

跨境电商视角下化工企业电子商务发展困境与突破策略

陆齐翎, 党亚峥, 杨 灿

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年2月7日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年4月29日

摘 要

全球跨境电商快速发展背景下, 化工企业电商转型受安全环保、跨境法规等约束, 在合规管理、供应链透明度与内部运营上面临突出难题。然而该领域量化研究与模型仍较为缺乏。为提高决策科学性, 本文引入融合犹豫模糊集(HFS)与层次分析法(AHP)的HF-AHP模型, 处理专家评价中的不确定性。经多企业实证分析, 得出影响电商转型的三大关键因素及权重: 专业团队建设(0.213)、供应链数字化转型(0.187)、电商平台适配(0.165), 为化工企业电商发展提供理论依据与实践路径。

关键词

跨境电商, 化工企业, 电子商务发展, 犹豫模糊层次分析法, 多准则决策

Dilemma and Breakthrough Strategies of E-Commerce Development of Chemical Enterprises from the Perspective of Cross-Border E-Commerce

Qiling Lu, Yazheng Dang, Can Yang

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: February 7, 2026; accepted: February 24, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Against the background of the rapid development of global cross-border e-commerce, the e-commerce transformation of chemical enterprises is constrained by safety, environmental protection

文章引用: 陆齐翎, 党亚峥, 杨灿. 跨境电商视角下化工企业电子商务发展困境与突破策略[J]. 电子商务评论, 2026, 15(4): 935-946. DOI: 10.12677/ecl.2026.154473

and cross-border regulations, facing prominent difficulties in compliance management, supply chain transparency and internal operations. However, quantitative research and models in this field are still insufficient. To improve the scientificity of decision-making, this paper introduces the HF-AHP model combining Hesitant Fuzzy Sets (HFS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) to handle the uncertainty in expert evaluation. Through empirical analysis of multiple enterprises, three key factors affecting e-commerce transformation and their weights are obtained: professional team building (0.213), digital transformation of supply chain (0.187), and e-commerce platform adaptation (0.165), which provide theoretical basis and practical paths for the e-commerce development of chemical enterprises.

Keywords

Cross-Border E-Commerce, Chemical Enterprises, E-Commerce Development, Hesitant Fuzzy Analytic Hierarchy Process (HF-AHP), Multi-Criteria Decision-Making

Copyright © 2026 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. 研究背景与问题提出

在全球经济一体化与“互联网+”战略深入推进的背景下，跨境电商已成为驱动外贸增长的重要引擎。2024年中国跨境电商进出口总额达2.63万亿元，同比增长10.8%，发展势头强劲。化工行业作为国民经济的基础性、支柱性产业，全球市场广阔、产业关联度高，跨境电商为其拓展国际市场、降低贸易成本提供了新渠道[1]。然而，化工产品具有易燃、易爆、有毒等特殊性质，使得化工企业电商转型较其他行业面临更为复杂的约束条件。

其一，化工产品跨境贸易涉及各国严苛的监管要求，涵盖产品分类、标识、包装、进出口许可等[1]，各国监管体系的差异推高了企业合规风险；其二，化工产品仓储运输存在特殊要求，而跨境电商长距离、跨国界的特征大幅增加供应链管理难度，凸显出透明度低、运输成本高、物流链路易中断等问题；其三，化工企业内部运营管理存在营销模式陈旧、销售运营效率低下[2]、缺乏既懂化工又懂电商的专业人才[3]等问题，制约了电子商务的深入发展。

传统化工企业电子商务发展研究多采用定性分析方法，聚焦困境描述与策略建议提出，缺少对各类影响因素重要性及策略优先级的定量研究。层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)作为常用的多准则决策工具，要求专家以精确数值表达偏好，无法有效处理化工企业电商发展评价中因行业复杂性与跨境贸易环境多变性而导致的不确定性与犹豫性。因此，亟需构建一种能够容纳不确定信息、提升决策科学性的决策模型，以解决化工企业电子商务发展面临的实际问题。

1.2. 国内外研究现状分析

近年来，跨境电商与化工行业交叉领域的研究逐步从宏观政策描述转向微观机制探索，但兼具系统性与量化的成果仍较为匮乏。

1.2.1. 多准则决策方法应用演进

多准则决策(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)现已成为复杂系统评价研究的核心工具。王梦翔

