 0.069 8 |

根据综合影响矩阵 T ,由式(6)~(9),计算影响度 E 、被影响度 F 、中心度 M 、原因度 R 、中心度排名、原因度排名及因素属性^[2],结果如表 4 所示。基于表 4 的数据,计算出中心度的平均值为 3.26,分别以中心度值和原因度值为横、纵坐标,其交点为(3.26,0),绘制影响因素属性结构图,如图 1 所示。

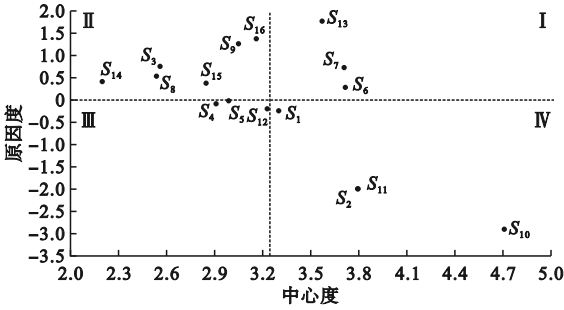


图 1 影响因素属性结构图

Fig. 1 Attribute structure diagram of influencing factors

3.1.2 基于 ISM 模型的计算

基于综合影响矩阵 T ,利用 Matlab2023a 计算 T 中所有元素的均值 α 和总体标准差 β ,得到 $\alpha = 0.1017$ 和 $\beta = 0.0774$,截距 $\lambda = 0.1791$ 。根据式

(10) 确定邻接矩阵,进而由式(11)~(13)得到可达矩阵 D ,结果如表 5 所示。

表 4 DEMATEL 相关分析指标

Table 4 DEMATEL-related analysis indicators

| 影响因素 | 影响度 E | 被影响度 F | 中心度 M | 原因度 R | 因素属性 | 原因度排名 | 中心度排名 |
|----------|---------|----------|---------|---------|------|-------|-------|
| S_1 | 1.53 | 1.77 | 3.30 | -0.24 | 结果 | 9 | 7 |
| S_2 | 0.90 | 2.89 | 3.79 | -2.00 | 结果 | 14 | 3 |
| S_3 | 1.66 | 0.90 | 2.56 | 0.76 | 原因 | 6 | 14 |
| S_4 | 1.41 | 1.49 | 2.91 | -0.08 | 结果 | 12 | 12 |
| S_5 | 1.48 | 1.51 | 2.99 | -0.03 | 结果 | 11 | 11 |
| S_6 | 2.00 | 1.72 | 3.72 | 0.28 | 原因 | 5 | 4 |
| S_7 | 2.22 | 1.49 | 3.71 | 0.72 | 原因 | 3 | 5 |
| S_8 | 1.54 | 1.00 | 2.54 | 0.53 | 原因 | 8 | 15 |
| S_9 | 2.15 | 0.90 | 3.05 | 1.26 | 原因 | 4 | 10 |
| S_{10} | 0.90 | 3.81 | 4.71 | -2.91 | 结果 | 16 | 1 |
| S_{11} | 0.90 | 2.90 | 3.80 | -2.00 | 结果 | 15 | 2 |
| S_{12} | 1.51 | 1.71 | 3.23 | -0.20 | 结果 | 10 | 8 |
| S_{13} | 2.67 | 0.90 | 3.57 | 1.77 | 原因 | 1 | 6 |
| S_{14} | 1.30 | 0.90 | 2.20 | 0.40 | 原因 | 13 | 16 |
| S_{15} | 1.61 | 1.24 | 2.85 | 0.37 | 原因 | 7 | 13 |
| S_{16} | 2.26 | 0.90 | 3.16 | 1.37 | 原因 | 2 | 9 |

表 5 可达矩阵 D

Table 5 Reachability matrix D

| 因素 | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 | S_9 | S_{10} | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{14} | S_{15} | S_{16} |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| S_1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_7 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_{10} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_{11} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_{12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S_{13} | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| S_{14} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| S_{15} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| S_{16} | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

