文章编号：1003-1421(2026)07-0141-09
引用格式：沈丹阳，李昕泽. 基于fsQCA的多式联运效率“核心-边缘”协同组态路径研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(7)：141-149.
SHEN Danyang，LI Xinze. Research on “Core-Edge” Cooperative Configurational Path of Multimodal Transport Efficiency Based on fsQCA[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(7)：141-149.

基于fsQCA的多式联运效率“核心-边缘”协同组态路径研究

沈丹阳，李昕泽

(中国民航大学 交通科学与工程学院，天津 300300)

摘 要：为健全多式联运体系需求，破解效率协同优化难题，基于模糊集定性比较分析法(fsQCA)，进行多式联运效率“核心-边缘”协同组态路径研究。根据对多式联运8个属性的非线性交互分析，可以发现：①核心条件方面，经济性、时效性和安全性是效率的基石；②边缘协同方面，经济性弱化时，稳健性为核心补偿因子，绿色性或承载性提供差异化价值；经济性强劲时，便捷性与承载性充当效率放大器；③抑制效应方面，灵活性与标准化存在一定的效率冲突。此外，研究提出了核心基础保障型、核心+操作强化型和稳健/绿色补偿型3条高效路径，分别适配多式联运资源受限场景、精益供应链市场与高溢价市场。研究创新性地提出“核心-边缘”层级化协同框架，突破传统线性模型局限，验证了fsQCA法捕捉服务属性非线性交互的优势，为多式联运企业提供资源配置的决策依据。

关键词：多式联运；模糊集定性比较分析(fsQCA)；服务属性；效率组态路径；核心-边缘协同

中图分类号：U2；U11 **文献标识码：**A **DOI：**10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250702003

Research on “Core-Edge” Cooperative Configurational Path of Multimodal Transport Efficiency Based on fsQCA

SHEN Danyang，LI Xinze

(College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To meet the demand for improving the multimodal transport system and solve the problem of efficiency cooperative optimization, this paper studied the “core-edge” cooperative configurational path of multimodal transport efficiency based on the fuzzy set qualitative comparative analysis (fsQCA). According to the nonlinear interaction analysis of eight attributes of multimodal transport, it is found that: ① In terms of core conditions, economy, timeliness, and safety are the cornerstones of efficiency. ② In terms of edge synergy, when the economy is weakened, robustness is the core compensation factor, and greenness or carrying capacity provides differentiated value; when the economy is strong, convenience and carrying capacity act as efficiency amplifiers. ③ In terms of inhibition effects, there is a certain efficiency conflict between flexibility and standardization. In addition, this paper proposed three highly efficient paths: the core-foundation-guaranteed type, the core-and-operation-enhanced type, and the robust/green-compensated type, which are respectively

收稿日期：2025-07-02 **修订日期：**2026-02-04
基金项目：中国商业经济学会规划课题(20252180)

suitable for resource-constrained multimodal transport scenarios, lean supply chain markets, and high-premium markets. This paper innovatively proposed a “core-edge” hierarchical cooperative framework, broke through the limitations of traditional linear models, verified the advantages of the fsQCA method in capturing the nonlinear interactions of service attributes, and provided a decision-making basis for multimodal transport enterprises in resource allocation.

Keywords: Multimodal Transport; Fuzzy Set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA); Service Attribute; Efficiency Configurational Path; “Core-Edge” Synergy

0　引言

在全球贸易蓬勃发展的当下，多式联运作为现代物流体系的关键组成部分，其重要性不言而喻。2024年11月，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《有效降低全社会物流成本行动方案》明确提出“加快健全多式联运体系”，更是将多式联运效率优化上升为国家战略。多式联运效率(Multimodal Transport Efficiency，MTE)受经济、时效、安全和绿色等多种服务属性的综合影响，而目前对于各服务属性内复杂关系的探究尚不明确[1-2]，这直接增加了MTE提升及协同优化研究的复杂度。

MTE提升及协同优化研究一直是本领域的重点问题，相关研究采用了多种方法。其中基于经典运筹学的方法最为突出，如Han等[3]运用犹豫模糊多属性决策方法，评估了中国多式联运发展水平，揭示了影响省份间发展差距的关键因素；Feng等[4]运用协同理论下的多式联运系统序参量模型，研究了多式联运各子系统协同进化规律，构造了考虑子系统间合作与竞争关系的共进化方程；Aljadiri等[5]运用定性访谈和定量问卷的方法，评估了COVID-19对阿联酋多式联运货物运输性能的影响；Ma等[6]运用层次分析法和熵权法，对多式联运的风险因素进行了量化研究，以提高运输过程的合理性和效率；杨磊[7]运用系统工程方法，通过分析多式联运系统各部分的相互关系和整体功能，构建了多式联运绩效评价指标体系；马飞等[8]基于概念模型的随机Petri网模型，通过构建多式联运系统致脆因素影响机理的概念模型，分析了其关键致脆因素；伍佳妮等[9]运用云模型，通过建立“人-机器-管理-环境-运输-对外”六维风险评估标准，对危险品跨境多式联运风险进行了综合评价；崔愿等[10]从效率与公平双重视角对综合交通网评价指标与方法进行了研究，为从网络运行与系统评价层面理解多式联运效率提升提供了方法借鉴。然而，这些方法很难全面捕捉多种服务属性间的复杂交互关系及对MTE提升及协同优化的影响。因此，在多式联运实际场景中，刻画出各种服务属性之间复杂的非线性交互作用是至关重要的。

