文章编号：1003-1421(2026)03-0018-13
引用格式：刘帆洨，鲁工圆，黄华清，等. 多式联运低碳路径选择优化研究综述[J]. 铁道运输与经济，2026，48(3)：18-30.
LIU Fanxiao，LU Gongyuan，HUANG Huaqing，et al. A Review of Low-Carbon Route Optimization in Multimodal Transport[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：18-30.

多式联运低碳路径选择优化研究综述

刘帆洨[1,2]，鲁工圆[1,3]，黄华清[4]，张晓梅[1]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都 611756；2.西南交通大学 运营安全保障铁路行业工程研究中心，四川 成都 611756；3.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都 611756；4.中国铁路成都局集团有限公司 客运部，四川 成都 610095)

摘 要：低碳路径选择对多式联运提质增效、提升经济与环境效益、推进绿色物流发展具有重要作用。立足我国“双碳”战略与环境因素，阐述多式联运路径选择的发展现状及低碳转型的需求与趋势。使用CiteSpace对多式联运相关研究进行统计分析，明确该领域研究热点，梳理强关联关键词在不同发展阶段的分布特征，总结既有研究的核心问题及研究脉络。结合当下政策、技术背景与多式联运作业特征，探析多式联运发展亟待解决的关键问题，从动态路径选择、智能化协同调度、枢纽节点低碳生命周期评价3个维度剖析低碳路径选择的核心研究方向。最后从运输全过程智能化管理、供应链协同与韧性优化、多运输方式政策协同与标准统一3个层面，提出多式联运低碳发展的展望。

关键词：多式联运；低碳路径；路径优化；绿色物流；多主体协同
中图分类号：U15 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250911005

A Review of Low-Carbon Route Optimization in Multimodal Transport

LIU Fanxiao[1,2]，LU Gongyuan[1,3]，HUANG Huaqing[4]，ZHANG Xiaomei[1]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. Engineering Research Center of Railway Industry of Operation Safety Assurance, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 4. Passenger Transport Department, China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610095, Sichuan, China)

Abstract: Low-carbon route selection plays a crucial role in improving the quality and efficiency of multimodal transport, enhancing its economic and environmental benefits, and fostering the development of green logistics. Grounded in China's carbon peak and carbon neutrality goals and environmental considerations, this paper elaborated on the current state of development in multimodal transport route selection and the imperatives and trends for its low-carbon transition. Utilizing CiteSpace, a statistical analysis of research related to multimodal transport was conducted to identify research hotspots and delineate the distribution characteristics of strongly associated keywords across different developmental stages, thereby summarizing the core issues and research evolution in existing studies. Considering the current policy and technological landscape alongside the operational characteristics of multimodal transport, this paper explored key challenges requiring

收稿日期：2025-09-11 **修订日期**：2026-02-15
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52272324)

resolution in the field's development. It analyzed the core research directions for low-carbon route selection from three dimensions: dynamic path selection, intelligent collaborative scheduling, and low-carbon lifecycle assessment of hub nodes. Finally, prospects for the low-carbon development of multimodal transport were proposed from three aspects: intelligent management of the entire transportation process, supply chain collaboration and resilience optimization, and policy coordination and standardization across multiple transport modes.

Keywords: Multimodal Transport; Low-Carbon Route; Route Optimization; Green Logistics; Multi-Agent Collaboration

0　引言

随着全球气候变化问题的日益严重，绿色低碳成为全球运输和物流行业发展的重要方向。多式联运是现代物流系统的关键组成部分，其在优化运输网络结构和提高供应链效能方面具有不可替代的作用[1]。作为整合多种运输方式的系统性解决方案，多式联运不仅能够提升物流运作效率，还能显著降低整体运输成本。此外，多式联运路径选择直接影响运输过程中的碳排放水平。研究表明，科学合理的路径选择可以系统性降低物流活动的能源消耗，实现15%~40%的碳减排效果，这使其成为推动物流行业低碳转型的重要技术路径，对全球气候治理目标的实现具有重要贡献[2]。

在我国“双碳”背景下，交通运输领域的节能减排具有重要的战略意义。《2030年前碳达峰行动方案》《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等政策文件明确提出，要通过优化运输结构、发展多式联运和推进运输组织方式低碳化，构建绿色高效的综合交通运输体系。同时，《“十四五”现代物流发展规划》和《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》指出，应通过运输组织优化和路径优化等手段，减少物流活动中的能源消耗与环境污染，实现经济效益与生态效益的协同提升。