(2020)通过改进 TOPSIS、MAUT 与 SAW 三种 MCDM 方法开展制药企业财务绩效排名研究,证实多方法交叉验证能显著提升结果稳健性[4]。在化工领域,夏露等(2024)运用 AHP 构建“专精特新”化工企业数字化供应链成熟度模型,从战略管理、技术应用、业务流程、组织文化四大维度验证了模型的成熟度与有效性[5]。而针对传统 AHP 难以处理化工电商转型评价中合规成本与数字化收益权衡的犹豫性,也为了更精准刻画专家评价偏好,Torra (2010)提出犹豫模糊集(Hesitant Fuzzy Set, HFS)理论,即从多个隶属度值刻画专家不确定性[6],为 HF-AHP 混合模型奠定理论基础。Alrabeah R N, Alsager M K 等(2025)将多 Q-犹豫模糊软集与 Fermatean 犹豫模糊集进行融合,衍生出多 Q-Fermatean 犹豫模糊软集(MQFHFSS)的概念,为优化复杂多准则决策问题提供实用参考,其捕捉评价中不确定性、犹豫性的能力超越了费尔马犹豫模糊集、模糊软集和毕达哥拉斯模糊集等传统方法,从而支持复杂决策情况下的平衡判断[7]。Şener F F, Kızılkaya E A, Nigmat U (2021)采用 HF-AHP 对牛仔布靛蓝绳染色工艺改进进行研究,发现工艺可持续性生产主要受环境、质量、经济等因素影响,并提出用绿色替代品替代化学物质和染料方案[8]。

1.2.2. 化工供应链相关研究

化工供应链研究呈现出由技术应用向系统协同深化的数字化转型趋势。张丽(2025)指出,大数据、物联网与 AI 技术可显著提升化工供应链各环节运行效率,但同时面临技术适配、人才短缺与安全风险等挑战[9]。章红军(2024)研究表明,通过信息共享、流程自动化、智能决策等数字化协同手段,可有效降低采购成本、提高库存周转率与物流效率[10]。与此同时,绿色供应链理念日益成为行业共识。陈庆兵(2024)以化工企业引入 ESG 标准视角,强调绿色采购、清洁生产与废弃物资源化等构建闭环体系[11]的实践性;刘杨与孟君(2024)则聚焦轻化工产业,指出环境成本未单独核算是当前主要短板,建议基于作业成本法(ABC)分配环境成本并编制独立报告[12]。此外,在探讨数字化与绿色化内在耦合时,金勇(2024)认为,智慧供应链通过数据驱动与动态响应机制,可同时提升运营效率与环境绩效[13]。综上,整体来看,现有研究鼓励探讨数字化、绿色化较多,针对二者关系,以及融合跨境电商合规要求的化工企业视角仍属空白。

1.2.3. 跨境电商合规相关研究

近年来,围绕跨境电商合规的研究,呈现出由平台规则向全球税制范式转移的态势。齐欣、卢洪雨(2022)针对亚马逊“封号事件”指出,刷单、知识产权侵权及平台引流违规等行为是店铺大规模关停的主因,进而强调合规经营是企业生存的底线[14]。傅潇(2025)则系统梳理了两轮跨境电商所面临的国际包裹税收政策。其中,第一轮(2019~2021)以欧盟、英国取消增值税小额免税为代表;第二轮(2023 年以来)则以欧盟、马来西亚等大幅下调关税免税额为特征,强化电商平台应履行代征代缴义务[15]。此外,美国 2025 年 6 月全面取消 800 美元小额免税额度、对“301 条款”清单商品采取惩罚性 120%关税等举措,进一步推动跨境电商进入高合规成本时代。在此背景下,苏芬(2023)提出,跨境电商企业应充分利用综试区、核定征收政策,以及 OPCO + WFOE + 香港 SPV 模式架构,持续拓宽资金回款渠道[16]。陆永隽(2025)则聚焦个体户小型卖家、境内主体与香港 SPV 的中型企业、以及境内、香港海外 PE 于一体的跨洲大型企业框架,从而针对性明确不同类型企业,如何应对税基侵蚀与利润转移、共同申报准则、受控外国企业等国际反避税规则[17]。徐立娟(2025)从实证角度进一步指出,青岛 30%的中小企业因合规能力不足,不得不放弃欧美市场,因此应联动政府、企业,通过协同知识产权诉讼、碳关税等新型风险,构建起完整的跨境合规预警平台,以便更好地应对各种新型出口信用保险[18]。

综上,现有研究虽对多准则决策、化工供应链[19]及跨境电商合规展开了探讨,但仍存在不足:如研究多采用定性分析或传统 MCDM 方法,对跨境化工电商评价、专家犹豫性及准则交互效应探讨不够深入;数字化、绿色化与合规化研究尚未形成体系化框架,REACH 注册、TSCA 认证、危化品仓储标

准、平台代征 VAT 等问题研究薄弱, 犹豫模糊集与多准则决策相结合的研究尤为匮乏。这为本文提供了研究切入点。本文将犹豫模糊集与层次分析法结合, 构建 HF-AHP 模型以处理专家评价不确定性, 融合数字化、绿色成本管理 with 跨境合规, 为化工电商发展定量评估与实践决策提供参考。

2. 理论基础

2.1. 犹豫模糊集(Hesitant Fuzzy Set, HFS)