模糊集定性比较分析(Fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis，fsQCA)是一种基于集合论和布尔代数的研究方法，用于分析多条件组合对结果的影响[11]。相对于传统优化模型，fsQCA方法通过分析条件变量组态与结果变量之间的关系，能够识别影响MTE的多条路径，这些路径可以揭示不同服务属性组合对MTE的影响机制。同时，fsQCA兼具定性和定量2种特征，容许部分从属，能更精确地反映现实环境，有利于从整体上揭示影响MTE效应的主导要素和组态路径。此外在公路货运中已有相关研究探究了基于组态的公路货运路径[12]，但多式联运领域尚缺乏相关研究。

基于此，本研究引入fsQCA方法，旨在构建一个能全面捕捉多式联运多种服务属性间复杂交互关系的研究框架。本研究的意义在于：第一，基于服务属性的多维分析视角，构建了MTE的评价框架，揭示了影响MTE的主要因素及其组态路径；第二，通过fsQCA方法，将定性分析与定量分析相结合，为MTE提升提供了有针对性的决策依据；第三，从系统性与实用性角度出发，为MTE的可持续发展能力提升提供了理论支持和实践启示。

1　基于fsQCA的研究设计

1.1　属性体系构建

通过梳理相关文献，可以初步得到影响MTE的8个服务属性，多式联运下各运输方式的服务属性如表1所示。杨扬等[13]提出最小运输成本是多式联运的基本目标之一，并提出碳排放在当下也是亟需提升的重要方面；梁亚莉等[14]指出多式联运的承

表1　多式联运下各运输方式的服务属性

Tab.1　Service attributes of each transport mode under multimodal transport

服务属性	服务属性缩写	解释	来源
经济性(Economy)	ECO	主要指货物运输的成本效益	杨　扬等[13]
时效性(Timeliness)	TMI	主要指货物运输的时间价值	张健琦[18]
安全性(Safety)	SAF	主要强调货物的完整性，减少损坏	冯芬玲等[16]
便捷性(Convenience)	CON	主要指货物在联运过程中的转换便捷度	Bartulović 等[17]
稳健性(Stability)	STA	主要指货物在有无干扰下的准点情况	伍景琼等[15]
灵活性(Flexibility)	FLE	主要指针对不同客户的个性化服务	王　桦等[19]
承载性(Load)	LOD	强调联运过程中对货物的最大承载量	梁亚莉等[14]
绿色性(Green)	GRE	强调运输过程中对环境影响的最小化	杨　扬等[13]

载能力是制约多式联运发展的障碍因子之一；伍景琼等[15]指出在乌卡时代，多式联运在应对突发事件后的快速恢复能力至关重要；冯芬玲等[16]强调如何高效应对风险，进而保证多式联运货物的损伤达到最小；Bartulović 等[17]指出航空运输参与多式联运，连通性是关键因素，对提升航空物流运输效率有显著效果；张健琦[18]指出货物时间价值日益受到重视，并且已经在实践中有所应用；王桦等[19]指出提供个性灵活的服务，成为货主选择多式联运的基本需求之一。

多式联运效率受到多种服务属性的非线性交互影响，其特征为：等效性，即存在多条属性组合路径均可实现高效；非对称性，即属性存在或者缺失的作用不对称；并发因果，即属性效应依赖于其他属性状态，传统线性方法(如回归)假设变量独立且效应对称，难以捕捉此类复杂关系。

1.2　fsQCA设计

1.2.1　案例选择与数据校准

本研究选取以上8个服务属性，通过线上与线下相结合的方式，邀请30位领域内专家，包括15位高校科研机构教师、10位物流企业从业人员以及5位政府交通部门管理者，对条件变量及结果变量进行打分。打分原则为：若专家认为该服务属性对MTE产生的影响越大，则对该服务属性的打分越高，反之越小，最后对现有的多式联运运输体系进行打分，分数越高，则表明对该体系的认可度越高，打分制为百分制0~100。

专家打分统计表如表2所示，结果表明各变量平均值在0.429(GRE)到0.582(CON)之间，标准差在0.294(MTE)到0.365(LOD)之间。其中，CON平均得分最高，表明专家普遍认为CON对MTE影响较大；而GRE平均得分最低，说明专家对其重要性评价相对较低。MTE的标准差最小，表明专家对其打分较为一致。各条件变量与MTE的相关性分析显示，相关系数在0.456(GRE)到0.723(STA)之间，STA与MTE的相关性最高，影响显著。这些统计特征为后续fsQCA分析提供了数据基础，有助于深入探究MTE的复杂交互关系和组态路径。