多式联运路径选择是指在满足运输需求和运行约束条件下，对不同运输方式及其组合路径进行系统比较与优化决策，以实现运输成本、运输时间、资源利用效率及环境影响等多目标协调的过程。近年来，随着信息技术、智能交通系统(Intelligent Transport System，ITS)和大数据分析方法的广泛应用，多式联运路径选择研究不断深化，研究内容逐步从以成本或时间为单一目标，向多目标优化、不确定性条件下决策以及低碳导向的路径优化方向拓展[3]。

国内多式联运路径选择研究近年来取得了显著进展。随着物流行业的快速发展以及政策支持的推动，各类运输方式的协同组织与衔接优化得到了广泛关注[4]。诸多研究围绕多式联运系统的运输效率提升与综合成本优化展开，尤其在货物运输中，基于铁路–公路–水路组合的多式联运路径选择问题日益成为研究重点[5]。近年来，随着ITS和大数据技术的应用，越来越多的研究集中在利用这些技术优化多式联运的路径选择和运输管理[6–7]。然而，国内多式联运的实际应用仍然面临着诸如信息共享难题、运输模式协调不足以及政策法规不完善等问题。

国外多式联运路径选择研究起步较早，相关成果主要集中于欧洲和北美地区[8–9]。欧洲在跨国货物运输多式联运体系构建方面，已形成较为完善的技术支撑与政策协调机制，为多式联运路径选择模型与方法的研究提供了良好的应用基础。近年来，随着物联网、人工智能及自动化运输技术的广泛应用，多式联运路径选择研究逐步由传统的成本或时间最优问题，向融合实时信息、动态需求和多目标决策的精细化与智能化方向发展[10–11]。然而，在实际实施过程中，国外多式联运路径选择仍面临诸多制约因素，如不同国家运输法规与政策体系差异显著、运输基础设施发展水平不均衡等，这在一定程度上限制了多式联运路径选择方法与模型在更大范围内的推广与应用。

针对多式联运及低碳物流领域，学者围绕路径优化、政策影响、智能管理及低碳战略等方面展开研究。在多式联运路径优化模型的构建与改进方面，李玉民等[12]在综合考虑运输时间、运输费用与碳排放的基础上，提出中欧集装箱多式联运的多目标优化模型；李珺等[13]进一步探讨了混合不确定因

素服从随机分布情境下的绿色多式联运路径优化问题，强调在满足不确定客户需求的同时实现运输成本的降低；张旭等[14]同时考虑需求与碳交易价格的双重不确定性，构建混合鲁棒随机优化模型；吴雅搏等[15]从智能化管理与环保运输工具角度出发，分析多种运输方式及换装过程中的碳排放；王彦等[16]针对冷藏集装箱转运时间不确定性问题，建立兼顾总成本最小化与时间效率最大化的多目标模型，为冷链企业路径选择提供了科学的决策支持；Li等[17]引入考虑需求变化与碳交易价格的鲁棒随机优化模型，在低碳原则的前提下，实现运输成本的最优控制；Derpich等[18]面向地理条件复杂区域，提出集中负荷优化方法，将铁路与海运等低碳运输方式进行整合，验证了通过运输结构调整可以显著降低碳排放。

在低碳战略与行业应用的实践价值方面，Li等[19]强调低碳物流战略在多式联运企业中的重要性，并从技术、管理与市场导向3个方面提出了具体建议；Ocicka[20]探讨运输模式转变在推动低碳发展中的潜力，强调其对行业特定场景的重要意义；魏海蕊等[21]基于中欧集装箱多式联运物流碳排放量测算，提出不同地理区位的物流需求选择恰当的联运方式，优化运输结构并积极促进铁海联运链建设，以及通过改进及改造不同运输方式可显著提升碳减排效果。

综上，国内外围绕多目标优化模型的构建与应用实践、低碳战略与行业特定应用等针对多式联运路径选择的研究表明，通过合理规划路径，能够显著减少碳排放和能源消耗，提高运输效率，降低成本。新需求下，多式联运的路径选择需要从政策层为物流系统的高效、绿色提供保障；从技术层为物流资源合理配置、技术低碳化、智能化转型提供支持；从市场层为促进物流作业更加灵活、环保创造条件，成为贯穿“技术-政策-市场”三大要素的核心纽带。未来研究需进一步突破信息共享、跨区域协调等现存瓶颈，推动多式联运路径选择理论与实践在全球范围内的深度融合与优化升级。