基于可达矩阵 D ,由式(14)~(16)求出可达集 U 、先行集 V 和交集 W ,进一步对影响因素进行层级结构划分,形成影响因素层级梳理表和影响

因素层级结构表,分别如表 6 和表 7 所示。构建前置仓模式下的生鲜农产品供应链风险体系内各影响因素的递阶层级结构图,如图 2 所示。

表6 影响因素层级梳理表

Table 6 Hierarchy sorting table of influencing factors

| 因素 | 可达集 U | 先行集 V | 交集 W | 层级 |
|----------|--|--|----------|----|
| S_1 | S_1, S_2, S_{10} | $S_1, S_4, S_7, S_{13}, S_{16}$ | S_1 | L2 |
| S_2 | S_2 | $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_{13}, S_{16}$ | S_2 | L1 |
| S_3 | S_2, S_3, S_{10} | S_3 | S_3 | L2 |
| S_4 | S_1, S_2, S_4, S_{10} | S_4, S_7, S_{13}, S_{16} | S_4 | L3 |
| S_5 | S_2, S_5, S_{10} | S_5, S_7, S_{13}, S_{16} | S_5 | L2 |
| S_6 | $S_2, S_6, S_{10}, S_{11}, S_{12}$ | S_6, S_7, S_{13}, S_{16} | S_6 | L3 |
| S_7 | $S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_{10}, S_{11}, S_{12}$ | S_7, S_{16} | S_7 | L4 |
| S_8 | S_8, S_{10}, S_{11} | S_8 | S_8 | L2 |
| S_9 | $S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}$ | S_9 | S_9 | L3 |
| S_{10} | S_{10} | $S_1, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{15}, S_{16}$ | S_{10} | L1 |
| S_{11} | S_{11} | $S_6, S_7, S_8, S_9, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{15}, S_{16}$ | S_{11} | L1 |
| S_{12} | S_{10}, S_{11}, S_{12} | $S_6, S_7, S_9, S_{12}, S_{13}, S_{16}$ | S_{12} | L2 |
| S_{13} | $S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}$ | S_{13} | S_{13} | L4 |
| S_{14} | S_{10}, S_{14} | S_{14} | S_{14} | L2 |
| S_{15} | S_{10}, S_{11}, S_{15} | S_{15}, S_{16} | S_{15} | L2 |
| S_{16} | $S_1, S_2, S_4, S_5, S_6, S_7, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{15}, S_{16}$ | S_{16} | S_{16} | L5 |

表7 影响因素层级结构表

Table 7 Hierarchy structure table of influencing factors

| 层级 | 因素集 | 影响程度 |
|----|--|------|
| L1 | S_2, S_{10}, S_{11} | 表层因素 |
| L2 | $S_1, S_3, S_5, S_8, S_{12}, S_{14}, S_{15}$ | 浅层因素 |
| L3 | S_4, S_6, S_9 | 中层因素 |
| L4 | S_7, S_{13} | 深层因素 |
| L5 | S_{16} | 根源因素 |

3.1.3 节点度与复杂网络图构建

通过 Matlab2023a 进行测算,并绘制复杂网络结构图,如图3所示。图中各节点括号中的数代

表该节点的度。

由图3可知,系统的平均路径为0.766,表明网络中任意两个节点之间的平均距离较短,说明网络具有很好的连通性;最大直径为1.5,这是网络中任意两个节点之间的最大距离,同样表明网络非常紧密;最大度为15,属于节点10,意味网络中有一个节点与其他几乎所有节点都相连,表明网络的高度连通性和可能存在的中心化结构;网络密度为0.542,表明网络呈现出典型的密集连接特征,属于复杂网络中的中小型结构。