表2　专家打分统计表

Tab.2　Statistical table of expert scores

变量名称	平均值	标准差
ECO	0.529	0.324
TMI	0.492	0.360
SAF	0.515	0.346
CON	0.528	0.347
STA	0.473	0.343
FLE	0.486	0.345
LOD	0.502	0.365
GRE	0.493	0.328
MTE	0.516	0.294

本研究的前因和结果变量都是用百分表来衡量的，所以不能把案例中的前因变量直接赋给0或者1，而模糊集合的值可以被标定成0~1的数值，表示在该集合中的隶属程度。参考Fiss的研究，选取“0.95，0.5，0.05”作为3个锚点的阈值，其中“0.95”代表完全隶属、“0.5”代表交叉点、“0.05”代表完全不隶属[20]。变量的赋值标准如表3所示，标定参照点的数据都保留了2位数。

1.2.2　必要性分析

必要性分析主要用于对单一变量和结果变量之间的必要条件的判定，以一致性(Consistency)度量，数值为0.0~1.0，公式为

表3　变量的赋值标准

Tab.3　Assignment criteria for variables

变量类型	变量名称	完全隶属指数	交叉点指数	完全不隶属指数
结果变量	MTE	84.76	73.92	65.32
条件变量	ECO	93.00	73.00	51.45
	TMI	99.00	74.50	52.45
	SAF	95.65	71.00	53.00
	CON	95.10	74.50	51.80
	STA	94.65	75.50	50.90
	FLE	69.10	55.00	31.45
	LOD	66.00	47.00	31.00
	GRE	98.55	81.00	53.90

$$\text{Consistency}(X_i \leqslant Y_i) \leqslant \sum \min(X_i,\ Y_i) / \sum (X_i) \quad (1)$$

式中：X_i为条件变量中的隶属分数；Y_i为结果中的隶属分数。若某个条件变量一致性指标≥0.9，则证明单个条件变量与结果变量间存在必要条件关系[11]。

必要性分析完成后，计算覆盖率(Coverage)，判断该变量X_i对结果变量Y_i的解释力，覆盖率为0.0~1.0，公式为

$$\text{Coverage}(X_i \leqslant Y_i) = \sum \min(X_i,\ Y_i) / \sum (Y_i) \quad (2)$$

式中：X_i的集合是达到Y_i集合的单一路径的概率，覆盖值越高，则解释越强。

在进行组态分析前，需先对各前因条件变量进行必要性分析，以验证前因条件变量对结果产生的必要条件。若单个变量的一致性阈值超过0.9，则该条件变量是必要条件。必要条件分析结果如表4所示，结果表明，所有前因变量的一致性最大值为0.766，最小值为0.522，均低于0.9，说明MTE是由多属性共同影响的，需进行条件组态分析。

1.2.3　组态路径分析

通过对前因变量进行标准化分析，得到了复杂解、简约解和中间解。在此基础上，将利用中间解，辅以简约解来识别核心和边缘条件。其主要依据在于中间解能够保留较为丰富的组态信息，反映条件变量之间的复杂组合关系，而简约解则通过简化条件组合，更清晰地辨别出对结果具有关键影响的核心条件和相对次要的边缘条件。这种区分方式有助于揭示MTE形成过程中不同条件变量的相对重要性和作用机制，既能体现多条件协同作用的复杂性，又能突出关键因素。其中，核心条件是对结果发生具有较强影响的、同时也是次要作用发生的前提，通常出现在两解中，而边缘条件通常仅出现在中间解中[21]。●和⊗分别表示核心条件有无，·和×分别表示边缘条件有无，空白表示条件可能有或者无。

表4　必要条件分析结果

Tab.4　Results of necessity analysis

前因变量	一致性(Consistency)	覆盖率(Coverage)
ECO	0.752	0.733
~ECO	0.545	0.597
TMI	0.718	0.755
~TMI	0.543	0.551
SAF	0.708	0.709
~SAF	0.552	0.587
CON	0.766	0.748
~CON	0.529	0.578
STA	0.714	0.780
~STA	0.557	0.545
FLE	0.605	0.642
~FLE	0.632	0.635
LOD	0.737	0.758
~LOD	0.522	0.540
GRE	0.696	0.728
~GRE	0.621	0.632

注：~代表该前因条件的缺失(即该条件的非存在状态)。

MTE的组态如表5所示，结果表明，有6种条件组态对MTE生成有影响，各组态的一致性分别为0.767，0.984，0.987，0.996，0.945，0.996，整体一致性为0.820，表明6个组态对MTE的产生具有很大的解释作用。组合整体覆盖度为0.722，表明该模型的结果可以解释72.2%的样本，符合研究要求。