犹豫模糊集是传统模糊集的拓展, 用于描述专家对某一元素进行评价时存在多个可能隶属度的情况。设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为非空有限集, 则 X 上的一个犹豫模糊集 E 定义为:

$$E = \{ \langle x, h_E(x) \rangle \mid x \in X \}$$

其中, $h_E(x)$ 是区间 $[0,1]$ 上若干可能值的集合, 称为犹豫模糊元(Hesitant Fuzzy Element, HFE), 代表元素 x 属于集合 E 的所有可能隶属度。为便于计算与比较, 需对犹豫模糊元进行聚合, 常用方法包括得分函数与精确函数。犹豫模糊元 h 的得分函数 $s(h)$ 定义为 h 中所有元素的算术平均值:

$$s(h) = \frac{1}{l(h)} \sum_{\gamma \in h} \gamma$$

其中, $l(h)$ 为犹豫模糊元 h 中元素的个数。精确函数 $a(h)$ 定义为 h 中的最大值:

$$a(h) = \max_{\gamma \in h} \gamma$$

得分函数用于比较犹豫模糊元的大小, 对于两个犹豫模糊元 h_1 与 h_2 :

- 若 $s(h_1) > s(h_2)$, 则 $h_1 > h_2$;
- 若 $s(h_1) = s(h_2)$, 那么当 $a(h_1) > a(h_2)$ 时, $h_1 > h_2$, 否则 $h_1 = h_2$ 。

2.2. 犹豫模糊层次分析法(HF-AHP)

犹豫模糊层次分析法的核心思想是将传统 AHP 判断矩阵中的精确值替换为犹豫模糊元, 以更好地处理专家评价过程中的不确定性与犹豫性。具体步骤如下:

步骤 1: 构建层次结构模型。根据研究问题, 依次分解目标层、准则层与方案层。对于化工企业电子商务发展问题, 目标层为“突破电子商务发展困境”, 准则层包括政策监管环境、供应链管理、内部运营管理、技术支持等, 方案层为具体的发展策略。

步骤 2: 构建犹豫模糊判断矩阵。组建由化工行业、跨境电商及学术领域专家构成的专家组, 对同层准则进行两两比较, 并以犹豫模糊元表征其相对重要程度。

步骤 3: 计算犹豫模糊权重。首先对判断矩阵每行的犹豫模糊元进行聚合, 得到每个准则的综合犹豫模糊值, 常用的聚合方法为犹豫模糊几何平均(HFGM)算子:

$$h_i = \text{HFGM}(h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{in}) = \left\{ \prod_{j=1}^n \gamma_{ij}^{1/n} \mid \gamma_{ij} \in h_{ij} \right\}$$

然后计算每个综合犹豫模糊值 h_i 的得分函数, 并进行归一化处理, 得到权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 其中 $w_i = s(h_i) / \sum_{k=1}^n s(h_k)$ 。

步骤 4: 一致性检验。对于犹豫模糊判断矩阵, 需通过定义犹豫模糊一致性比率(HFCR)进行一致性检验。首先通过得分函数将犹豫模糊判断矩阵转化为清晰矩阵, 计算清晰矩阵的一致性指标(CI)与随机指标(RI), 进而定义犹豫模糊一致性比率为:

$$HFCR = \frac{HFCI}{HFRII}$$

其中, HFCI 为犹豫模糊一致性指数, 是转化后多个清晰矩阵 CI 的平均值; HFRII 为犹豫模糊随机指数, 由模拟实验确定。若 $HFCR \leq 0.1$, 则判断矩阵一致性可接受, 否则需专家重新调整。

3. 化工企业电子商务发展 HF-AHP 模型设计

3.1. 研究设计

层次分析法(AHP)是由美国运筹学家萨蒂(T.L. Saaty)提出的一种定性与定量结合的多准则决策方法。本文通过文献综述与行业调研, 识别出合规管理、供应链协同、内部运营与技术应用四大困境; 同时引入犹豫模糊层次分析法(HF-AHP)构建评价模型以处理专家评价犹豫性; 通过德尔菲法(Delphi Method)收集专家意见, 对 10 家代表性化工企业进行实证评估并确定因素权重; 最后, 基于权重排序结果, 结合 REACH、TSCA 等具体法规要求, 提出分层次的突破策略。

3.2. 评价指标体系构建

基于对化工企业跨境电商实践的深入剖析, 本文从四个维度构建了包含 12 项子准则的评价指标体系(见表 1)。该体系的构建严格遵循了德尔菲法的操作流程: 首轮邀请 15 位专家(包括 8 位化工企业高管、4 位跨境电商平台专家和 3 位高校学者)提出初始指标池; 经两轮匿名反馈与意见整合后, 确定 12 项核心指标。所有指标均采用正向化处理, 即数值越大代表该方面表现越优。