1　多式联运路径选择研究发展历程

物流运输需求多元化、环境保护协同化、物流技术智能化以及全球化贸易一体化等因素推动着多式联运路径选择的发展。在多式联运中，运输路径选择不仅要考虑每种运输方式的优缺点，还要考虑不同运输方式间的衔接、货物的转运以及可能的物流瓶颈。由于多式联运路径选择是一个复杂的过程，受成本、时间、网络容量和运营限制等各种因素的影响，研究者通常会根据不同的分析角度选择重要因素来开展研究。

路径选择作为多式联运的重要决策内容，受到了学者的广泛关注[22-23]。从CNKI和Web of Science上检索交通运输领域多式联运优化相关研究，选择2015—2025年约1 000篇文献，导入CiteSpace统计分析。多式联运优化相关研究关键词关系图如图1所示，“路径优化”是关联频率最高的关键词。此外，从图1可看出，与路径优化相关的研究主要涉及集装箱运输、碳排放和各类算法。为了进一步获得多式联运下路径优化的重要研究内容，在此基础上以“多式联运”与“路径优化”为共同关键词，搜索相关文献并使用CiteSpace分析，发现碳排放和低碳运输成为多式联运路径优化关键词，多式联运路径优化关键词关系图如图2所示。



图1　多式联运优化相关研究关键词关系图

Fig.1　Keyword relationship of multimodal transport optimization

针对多式联运，既有研究主要围绕以下3个方面。①不确定条件方面，尹浣青等[6]在考虑模糊需求量和模糊时间窗的基础上，引入梯形模糊数和模糊机会约束规划理论对不确定条件进行清晰化处理。②特定场景方面，Zheng等[24]专注于冷链物流，将准时率和产品质量等客户满意度指标整合到路径选择模型中；Zhou等[25]分析中欧集装箱运输，结合



图2　多式联运路径优化关键词关系图

Fig.2　Keyword relationship of multimodal transport path optimization

转运和虚拟节点构建考虑成本、时间和碳排放的虚拟网络。③模型构建和算法方面，Luo 等[26]开发了基于数据驱动的平衡运输成本和时间成本的多目标模型，集成 Floyd-GA 算法来确定最短路径和跨路线的模式分布；胡自强等[27]针对复杂网络结构与环境下的多式联运网络路径优化与流量分配问题，构建混合整数规划模型用于路径优化与流量分配。可见，既有研究主要聚焦不确定条件清晰化处理、场景应用、多目标优化模型及数据驱动模型构建等。

利用 CiteSpace 分析以多式联运路径选择、碳排放和运输成本作为关键词的相关文献，统计时段为 2015—2025 年，得到低碳多式联运研究关键词时间分布图如图 3 所示。

基于分析结果，关联度最高的研究热点词主要集中在运输效率、资源配置与智能化等方面。其中，运输效率的提升往往伴随着运输组织复杂度增加，并可能引致运输成本上升；资源配置作为多式联运路径选择中的核心决策内容，直接影响不同运输方式之间的运力匹配、路径组合及系统运行效率。与此同时，在需求波动、运行扰动和信息不完备等现实条件下，多式联运路径选择普遍面临显著不确定性，而实现高效率与低碳化目标通常还需在物流成本、碳排放约束与多主体协同决策之间进行综合权衡。基于此，将上述研究热点与多式联运发展需求相结合，可围绕多式联运路径选择这一核心问题，从运输成本与效率权衡、不确定性下路径优化、运力资源动态配置、低碳路径与成本均衡以及多主体协同决策等方面展开系统研究。

2　多式联运路径选择研究问题评述

2.1　运输成本与效率均衡问题

多式联运旨在提升综合运输效率，降低社会物流成本，促进节能减排降碳[28]。然而，协调不同运输方式(包括成本、时间、风险和环境影响在内的各种因素)所固有的复杂性使多式联运发展面临重大挑战。不同运输模式之间的协同效应是优化整体运输成本的基础问题，需要考虑全过程直接费用、运输时间、货物损耗等因素。