1.3　核心与边缘属性划分标准

简约解通过最小化条件集来区分核心条件与非核心条件，得到的结果如下。核心条件：ECO，TMI，SAF；边缘条件：CON，STA，GRE，FLE，LOD。

简约解进一步确认了ECO，TMI和SAF作为核心条件的有效性。这3项条件在所有组态中均被标记为主导因素，说明它们是决定多式联运系统表现的关键驱动力。边缘条件(如CON，STA，GRE，FLE，LOD)的作用在简约解中较弱，表现在：即使它们缺失或作用较低，核心条件的存在依然能够保证系统表现。但在部分组态中，某些边缘条件(如STA和GRE)的正向表现可以显著改善结果，说明边缘条件对结果具有次要的辅助作用。

表5　MTE的组态

Tab.5　Configurations of MTE

前因变量	1	2	3	4	5	6
ECO	●	●	●	·	⊗	⊗
TMI	●	●	●	●	●	●
SAF	●	●	●	●	●	●
CON	⊗	⊗	●	⊗	·	⊗
STA	·	●	⊗	●	●	●
FLE	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
LOD	⊗	⊗	●	⊗	⊗	●
GRE	·	⊗	⊗	·	·	⊗
一致性	0.767	0.984	0.987	0.996	0.945	0.996
原始覆盖度	0.204	0.204	0.245	0.174	0.202	0.154
总体覆盖性	0.722					
总体一致性	0.820					

综上，简约解验证了中间解的发现，即核心条件的存在是多式联运高表现的前提，而边缘条件在不同场景下可以通过补充核心条件的不足来增强系统整体表现。

通过中间解和简约解的结合分析，可以得出以下结论。核心条件(ECO，TMI，SAF)是多式联运系统表现的决定性因素，其正向作用直接影响系统的综合评价。边缘条件(如CON，STA，GRE)在部分情境下可以对核心条件起到辅助作用，但其重要性依赖于核心条件的基础。

2　组态路径分析

基于1.2.3得到的6个组态路径，进一步深入解读这些路径的特征与形成机制。首先识别并可视化主要的高效路径模式，然后剖析核心条件(ECO，TMI，SAF)的主导作用，最后探讨边缘条件(CON，STA，GRE，FLE，LOD)的情境化补充机制。这里指出，核心条件是决定效率底线的必要条件，缺失将导致系统失效；边缘条件效率的强化或者补偿因子，仅在核心完备时起辅助作用，是充分性条件，从而形成“核心失效→系统崩溃，边缘失效→效率降级”的非对称依赖。

2.1　高效路径识别

通过对6个组态的核心条件组合模式及其对边缘条件依赖性的分析，提炼出3条典型的高效多式联运路径模式，多式联运高效路径模式雷达图如图1所示。

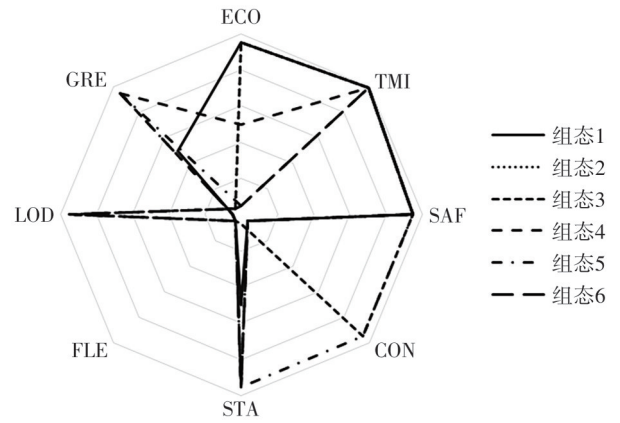

图1　多式联运高效路径模式雷达图

Fig.1　Radar diagram of efficient multimodal transport path patterns

路径1：核心基础保障型(对应组态1，2)。该路径的核心特征是强ECO+强TMI+强SAF的稳固组合。在此基础之上，CON，FLE，LOD，GRE等边缘条件普遍缺失或仅部分存在。该路径表明，只要牢牢抓住成本控制、时效达成和货物安全这3个核心要素，即使在其他服务属性上表现一般甚至有所欠缺，多式联运系统仍然能够实现较高效率。这突显了核心三要素作为MTE基石的基础保障作用，尤其适用于资源有限或对非核心属性要求不高的标准化运输场景。

路径2：核心+操作强化型(对应组态3)。该路径在强ECO+强TMI+强SAF这一核心基础上，显著强化了CON和LOD。便捷性的提升优化了运输过程中的衔接转换效率，LOD的增强则带来了显著的规模经济效益。该路径表明，在核心基础稳固的前提下，着力提升货物转运的便捷程度和系统的整体运载能力，能够进一步释放多式联运的效率潜力，形成强大的协同效应。这种路径适用于追求供应链效率、货量大且对流程顺畅性要求高的客户，如大型制造业和零售业。