Table 1. Evaluation index system for e-commerce development of chemical enterprises

表 1. 化工企业电子商务发展评价指标体系

目标层	准则层	指标层(子准则)	指标说明
化工企业电子商务发展水平	合规管理	A1. 监管政策适应性	企业对出口国(如欧盟、美国)化工品监管政策(如 REACH、TSCA)的响应速度与合规能力。
		A2. 跨境税务合规性	企业在 VAT、关税及所得税等方面的合规申报与筹划能力, 应对国际税制改革(如取消小额免税)的能力。
		A3. 平台规则遵从度	对亚马逊、阿里国际站等主流平台经营规则的遵守情况, 规避“封号”风险的能力。
	供应链协同	B1. 供应链数字化转型	利用物联网、区块链等技术实现采购、生产、仓储、物流全链路数字化的程度。
		B2. 绿色供应链管理	在供应商选择、生产过程及废弃物处理中融入 ESG 理念, 有效管理环境成本的能力。
		B3. 跨境物流效率	危化品跨境运输的时效性、成本控制及安全合规性, 包括对 ADR、IMDG 等国际运输规则的遵循。
	内部运营	C1. 电商专业团队建设	拥有具备化工、电商、外语、合规等复合型知识结构的专业人才团队规模与能力。
		C2. 数据驱动决策	基于销售、客户、市场等数据进行精细化运营与科学决策的能力。
		C3. 品牌与营销能力	在海外市场建立品牌认知度, 运用数字营销工具(如社交媒体、SEO)进行精准营销的能力。

续表

	D1. 电商平台适配性	企业自建或第三方平台的功能、安全性与用户体验对化工 B2B 交易的适配程度。
技术应用	D2. 信息安全保障	保护客户数据、交易信息及商业机密的技术与管理措施。
	D3. 技术创新投入	在电商相关技术研发(如 AI 客服、智能推荐)上的资金与人才投入。

3.3. HF-AHP 模型构建

3.3.1. 模型构建的理论基础

在复杂的化工跨境电商决策环境中,专家对各影响因素重要性的判断天然存在犹豫性和不确定性。传统的 AHP 方法强制要求专家给出精确数值,会丢失原始信息,导致决策偏差。因此,本文采用犹豫模糊集(HFS)来刻画这种犹豫性,并将其融入 AHP 框架,形成 HF-AHP 模型。

3.3.2. 模型构建

为确保模型的可操作性和严谨性,本文将 HF-AHP 的计算过程细化为以下标准化步骤:

步骤 1: 获取专家对准则层重要性的犹豫模糊评价

邀请专家小组使用语言变量(Linguistic Variables)对准则层(A, B, C, D)进行两两比较。从而确定本文的语言变量及其对应的犹豫模糊元(HFE)。

步骤 2: 构建并聚合犹豫模糊判断矩阵

个体矩阵构建,每位专家根据其两两比较结果,构建自己的犹豫模糊判断矩阵

$$\tilde{D}^k = [\tilde{d}_{ij}^k]_{n \times n}$$

群体矩阵聚合,采用算术平均法对所有专家的判断进行聚合,形成群体犹豫模糊判断矩阵

$$\tilde{D} = [\tilde{d}_{ij}]_{n \times n}$$

对于任意元素 \tilde{d}_{ij} , 其计算公式为:

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{1}{K} (\tilde{d}_{ij}^1 \oplus \tilde{d}_{ij}^2 \oplus \dots \oplus \tilde{d}_{ij}^K)$$

其中 \oplus 表示犹豫模糊元的加法运算,即对所有专家提供的所有可能值取并集后再求平均。

步骤 3: 犹豫模糊元去模糊化与矩阵归一化

去模糊化处理,将每个犹豫模糊元

$$\tilde{d}_{ij} = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l\}$$

转化为清晰数 γ_{ij} , 采用算术平均法作为得分函数:

$$\gamma_{ij} = s(\tilde{d}_{ij}) = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \gamma_k$$

由此得到清晰数判断矩阵

$$R = [r_{ij}]_{n \times n}$$

归一化处理,对矩阵 R 进行线性归一化处理,得到标准化矩阵

$$N = [n_{ij}]_{n \times n}$$

步骤 4: 计算权重向量并进行一致性检验

采用方根法(Geometric Mean Method)计算准则层的权重向量

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$$

一致性检验, 计算一致性比率(Consistency Ratio, CR)。若 $CR < 0.1$, 则认为判断矩阵具有满意的一致性; 否则, 需返回步骤 1, 邀请专家重新审视并调整判断。

步骤 5: 重复步骤 1~4, 计算指标层权重及综合权重

参考传统 AHP 的一致性检验方法, 定义犹豫模糊一致性比率(HFCR)对犹豫模糊判断矩阵进行一致性检验, 具体计算步骤如下:

(1) 对于犹豫模糊判断矩阵 $A = (h_{ij})_{n \times n}$, 利用得分函数 $s(h_{ij})$ 将每个犹豫模糊元 h_{ij} 转化为清晰值, 得到得分矩阵 $S = (s_{ij})_{n \times n}$ 。

(2) 计算得分矩阵 S 的最大特征值 λ_{\max} 。

(3) 计算一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, 其中 n 为判断矩阵的阶数。

(4) 根据判断矩阵的阶数确定随机指标 RI (判断矩阵随机指标(RI)取值表如表 2 所示)。

Table 2. Random index (RI) value table

表 2. 随机指标(RI)取值表

判断矩阵阶数(n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

犹豫模糊一致性比率定义为:

$$HFCR = \frac{CI}{RI}$$

当 $HFCR \leq 0.1$ 时, 判断矩阵的一致性可接受。

3.3.3. 群体共识度(GCD)

为评价专家间意见的一致性, 基于专家判断矩阵间的相似度定义群体共识度(GCD)。假设存在 k 位专家, 其判断矩阵分别为 A_1, A_2, \dots, A_k , 专家 p 与专家 q 之间的相似度 S_{pq} 采用余弦相似度公式计算:

$$S_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s(h_{ij}^p) \cdot s(h_{ij}^q)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [s(h_{ij}^p)]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [s(h_{ij}^q)]^2}}$$

其中, $s(h_{ij}^p)$ 与 $s(h_{ij}^q)$ 分别为专家 p 与专家 q 判断矩阵中犹豫模糊元 h_{ij} 的得分值。

群体共识度为所有专家两两之间相似度的平均值:

$$GCD = \frac{2}{k(k-1)} \sum_{1 \leq p < q \leq k} S_{pq}$$

GCD 的取值范围为 $[0, 1]$, 越接近 1 表明专家间意见一致性越高。

为量化专家判断的可靠性, 本研究计算了专家权威系数(C_r), 其公式为:

$$C_r = \frac{C_a + C_s}{2}$$

其中, C_a 为专家对咨询问题的熟悉程度, C_s 为专家对咨询问题的判断依据。通过预调研问卷, 得出 $C_a = 0.92$, $C_s = 0.80$, 因此 $C_r = 0.86$ 。根据德尔菲法惯例, 当 $C_r > 0.70$ 时, 专家判断结果被认为是可靠的, 本研究的专家权威性得到了充分验证。

为确保专家共识, 通过开放式问卷向专家对初选 28 项指标进行 1~9 分制评定打分, 并基于评分结果进行指标删选、修订。共发放问卷 15 份, 回收 15 份, 回收率 100%。剔除均值 < 5.0 、变异系数 > 0.3 的指标后, 保留 20 项。再将结果匿名反馈并重新评分, 经 Kendall 协调系数检验, $W = 0.732$ ($p < 0.01$), 所有指标 $CV < 0.25$, 满足一致性要求。经两轮筛选, 最终确立 4 个准则层、12 项指标层的评价体系, 覆盖化工跨境电商核心痛点, 为 HF-AHP 权重计算奠定基础。

3.4. 迭代反馈机制设计

在复杂决策中, 专家往往只能提供不完全的序偏好信息, 而非完整的两两比较矩阵。为此, 本文构建多维度、可视化于一体的迭代反馈机制。即犹豫模糊一致性比率 $HFCR \leq 0.1$ 且群体共识度 $GCD \geq 0.85$ 时, 系统将自动生成一份三维诊断反馈报告, 并将其匿名化后分发给所有参与评估的专家, 以引导其进行精准、高效的判断修正。

4. 实证研究: 化工企业电子商务发展策略选择

4.1. 背景与目标

选取 10 家不同规模化工企业(大型 3 家、中型 4 家、小型 3 家)为研究对象, 业务覆盖石油化工、精细化工、化工原料等领域。上述企业均已开展电商业务, 却普遍面临合规风险高、供应链效率低、复合型人才短缺等问题。本文运用 HF-AHP 模型对化工电商发展关键因素进行定量评价与策略排序, 为行业突破发展瓶颈、优化决策提供参考。各研究对象评价指标评分见表 3。

Table 3. Expert scoring table for key influencing factors of cross-border e-commerce development in 10 chemical enterprises (Score: Full Mark = 10)

表 3. 10 家化工企业跨境电商发展关键影响因素专家评分表(单位: 分, 满分 10 分)