多式联运的成本要素包括运输成本、转运成本、库存成本以及潜在的延误罚款[29]。效率通常以运输时间、可靠性和服务频率来衡量。在多式联运

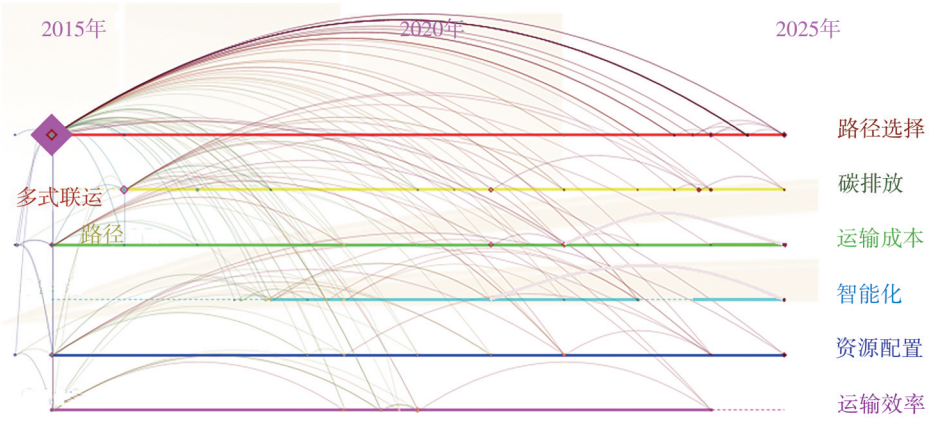

图3　低碳多式联运研究关键词时间分布图

Fig.3　Time distribution of keywords in low-carbon multimodal transport research

系统中，运输时间与运输成本往往呈现权衡关系，同时两者之间也不是简单的线性关系，而具有非线性和阶段性特征[30]。

既有研究主要从以下几个角度开展研究。①从优化模型的角度，通常采用混合整数规划(MIP)、多目标规划、网络流模型等各类规划模型来优化路径，寻求运输成本与效率的均衡。线性规划和动态规划在顺序决策过程中找到运输方式和路线的最佳组合[31]；混合整数规划模型可用于捕获离散决策，选择特定的运输模式或路线、货物量等[32]。②从求解算法角度，多式联运路径问题往往是NP-hard，传统精确算法难以应对大规模实例，现有研究集中在智能算法(遗传算法、粒子群、蚁群算法、禁忌搜索等)和混合启发式/元启发式混合启发式算法。Sun等[33]通过结合不同算法的优势来进一步提高性能，提出一种混合沙猫群优化算法。该研究针对多式联运中各种成本难以衡量和耗时的问题，通过混合嵌入时间窗来计算时间惩罚成本，以反映实际运输特性。Zhang等[34]引入机会约束规划和区间规划，分别构建模糊需求机会约束规划模型和模糊时间区间规划模型，同时设计了一种具有自适应t分布的麻雀搜索算法来求解。

该类问题主要以总成本C、时间成本T最小化为目标函数，根据上述文献基本模型可总结表达为

$$C = \min\left(\sum_{a \in A} C_a + \sum_{k \in K} C_k\right) \tag{1}$$

$$T = \min\left(\sum_{a \in A} t_a + \sum_{k \in K} t_k\right) \tag{2}$$

$$\text{s.t. } g_i(C_a,\ C_k,\ t_a,\ t_k) \leqslant b_i \qquad a \in A;\ k \in K;\ i = 1,\ 2,\ \ldots,\ m \tag{3}$$

式中：C_a为各弧的运输成本，万元；C_k为各节点的转运成本，万元；t_a为各弧的运输时间，h；t_k为各节点的转运时间，h。

两方面目标可单目标形式求解以实现某方面最优化，也可以赋权形式整合为单目标问题。目标函数通常须满足以下约束：流量平衡约束、时间窗约束、容量约束等。

2.2　不确定性下的路径优化问题

多式联运中存在运输时间波动(如天气、港口拥堵、铁路延误)和成本不确定性(燃油价格、费率变动)等问题。同时，运输成本和效率还会受到货物特点及环境的影响，包括：货物的类型价值及其特定要求，站场和枢纽的基础设施可用性和承载能力，法规政策和海关程序，需求、天气、交通等不确定性等。因此，由于多式联运的多衔接需求属性，其不确定性也是多式联运路径选择需要面临的重要问题之一。