路径3：稳健/绿色补偿型(对应组态4，5，6)。该路径的核心特征是ECO的弱化或缺失，但强TMI和强SAF仍然不可或缺。为了弥补ECO不足带来的潜在MTE损失，强STA成为关键的补偿因素，确保运输计划的可靠执行。同时，GRE或LOD也发挥了重要的补充作用。该路径表明，当成本并非首要考量的时候，如运输高附加值、易损或对环保有严苛要求的货物，通过提供超高的可靠性和时效保障(强STA+TMI)，并叠加环保优势(强GRE)或规模

效应(强LOD)，同样可以构建高效率的多式联运解决方案。例如，高端电子产品、生物医药或有较高碳中和需求的企业。

2.2　核心条件的主导机制

分析表明，ECO，TMI和SAF作为核心条件，在MTE形成中发挥不可替代的主导作用，其机制体现为以下4方面。

（1）基础必要性。在全部6个高效组态中，TMI和SAF始终以强存在状态(●)构成高效率的必要条件；ECO除在稳健/绿色补偿型路径(组态4，5，6)中允许弱化外，在其他组态中均强存在(●)。这与1.2.2必要性分析结果一致：三者构成的组合是MTE的基石，共同满足货物运输的基础需求——以合理成本(ECO)、按时送达(TMI)、安全无损(SAF)完成运输。缺少其中任何一项(尤其TMI与SAF)，MTE将显著降低。

（2）效率支撑性。核心基础保障型路径(组态1，2)证明，当ECO，TMI，SAF均达到较高水平时，即使CON，FLE，LOD，GRE等边缘条件表现较弱或缺失，系统仍能实现较高效率。这表明在资源受限或标准化运输场景中，优先保障核心三要素的卓越表现，是维持MTE的关键策略。

（3）协同增效性。在核心+操作强化型路径(组态3)中，强化的CON与LOD能显著提升MTE，但这一效果高度依赖核心条件的基础支撑。若缺乏强ECO，TMI，SAF的协同保障，CON和LOD的提升可能因成本失控、时效延误或货损增加而无法转化为实际效率增益，甚至导致负面效果。

（4）价值稳定性。在稳健/绿色补偿型路径(组态4，5，6)中，尽管ECO作用弱化，但TMI与SAF仍是客户价值诉求的核心。此类场景下，如高附加值货物运输，客户可能接受较高成本以换取时效与安全的保障，此时MTE的实现直接依赖于TMI与SAF的稳定表现。核心条件定义了多式联运服务最根本的价值维度。

2.3　边缘条件的情境化补充机制

fsQCA结果清晰确立了ECO，TMI和SAF作为影响MTE的核心条件。然而，组态路径的多样性(特别是组态3至6)表明，边缘条件(CON，STA，GRE，LOD，FLE)并非无关紧要，它们在特定情境下通过动态协同机制对MTE产生关键补充作用。这种作用具有显著的情境依赖性，主要围绕核心条件的表现状态展开，形成“核心–边缘”协同框架。具体表现为3种核心机制。

2.3.1　补偿性协同机制：弥补核心短板，维持效率基准

当核心条件中的ECO表现不足或缺失时(对应于组态4，5，6)，STA的核心补偿为：在ECO缺失的所有高效组态(组态4，5，6)中，STA均以强存在(●)状态出现。这表明高STA是弥补ECO不足的首要补偿机制。其作用在于：通过确保较高的运输计划执行率和抗干扰能力(强STA)，STA承诺时效的兑现，并降低因延误或不确定性产生的隐性成本，从而抵消单位运输成本较高对整体MTE的负面影响，维持多式联运系统的有效运行。GRE或LOD的差异化补偿为：在ECO缺失的路径中，GRE(组态4，5)或LOD(组态6)常作为正向补充因素。强GRE为：通过满足严格的环保法规(如碳关税)或高价值客户的ESG偏好，提供“绿色溢价”或市场准入优势，补偿ECO劣势。强LOD为：通过大规模运输带来的规模效应，摊薄单位货物的固定成本和潜在风险成本，或在ECO缺失时保障关键运力供给，间接缓解货物的单位成本压力。

例如，敦豪(DHL，Dalsey，Hillblom and Lynn)在运输高端精密仪器时，即使运费较高(弱ECO)，也通过提供高可靠性和抗干扰能力的运输计划(强STA)，确保货物按时送达，并附加碳中和运输服务(强GRE)，从而维持了高效率。这种机制揭示了“属性间功能替代”的非线性关系，挑战了“成本高必然效率低”的线性假设，证明当核心基础(ECO)存在短板时，系统可通过激活特定的边缘属性(STA为核心，GRE/LOD为辅助)提供替代性价值流，共同维持MTE的稳定性。