企业编号	规模	A. 政策监管环境			B. 供应链管理			C. 内部运营管理			D. 技术支持		
		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
1	大型	8.20	7.80	6.50	8.50	7.60	8.00	7.00	7.20	6.80	8.30	7.50	8.10
2	大型	8.50	8.00	6.80	8.80	7.90	8.20	7.30	7.50	7.00	8.50	7.80	8.30
3	大型	8.30	7.90	6.60	8.60	7.70	8.10	7.10	7.30	6.90	8.40	7.60	8.20
4	中型	7.80	7.50	6.20	8.00	7.30	7.60	6.50	7.00	6.40	8.00	7.20	7.90
5	中型	7.60	7.30	6.00	7.80	7.10	7.40	6.30	6.80	6.20	7.80	7.00	7.70
6	中型	7.90	7.60	6.30	8.10	7.40	7.70	6.60	7.10	6.50	8.10	7.30	7.80
7	中型	7.70	7.40	6.10	7.90	7.20	7.50	6.40	6.90	6.30	7.90	7.10	7.60
8	小型	7.20	7.00	5.80	7.30	6.80	7.00	5.80	6.50	6.00	7.50	6.80	7.40
9	小型	7.00	6.80	5.60	7.10	6.60	6.80	5.60	6.30	5.80	7.30	6.60	7.20
10	小型	7.10	6.90	5.70	7.20	6.70	6.90	5.70	6.40	5.90	7.40	6.70	7.30

4.2. 数据收集与实验设计

邀请 8 位专家组成专家小组，包括 3 位具有 10 年以上电子商务经验的化工企业高级管理人员、2 位跨境电商平台运营专家、2 位从事化工行业与电子商务研究的高校学者及 1 位海关监管专家。将专家随机分为 2 组，每组 4 人，对评价指标体系中的 12 项子准则进行两两比较。

实验采用对比设计：首先，专家采用传统 AHP 方法完成一轮独立判断；随后，运用多迭代 HF-AHP 模型进行 3 轮判断与反馈。通过自行设计的问卷收集实验数据，并对数据进行有效性与可靠性检验，确保数据质量。

4.3. 结果分析与讨论

4.3.1. 准则权重对比

由表 4 可知，HF-AHP 通过保留专家犹豫信息，有效降低了极端评价带来的偏差，使结果更稳健可靠。传统 AHP 因部分专家对 A1 权重偏高而出现虚高；HF-AHP 经犹豫模糊元聚合后平滑了极端打分，更真实体现“人才为根本”的行业共识。其中，人才瓶颈是首要制约因素，电商团队建设权重最高，且在大型企业 7.13，中型企业 6.45、小型企业 5.70 间得分差异显著。

Table 4. Comparison of some weights between traditional AHP and HF-AHP

表 4. 传统 AHP 与 HF-AHP 部分权重对比

排名	传统 AHP 方法	权重	HF-AHP 方法	权重
1	A1. 监管政策适应性	0.198	C1. 电商专业团队建设	0.213
2	C1. 电商专业团队建设	0.185	B1. 供应链数字化转型	0.187
3	B1. 供应链数字化转型	0.172	D1. 电商平台适配性	0.165
4	D1. 电商平台适配性	0.142	A1. 监管政策适应性	0.142
5	B2. 绿色供应链管理	0.118	B2. 绿色供应链管理	0.118

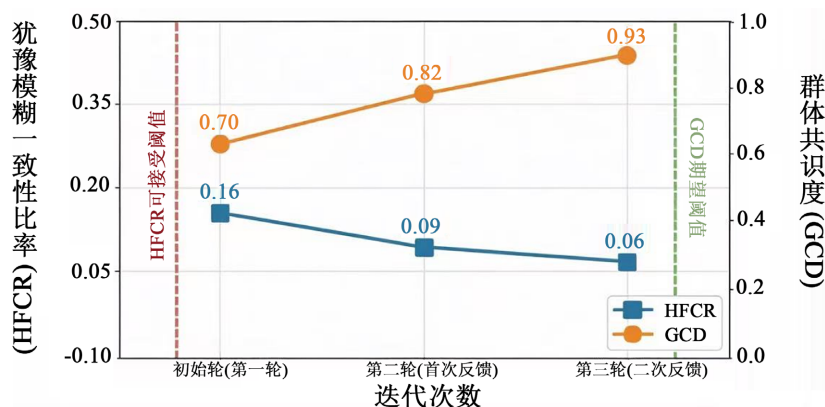
由此可见，人才短缺是化工企业共性问题，对中小企业制约尤为显著；数字化水平是企业差距的关键，大、中、小企业得分差异直接印证了这一点。合规是生存底线但非核心竞争力，监管政策适应性权重 0.142，离散度最小，表明所有企业都已认识到合规的重要性。与传统 AHP 侧重外部政策不同，HF-AHP 更关注电商团队、供应链数字化等内部驱动因素，可精准捕捉专家评价的犹豫信息，兼顾内外部因素交互。其中电商团队建设水平(C1)权重 0.213 居首位，表明复合型人才是化工电商发展的核心动力，与当前人才短缺现状一致。