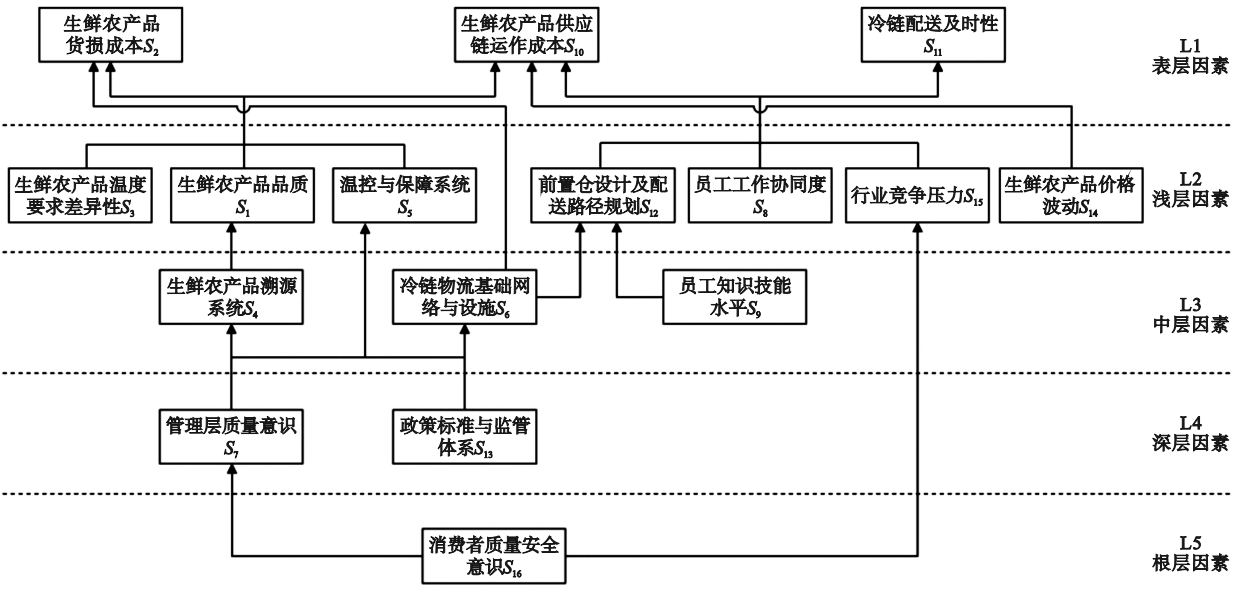


图2 影响因素递阶层级结构图

Fig. 2 Hierarchical structure diagram of influencing factors

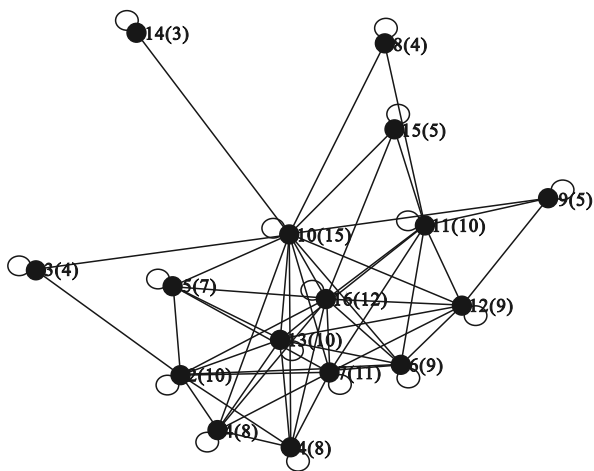


图 3 影响因素复杂网络图

Fig.3 Complex network diagram of influencing factors

3.2 结果分析

3.2.1 模糊 DEMATEL-ISM 分析

由图 1 可知:散点可划分为四个象限,第 I 象限原因度大于 0,中心度较高,属于强原因的因素集;第 II 象限原因度大于 0,中心度较低,属于弱原因的因素集;第 III 象限原因度小于 0,中心度较低,属于弱结果的因素集;第 IV 象限原因度小于 0,中心度较高,属于强结果的因素集。位于第 I 象限内的因素,代表其对前置仓供应链风险系统及其他因素有较大影响;位于第 IV 象限内的因素,代表其在很大程度上受到其他因素的影响。因此,这两个象限均属于关键因素,需要重点关注。

影响度和中心度反映各因素在系统中的重要性,通过第 I 和 IV 象限排查出的关键因素,其中心度排名均靠前,但 S_{16} 的影响度为 2.26,排名第 2,仅次于 S_{13} ,因此 S_{16} 也是关键因素之一。综上, $S_1, S_2, S_6, S_7, S_{10}, S_{11}, S_{13}, S_{16}$ 为关键因素。

影响因素划分为五个层级, S_{16} 处于 L5 层级,是根源因素。 S_7, S_{13} 处于 L4 层级,是深层因素,对前置仓供应链风险系统起到核心影响作用。 S_2, S_{10}, S_{11} 处于 L1 层级,是结果因素的前 3 名,同时也是表层因素,是前置仓供应链风险的具体反映。L2 和 L3 层级在结构中起衔接作用,既受到深层和根源因素的影响,又对表层因素造成直接影响。