2.3.2　强化性协同机制：放大核心优势，提升效率层级

当核心三要素(特别是ECO)表现强劲时(对应于组态3)，CON与LOD的效率放大器为：在强ECO+TMI+SAF的稳固基础上(组态3)，强CON和强LOD共同发挥“效率放大器”作用。强CON为：通过优化节点衔接，显著降低货物在途等待时间、操作

成本和出错风险，将核心的TMI和ECO优势从单一运输段贯通至“门到门”全链条，发挥多式联运的一体化效能。强LOD为：利用规模效应进一步摊薄单位成本(强化ECO)，并通过更稳定、高频次的班列/航线来提升整体网络的时效可靠性(间接强化TMI/STA)。

该路径尤其适用于大型制造业供应链场景，例如面向汽车制造企业的零部件准时制配送。在这类场景中，需在满足核心成本、时效、安全的基础上，提供“一站式”无缝转运方案和整合多供应商货物的大规模运输能力，能显著减少供应链库存、加快周转、降低综合物流成本。CON和LOD是MTE从“达标”跃升至“卓越”的关键。

例如，中国远洋海运集团有限公司(COSCO SHIPPING)在为汽车制造商提供零部件“准时制生产”配送时，在满足ECO，TMI和SAF的基础上，通过优化节点衔接和利用大规模运输能力，显著降低了供应链库存和综合物流成本。这种机制体现了“属性间功能互补与放大”的非线性协同效应，核心条件提供坚实基础平台，特定边缘属性(CON，LOD)在此平台上产生“1+1>2”的效果，将MTE从“高效”推升至“更加高效”。

2.3.3　抑制性作用机制：个性化服务需求与标准化运营效率之间的结构性约束

在追求以规模化、稳定性、成本控制为核心的MTE目标时(对应于所有高效组态1—6)，MTE目标与运营模式的根本冲突为：FLE的核心是提供高度个性化、定制化的服务(如特殊路线、按需装卸、弹性交付窗口)，这与实现高MTE所依赖的标准化流程、规模经济效应和标准的网络规划存在内在冲突。高MTE运营要求流程统一、资源集约(如固定班列、批量转运)。个性化服务需分散资源应对碎片化需求，增加操作复杂性和协调成本，削弱规模效应，冲击ECO基础。高MTE依赖高可靠性和计划性(STA，TMI)。为满足灵活需求(如临时改线、加急处理)，需预留冗余运力或打乱既定计划，增加不确定性风险和时间延误，破坏稳健性(STA)。个性化服务通常伴随更高成本(人力、设备、管理)。在资源总量约束下，投入个性化服务意味着挤占对核心条件(ECO，TMI，SAF)或关键补充条件(STA，CON，LOD)的投入，难以通过溢价完全覆盖增量成本，最终损害整体MTE。fsQCA组态结果显示为：在所有6个路径组态中，FLE均以缺失(⊗)状态存在。这表明，在当前研究的MTE效率框架(聚焦客观、可量化的成本、时间、可靠性、吞吐量)下，追求FLE与实现普遍高效率存在不可调和的矛盾。高效系统主动“抑制”或“舍弃”了高度个性化的服务模式。

大型电商自建多式联运网络(强需求：ECO，TMI，STA，LOD)为实现更高成本和次日/隔日达，采用高度标准化、高频次、大承载量的固定班列/航线。例如，京东物流在电商配送中，为了实现次日达和成本控制，采用了高度标准化的运输网络和大规模运输计划。在此模式下，对于特殊温控、指定时段送达、个性化装卸等差异化需求，京东物流并非完全拒绝承接，而是往往通过专门业务单元或差异化服务产品进行隔离处理，以避免对骨干网络的标准化运行造成干扰。由此可见，高度个性化服务若直接嵌入主干高效网络，容易增加计划扰动、抬升协调成本并削弱规模效应。

总的来说，边缘条件通过情境依赖、非线性的动态协同机制参与效率构建。在ECO弱化时，STA作为核心补偿者，辅以GRE/LOD提供差异化价值；在ECO强劲时，CON和LOD作为效率放大器来强化核心优势。FLE在所有路径中的系统性缺失，表明高度个性化服务并不是实现多式联运高效率的优先驱动因素，确立了其“最边缘”地位。该框架为多式联运运营商提供了资源配置和效率优化路径选择的理论与实践依据。

3　稳健性检验与政策建议

3.1　稳健性检验

为确保研究结论的可靠性，本研究进行了系统的稳健性检验。通过将组态路径的一致性阈值从0.80提升至0.85(频数阈值保持为1)，分析发现6条组态路径的构成与解释力均未发生变化，核心条件(ECO，TMI，SAF)的主导作用及边缘条件的协同机制保持稳定。进一步调整变量校准锚点(±5%)和随机剔除20%样本的敏感性测试中，组态路径的总体一致性(0.820→0.843)与覆盖度(0.722→0.720)波动幅度均小于3%，表明ECO-TMI-SAF为核心的效率路