4.3.2. 决策一致性演化

图 1 展示了 HF-AHP 模型三轮迭代过程中专家群体的平均 HFCR 与 GCD 变化情况。初始状态(第一轮)下，平均 HFCR 为 0.16(高于 0.1 的可接受阈值)，GCD 为 0.70(低于 0.85 的期望阈值)，表明专家初始判断存在明显的不一致性与分歧。经过第一轮反馈修正后，平均 HFCR 降至 0.09，GCD 升至 0.82；第二轮迭代后，平均 HFCR 进一步降至 0.06，GCD 升至 0.93，满足收敛条件。这表明 HF-AHP 模型的多迭代反馈机制能够有效引导专家调整判断，消除逻辑不一致性与群体分歧，提升决策的一致性与可靠性。

4.3.3. 发展策略优先级排序

基于 HF-AHP 模型的权重计算结果，得到化工企业电子商务发展策略优先级排序(如表 5 所示)。



注：横轴为迭代次数，纵轴为 HFCR 与 GCD 取值。

Figure 1. Evolutionary trend of decision-making consistency

图 1. 决策一致性演化趋势

Table 5. Priority ranking of e-commerce development strategies for chemical enterprises

表 5. 化工企业电子商务发展策略优先级排序

策略类型	具体策略	对应子准则	优先级排名
人才策略	加强专业人才引进与培养，建立与高校科研机构的合作机制	C1	1
供应链策略	推进供应链数字化转型，应用区块链、物联网技术提升供应链透明度与稳定性	B1、B3	2
技术支持策略	优化电商平台建设，加强大数据技术应用实现精准营销	D1、D2	3
合规策略	建立全球合规框架，加强与目标市场本地企业及监管机构的合作	A1、A3	4
物流策略	提升物流仓储专业性，与专业化工物流企业建立长期合作关系	B2	5

策略优先级排序表明，化工企业应首先解决人才短缺问题，其次推进供应链数字化转型与电商平台优化，最后提升合规管理水平与物流服务质量。该排序相较于以往研究提出的一般性策略建议，更具针对性与可操作性。

4.4. 敏感性分析

为检验模型稳定性，对权重最高的 C1 (0.213)在 $\pm 12\%$ 范围内扰动，结果显示 C1 仍稳居首位；经 1000 次蒙特卡洛模拟，C1 位列第一的概率为 89.7%，B1 为 83.2%，证实策略排序高度可靠。关联分析表明：大型企业综合得分 7.93，在数字化、合规及人才方面均具优势；中型企业 7.36，指标均衡但人才得分 6.45 低于大企业，形成发展瓶颈；小型企业 6.72，各维度均偏弱，人才(5.70)与数字化(7.20)短板尤为突出，导致市场竞争力不足。

5. 化工企业电子商务发展困境突破策略

基于实证研究结果，结合化工行业特性与跨境电商发展趋势，针对化工企业电子商务发展困境提出以下突破策略：

5.1. 加强专业队伍建设

专业人才是化工企业电商发展的核心保障。企业应坚持内培外引，对内开展跨境电商平台运营、数

字营销及 REACH/TSCA 法规等专项培训，对外与高校建立校企合作、通过共建实习基地与设立奖学金锁定专业人才；同时建立知识库与激励考核机制，将 KPI 改为合规、满意度、新市场开拓等多维度指标，激发团队创新与效能。

5.2. 推进供应链数字化转型

供应链数字化转型是提升化工电商运营效率的重要途径。企业应运用区块链、物联网技术打造全链路追溯的智慧供应链中枢：上游与核心供应商建立 EDI 系统、实现数据实时同步；中台部署 AI 驱动的需求预测与智能补货；下游通过 IoT 实时监控危化品运输并同步客户。同时，严格遵循 NFPA30:2024 (美标)与 GB15603-2022 (国标)的要求，推进仓储运输合规数字化；参考欧盟 ChemChain 项目，利用区块链存证 MSDS、UN38.3 报告等关键文件，以满足 ESG 审计要求。此外，企业应优化物流网络并与专业化工物流企业合作，提升供应链稳定性与效率。

5.3. 健全合规管理体系

合规管理是化工企业开展跨境电商业务的前提。企业应建立全球合规体系，设立专职部门跟踪研究目标市场监管政策。首先建立动态合规数据库，对欧盟市场实行 REACHSVHC (高度关注物质)月度筛查并确保 SCIP 数据库通报与下游用户 SDS 传递的及时性；对美国市场建立 TSCA 符合性验证流程与 PMN (预生产通知)申报，建议委托 SGS、Intertek 等第三方机构进行年度合规审计。同时依据联合国 GHS 第 10 版，开发多语言 SDS 自动生成系统，适配多国标签要求。其次搭建分级跨境税务架构：小微企业利用综试区“无票免税”；中型企业采用“境内 + 香港 SPV”模式；大型企业搭建“境内 + 香港 + 海外 PE”框架并完成 ODI 备案，应对 BEPS、CRS 等国际反避税规则，实现长期合规。