结合模糊 DEMATEL-ISM 的分析结果可知,第 I 象限强原因因素大多分布在 L4 ~ L5 层级,属深层、根源因素;第 IV 象限强结果因素大多分布在 L1 层级,属表层因素。

3.2.2 复杂网络图分析

由复杂网络图的分析结果可知,节点度排名靠前的因素有 $S_1, S_2, S_6, S_7, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{16}$,可

确定为关键因素。该分析结果与模糊 DEMATEL-ISM 模型的分析结果基本一致,在一定程度上验证了 DEMATEL-ISM 模型对前置仓供应链风险分析具有一定的适用性和可行性。

3.2.3 风险管理对策分析

根据上述分析,前置仓供应链系统共有 8 个关键影响因素,分别为 $S_1, S_2, S_6, S_7, S_{10}, S_{11}, S_{13}, S_{16}$ 。其中, S_1, S_2, S_{10}, S_{11} 为“浅层-表层”因素,对前置仓模式下生鲜农产品供应链系统产生直接影响; S_7, S_{13}, S_{16} 为“深层-根源”因素,在整个系统中起到基础性作用,并以各种方式影响中层、浅层和表层的因素,进而对整个系统产生作用。其余因素在系统中起过渡作用,受深层和根源致因的影响,同时又对浅层和表层致因造成影响。为进一步优化前置仓供应链系统,建议采取以下方面的措施。

1) 优化前置仓布局,加强冷链物流基础设施建设:加大投资力度,构建现代化冷链物流基础设施体系,特别是在前置仓的布局和选址上,应充分考虑市场需求,提升冷链物流网络的覆盖范围与运作效率。促进政企合作,推动冷链物流技术创新与应用,以缩短配送周期,降低损耗率。

2) 完善政策标准与强化监管机制:制定和完善针对前置仓模式的冷链物流及生鲜农产品供应链的政策法规,明确标准与规范。加大监管力度,与企业协同配合,确保供应链各环节合规运营,提升整体安全性和可靠性。

3) 优化生鲜农产品质量控制体系:建立严格的农产品采购与检验标准,优选高品质供应商,从源头保障生鲜农产品的质量与安全。强化供应链全程质量控制,构建可追溯的农产品溯源系统。

4) 增强管理层质量领导力:加强行业培训与交流,提升企业管理层对生鲜农产品质量管理的战略认知与执行力。建立健全质量管理体系,确保质量管理贯穿于供应链每一个环节。

5) 提升消费者质量安全认知:开展多渠道、多形式的消费者教育活动,提高消费者对生鲜农产品质量安全的认识与重视程度。通过透明化供应链运作,增强消费者信任,塑造行业良好形象。

6) 降低前置仓模式下的生鲜农产品货损成本:针对前置仓的特点,采用先进的包装材料与技术,改善包装设计,降低运输过程中的物理损伤。加强前置仓内的库存管理,实施精准的保鲜措施,减少因过期或变质造成的货损。

7) 优化前置仓模式下的生鲜农产品供应链运

作成本:针对前置仓的运营特点,通过精细化管理,优化库存管理、订单处理、前置仓的配送路径及配送频率等环节,有效降低供应链运作成本。引进先进物流技术与设备,提升运营效率,增强企业竞争力。

8)提高前置仓模式下冷链配送效率与准时性:利用大数据分析技术,精准预测前置仓所服务区域的市场需求,合理规划配送路径,提高配送效率。加强配送过程中的实时监控与调度,确保生鲜农产品能够迅速、准确地送达消费者手中,提升客户满意度和前置仓的运营效率。

4 结论

针对前置仓模式下生鲜农产品供应链风险影响因素进行研究,梳理前置仓模式下生鲜农产品供应链主要业务环节及参与主体,结合文献研究、现场调研及专家访谈的方式,从产品自身特性风险等5个维度出发,识别出16个影响因素,并建立影响因素指标体系。在此基础上,构建模糊DEMATEL-ISM模型,对前置仓模式下生鲜农产品供应链进行风险影响因素分析,计算各因素的影响度、被影响度、中心度和原因度,进而明确了各因素在供应链风险系统中的重要程度及其因果属性,并挖掘出8个关键影响因素。利用ISM方法建立了影响因素的递阶层级结构图,揭示了根层、深层、中层、浅层及表层因素之间的相互作用机制,理清了系统内各影响因素之间的逻辑关联。最后,通过复杂网络分析进一步验证了模型的适用性和可行性,增强了研究结论的可靠性。