径具有强稳健性，服务属性间的非线性关系不受参数微调影响。

3.2　政策建议

基于“核心-边缘”协同框架的实证发现，本研究提出分层政策建议。第一，政府层面需强化核心属性基础建设：设立多式联运枢纽专项基金，优先支持提升TMI与SAF的智能设施(如自动化分拨中心、全程温控系统)，并通过绿色补贴降低环保技术对ECO的冲击(呼应组态4，5的GRE补偿机制)；同时分类制定行业标准，对大宗货物强制要求STA达标(准点率≥95%)，对高附加值货物推行“绿色通道”认证以激励STA+GRE补偿路径(组态4，5)的应用。第二，企业层面应动态配置资源：在成本敏感型市场(如农产品干线)，优先保障ECO-TMI-SAF核心三角并抑制FLE投入(组态1)；运输高附加值货物(如精密仪器)时，重点强化STA+GRE组合补偿弱化ECO的短板(组态4)；服务大型制造业供应链(如汽车零部件JIT)则需追加CON与LOD投入以放大核心优势(组态3)。尤其需规避效率抑制陷阱，通过设立独立柔性单元(如航空特货专线)隔离高度个性化服务对主干网络标准化效率的影响(组态1—6的抑制机制)。第三，行业协会应搭建协同平台：建立多式联运属性效能数据库量化组态路径增益，并推动制定运输准点与低碳标杆标准。

4　结论

本研究通过fsQCA方法系统揭示了多式联运效率形成的非线性机制，主要理论贡献在于提出了“核心-边缘”层级化协同框架。该框架具体包括核心、边缘补充和抑制3层机制，有助于突破传统线性模型的局限。①核心层中，经济性、时效性、安全性作为多式联运效率的基石，三者组合在83.3%的高效案例中强存在(组态1，2，3)，其缺失需边缘属性强力补偿(组态4，5，6)。②边缘补充层呈现情境依赖性，当经济性弱化时，稳健性发挥核心补偿作用，绿色性或承载性提供差异化价值(补偿性协同，组态4，5，6)，当经济性强劲时，便捷性与承载性则充当效率放大器(强化性协同，组态3)。③抑制层揭示了灵活性与标准化效率目标的根本冲突，其在100%高效路径中被系统性抑制(组态1—6)，需通过资源隔离策略化解张力。

研究同时发现3条等效高效路径。①核心基础保障型(组态1，2)以经济性-时效性-安全性三角支撑效率，适用于资源受限场景。②核心+操作强化型(组态3)通过便捷性+承载性提升全链路贯通能力，服务精益供应链市场。③稳健/绿色补偿型(组态4，5，6)以安全性补偿经济性短板，绿色性/承载性提供附加值，适配高溢价市场。

方法论上，验证了fsQCA捕捉服务属性非线性交互的优势；实践层面则提出“路径匹配-资源动态配置”决策模型，指导企业依据核心条件状态选择边缘投入组合，避免“一刀切”优化陷阱。未来研究可结合纵向案例追踪组态路径演化，并深化灵活性在“客户价值效率”维度中的作用，推动运营效率与市场效率的整合研究。此外还可以基于组态分析，进一步探索多式联运中不同运输方式的衔接优化，尤其是航空物流临界运距的动态变化，这将对多式联运效率的提升起到关键的决策支持作用。

参考文献：

[1] 沈丹阳，李昕泽．多式联运运行机制、发展模式及演化趋势：基于SCI、北大核心和CSSCI来源期刊的分析(2013—2023)[J]．铁道运输与经济，2024，46(11)：96-105.
SHEN Danyang，LI Xinze. Multimodal Transport Operation Mechanism，Development Mode and Evolution Trend：Analysis Based on SCI，Peking University Core and CSSCI Source Journals(2013—2023)[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(11)：96-105.

[2] 吴华稳．面向“一带一路”的多式联运发展研究综述[J]．铁路物流，2025，43(7)：48-53.
WU Huawen. Research Review on Multimodal Transport Development in Context of “Belt and Road Initiative”[J]. Railway Logistics，2025，43(7)：48-53.

[3] HAN B，WAN M，ZHOU Y. Evaluation of Multimodal Transport in China Based on Hesitation Fuzzy Multiattribute Decision-Making[J]. Mathematical Problems in Engineering，2020，2020(1)：1823068.

[4] FENG F L，ZHANG Q Y. Multimodal Transport System Coevolution Model Based on Synergetic Theory[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society，2015，2015(1)：108926.

[5] ALJADIRI R，SUNDARAKANI B，EL BARACHI M. Evaluating the Impact of COVID-19 on Multimodal Cargo Transport Performance：A Mixed-Method Study in the UAE

Context[J]. Sustainability，2023，15(22)：15703.

[6] MA Z L，JIA Z J. Quantitative Risk Research of Multimodal Transport of Goods[C]//Conference on Web Based Business Management 2010. Conference on Web Based Business Management 2010：Volume 1 of 2. Chengdu，China：Scientific Research Publishing，2010：495-499.