6. 结论与展望

本文构建了针对化工企业电子商务发展的多迭代犹豫模糊层次分析法(HF-AHP)模型，有效解决了传统决策方法无法处理不确定信息的问题[19]。通过对不同规模化工企业的研究表明，HF-AHP 模型在捕捉专家犹豫信息、提升决策一致性方面具有明显优势[20]，得出的策略优先级排序更贴合化工企业实际发展需求。

未来随着跨境电商跨境电商的持续发展与化工行业数字化转型不断深化，化工电商将迎来新机遇与新挑战。后续研究可围绕人工智能、区块链等技术应用、绿色低碳供应链建设及“一带一路”背景下发展策略展开，为化工电商高质量发展提供理论与实践支撑。

参考文献

- [1] 岳好好. 跨境电商视角下化工企业电子商务发展的困境与突破[J]. 塑料工业, 2024, 52(7): 205.
- [2] 宋佳佳. 电子商务技术在化工行业企业的应用[J]. 现代化工, 2023, 43(8): 31-36.
- [3] 陈宝英, 李思莹, 刘凯. “互联网+”下化工企业发展电子商务的路径研究[J]. 热固性树脂, 2024, 39(1): 108-109.
- [4] 王梦翔. 基于三项 MCDM 方法的制药企业财务绩效评价研究[J]. 洛阳理工学院学报(社会科学版), 2020, 35(3): 7-13.
- [5] 夏露, 顾彬, 刘玲, 等. 基于 AHP 法的化工企业数字化供应链成熟度研究[J]. 物流科技, 2024, 47(7): 121-126.
- [6] Rodríguez, R.M., Martínez, L., Torra, V., Xu, Z.S. and Herrera, F. (2014) Hesitant Fuzzy Sets: State of the Art and Future Directions. *International Journal of Intelligent Systems*, 29, 495-524. <https://doi.org/10.1002/int.21654>
- [7] Alrabeah, N.R. and Alsager, K.M. (2025) Multi-Q Fermatean Hesitant Fuzzy Soft Sets and Their Application in Decision-making. *Symmetry*, 17, Article 1656. <https://doi.org/10.3390/sym17101656>
- [8] Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K. and Uzal, N. (2021) Multi-Dimensional Sustainability Evaluation of Indigo Rope Dyeing

- with a Life Cycle Approach and Hesitant Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Journal of Cleaner Production*, **309**, Article ID: 127454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127454>
- [9] 张丽, 商俊勇, 刘振军. 数字化转型对化工企业供应链管理的影响[J]. 化工管理, 2025(22): 4-7.
- [10] 章红军. 化工行业供应链数字化协同的成本控制与效率提升研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集(一). 绍兴: 浙江省新昌县祥和化工有限公司, 2025: 934-937.
- [11] 陈庆兵. 化工企业绿色供应链管理体系的构建与革新[J]. 中国商人, 2025(12): 166-167.
- [12] 刘杨, 孟君. 绿色视角下轻化工产业绿色供应链环境成本管理研究[J]. 造纸科学与技术, 2024, 43(6): 128-131.
- [13] 金勇. 智慧供应链对化工企业数字化转型发展的驱动分析[J]. 科技经济市场, 2024(11): 110-112.
- [14] 齐欣, 卢洪雨. 跨境电商平台卖家经营合规化探讨——以亚马逊封号事件为例[J]. 对外经贸实务, 2022(5): 44-49.
- [15] 傅潇. 国际包裹税收政策变化对中国跨境电商企业的影响与对策研究[J]. 国际商务财会, 2025(16): 34-41, 46.
- [16] 苏芬. 跨境电商企业涉税风险及税务处理合规化策略研究[J]. 会计师, 2023(15): 52-54.
- [17] 陆永隽. 出口电商跨境架构设计与国际税务合规筹划路径[J]. 国际商务财会, 2025(21): 15-20.
- [18] 徐立娟. 优化跨境电商物流体系与合规机制助力高水平对外开放的实践研究——基于青岛跨境电商业态调研的实证分析[J]. 中国商论, 2025, 34(17): 116-120.
- [19] Mourad, N., Qahtan, S., Zaidan, A.A., Bahaa, B., Alsattar, H.A., Ding, W., *et al.* (2026) A Multidimensional Ensemble Generalized Three-Way Decision Approach under Mixed-Normal Hesitant Fuzzy Sets for Evaluating IoT-Blockchain Integration in Supply Chain Performance. *Expert Systems with Applications*, **304**, Article ID: 130568. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130568>
- [20] 陈喆珂, 林铭炜. 基于层次分析法的犹豫模糊语言包络分析模型及其在边缘节点网络安全评估中的应用[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(1): 209-214.