针对上述研究结果,提出了8条有针对性的管理启示与建议,为生鲜电商企业优化供应链管理、提高运营效率及降低供应链风险提供了参考,并为后续研究提供了新的视角和方法论支持。

参考文献(References):

[1] 刘明菲,陈威.基于集成DEMATEL-ISM的生鲜冷链前置仓物流服务质量风险影响因素研究[J].安全与环境工程,2020,27(1):118-125.
LIU M F, CHEN W. Research on risk impacting factors of logistics service quality of fresh cold chain front warehouse based on DEMATEL-ISM method[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(1): 118-125. (in Chinese)

[2] 付焯.生鲜农产品供应链物流风险传递与优化控制[D].成都:西南交通大学,2020.

[3] 张旭.社区O2O模式下电商生鲜农产品供应链风险评价与控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.

[4] 孙海雯,魏娟.生鲜农产品供应链风险影响因素识别与评

估:基于ISM模型[J].商业经济研究,2023(22):45-48.

[5] 吴洋晖,庞立伟,张振海.基于AHP的生鲜农产品供应链质量风险探究[J].商场现代化,2023(15):37-39.

[6] 吴迪,贾世冲.基于DEMATEL-ISM模型的冷链物流发展影响因素研究[J].沈阳师范大学学报(社会科学版),2023,47(6):88-93.
WU D, JIA S C. Research on the impact of cold chain logistics development based on DEMATEL-ISM model[J]. Journal of Shenyang Normal University (Social Science Edition), 2023, 47(6): 88-93. (in Chinese)

[7] 庞燕,邓奇缘,王忠伟,等.基于DEMATEL-ISM的果品冷链物流脆弱性关键影响因素辨识[J].中南林业科技大学学报,2024,44(3):136-148.
PANG Y, DENG Q Y, WANG Z W, et al. Identification of key influencing factors of forest fruit cold chain logistics vulnerability based on DEMATEL-ISM[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(3): 136-148. (in Chinese)

[8] 阎涛,陈芳,夏建辉.农产品供应链脆弱性测度及其影响因素研究[J].中国商论,2025(3):101-105.
YAN T, CHEN F, XIA J H. Research on measuring the vulnerability of agricultural products supply chain and its influencing factors[J]. China Journal of Commerce, 2025(3): 101-105. (in Chinese)

[9] LONSDALE C. Effectively managing vertical supply relationships: a risk management model for outsourcing[J]. Supply Chain Management, 1999, 4(4): 176-183.

[10] TRKMAN P, MCCORMACK K. Supply chain risk in turbulent environments: a conceptual model for managing supply chain network risk[J]. International Journal of Production Economics, 2009, 119(2): 247-258.

[11] GUO R, WU Z Y. Social sustainable supply chain performance assessment using hybrid fuzzy-AHP-DEMATEL-VIKOR: a case study in manufacturing enterprises[J]. Environment, Development and Sustainability, 2022; 1-29.

[12] HONG J T, QUAN Y T, TONG X G, et al. A hybrid ISM and fuzzy MICMAC approach to modeling risk analysis of imported fresh food supply chain[J]. Journal of Business & Industrial Marketing, 2024, 39(2): 124-141.

[13] MEDVEDIEV I, MUZYLYOV D, MONTEWKA J. A model for agribusiness supply chain risk management using fuzzy logic. Case study: Grain route from Ukraine to Poland[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 190: 103691.

[14] ZHANG N, WANG A L, ZHOU Y F, et al. Research on fresh supply chain risk evaluation of community group purchase based on hybrid multi-attribute decision-making method[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 143: 110065.

[15] KUMAR N, TYAGI M, SACHDEVA A. Visualization and analysis of key performance indicators for agricultural cold supply chain in Indian context using fuzzy DEMATEL approach[J]. Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies, 2023: 368390.

[16] 蔡云,赵蕾,陈森,等.基于Fuzzy-DEMATEL-ISM的四川省报废汽车回收率影响因素分析[J].再生资源与循环经济,2023,16(10):7-13.
CAI Y, ZHAO L, CHEN S, et al. Research on influencing factors for the end-of-life vehicles recycling rate in Sichuan Province based on fuzzy-DEMATEL-ISM[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2023, 16(10): 7-13. (in Chinese)