[7] 杨　磊. 基于系统工程的多式联运绩效评价指标体系构建研究[J]. 铁道运输与经济，2019，41(8)：64-67，76.
YANG Lei. A Study on the Construction of Performance Evaluation Index System for Multi-Modal Transportation Based on System Engineering[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(8)：64-67，76.

[8] 马　飞，刘彪意，任　玮，等. 基于随机Petri网的多式联运系统致脆因素影响机理研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(8)：113-120，168.
MA Fei，LIU Biaoyi，REN Wei，et al. Influence Mechanism of Embrittlement Factors in Multimodal Freight Transport System Based on Stochastic Petri Net[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(8)：113-120，168.

[9] 伍佳妮，侯　晶，石家豪，等. 基于云模型的危险品跨境多式联运风险评价[J]. 科学技术与工程，2024，24(36)：15736-15742.
WU Jiani，HOU Jing，SHI Jiahao，et al. Risk Assessment of Cross-Border Multimodal Transportation of Dangerous Goods Based on Cloud Model[J]. Science Technology and Engineering，2024，24(36)：15736-15742.

[10] 崔　愿，陈　璟，孙相军. 基于效率和公平的区域协调发展战略下综合交通网评价指标和方法研究[J]. 铁路物流，2026，44(1)：44-51.
CUI Yuan，CHEN Jing，SUN Xiangjun. Evaluation Indicators and Methods of Integrated Transportation Network under Regional Coordinated Development Strategy Based on Efficiency and Fairness[J]. Railway Logistics，2026，44(1)：44-51.

[11] 赖　丹，罗　翔. 创新政策与企业能力驱动稀土产业链延伸的组态路径研究：基于模糊集定性比较分析(fsQCA)方法[J]. 科学决策，2022(10)：48-67.
LAI Dan，LUO Xiang. Research on Configuration Path of Rare Earth Industry Chain Extension Driven by Innovation Policy and Enterprise Capability：Based on Fuzzy Set Qualitative Comparative Analysis Method[J]. Scientific Decision-Making，2022(10)：48-67.

[12] 张　丽，于佳俪. 组态视角下我国公路货运高效发展的路径探究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(1)：55-62.
ZHANG Li，YU Jiali. Exploration of Efficient Development Path for Road Freight Transport in China from the Perspective of Configuration[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(1)：55-62.

[13] 杨　扬，李广远. 考虑风险和碳排放因素的集装箱多式联运路径选择[J]. 管理工程师，2024，29(1)：5-13.
YANG Yang，LI Guangyuan. Study on the Selection of Intermodal Container Routes Considering Risk and Carbon Emissions[J]. Management Engineer，2024，29(1)：5-13.

[14] 梁亚莉，段倩倩，张文燕，等. 基于改进熵权-突变级数方法的多式联运承载力评价研究[J]. 水道港口，2023，44(6)：985-992.
LIANG Yali，DUAN Qianqian，ZHANG Wenyan，et al. Evaluation of Multimodal Transportation Carrying Capacity Based on Improved Entropy-Catastrophe Progression Method[J]. Journal of Waterway and Harbor，2023，44(6)：985-992.

[15] 伍景琼，张　旭，苏　娜，等. 多式联运可靠性测度研究[J]. 公路交通科技，2022，39(4)：173-183，190.
WU Jingqiong，ZHANG Xu，SU Na，et al. Study on Reliability Measurement of Multimodal Transport[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2022，39(4)：173-183，190.

[16] 冯芬玲，孔祥光，吴庆芳. 考虑风险的国际集装箱多式联运路径选择研究[J]. 铁道科学与工程学报，2021，18(10)：2761-2768.
FENG Fenling，KONG Xiangguang，WU Qingfang. Research on the Route Selection of International Container Multimodal Transportation Considering Risk[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2021，18(10)：2761-2768.

[17] BARTULOVIĆ D，ABRAMOVIĆ B，BRNJAC N，et al. Role of Air Freight Transport in Intermodal Supply Chains[J]. Transportation Research Procedia，2022，64：119-127.

[18] 张健琦. 货物运输时间价值理论在国际多式联运产品设计中的应用[J]. 中国铁路，2011(12)：17-19.

[19] 王　桦，李富昌. 云南跨境物流多式联运障碍因素与对策分析[J]. 资源开发与市场，2015，31(12)：1490-1493.
WANG Hua，LI Fuchang. Analysis on Obstacles and Solutions of Cross- Border Logistics International Intermodal in Yunnan[J]. Resource Development & Market，2015，31(12)：1490-1493.

[20] FISS P C. Building Better Causal Theories：A Fuzzy Set Approach to Typologies in Organization Research[J]. The Academy of Management Journal，2011，54(2)：393-420.

[21] 王元明，胡安然. 河南省农村居民低碳能源消费行为影响因素探析：基于模糊集定性比较分析方法[J]. 乡村科技，2024，15(1)：41-44.

(责任编辑　魏　然)