在不同场景和不确定性环境条件方面，既有研究主要采用基于鲁棒优化与随机规划的方法提高不确定条件下路径选择的适应性。Liu[35]针对冷链物流中冷藏集装箱多式联运的时间不确定性问题，构建以碳排放成本、运输成本、超时惩罚费用之和最小化为目标的冷链集装箱多式联运路径优化模型。尹浣青等[6]运用梯形模糊数和模糊机会约束规划理论对不确定条件进行清晰化处理，构建考虑周转成本、时间成本和碳排放成本的多式联运路径优化模型。Guo等[36]提出一种多周期采购和多式联运的协同优化策略，建立混合整数规划模型，考虑采购成本随时间和供应商能力的变化而波动，以及运输时间和运输能力不确定性。Li等[17]考虑国家碳排放交易市场正式启动的背景，以及市场环境的变化，需求的不确定性和碳交易价格的随机性，以最小化总运输成本为目标函数，构建集装箱多式联运的鲁棒随机优化模型。

该类问题在不同场景下，目标函数主要涉及运输费用、运输时间或碳排放量，根据上述文献基本模型可总结表示为

$$C = \min f_C\left[c(i,\ j),\ t(\mu(x)),\ q\right] \tag{4}$$

$$T = \min f_T\left[c(i,\ j),\ t(\mu(x)),\ q\right] \tag{5}$$

$$E = \min f_E\left[c(i,\ j),\ t(\mu(x)),\ q\right] \tag{6}$$

$$\text{s.t. } g_k\left(c(i,\ j),\ t(\mu(x)),\ q\right) \leqslant b_k \qquad k = 1,\ 2,\ \cdots,\ m \tag{7}$$

式中：$t(\mu(x))$为隶属度函数为μ的不确定变量(例如时间等)，h；x为运输弧0-1决策变量；c为运输成本，万元；q为货运量，t。

约束通常包含货物运输时间窗相关约束，运输能力和转运能力的上限约束，货运量保持流量平衡和其他转运约束等。

2.3　运力资源动态配置问题

多式联运运力资源配置是指在不同运输方式之间，科学合理地分配运输工具、设备、仓储设施及

人力资源，以确保货物高效、低成本、低碳地完成全程运输。既有研究主要从基于多主体的成本控制、运输动态适应性等方面开展研究。

有效的资源分配对于最大限度地发挥多式联运系统的效益至关重要。供应链的所有企业，包括运输运营商、物流公司和城市规划者，皆与资源优化分配相关联。资源分配的低效会导致瓶颈、成本增加和整体系统性能降低[16]。在多主体、不确定的动态环境下实现合理资源分配，在促进交通多样性的同时有助于运输企业的成本合理化。

既有研究主要就多式联运的各种影响因素提出了一系列改进措施。Chavhan等[37]基于动态环境条件，分析需求波动、意外事件和外部因素等，提出资源分配模型。母柏松[38]从集装箱多式联运的经济性角度出发，分析集装箱多式联运路径选择的影响因素及其相互关系，构建基于Petri网的运输径路优化模型，减少不必要的运力浪费。何维等[39]研究合理配置运输资源和实现各环节间有效协同，基于集装箱运输时空网络，构建以总运营费用最小为目标的混合整数线性规划模型。曹淑迎等[40]通过CiteSpace分析物流资源配置相关文献，从人力资源优化、集群环境资源共享、物流业资源整合和信息化对策等方面入手，提出优化路径选择、人工智能对优化物流企业资源配置、运营成本作用等研究重点。

既有研究针对资源分配相关问题的复杂性和适用性提出了多种方法，主要有优化方法、动态系统仿真分析、智能化技术等[37]。这类研究更注重对实际应用场景条件的考虑，提出的系列模型和求解算法有助于提高资源配置决策准确性，提高运输效率，减少延误。

基于优化载运列车资源，结合装车需求限额分配等指标，目标函数主要涉及以下子目标：运输收益最大Z_R、运量任务完成量最大Z_{task}、各车均衡分配Z_L等，根据上述文献基本模型可总结表示为

$$Z_R = \max \sum_{n \in N} r_n \tag{8}$$

$$Z_{\text{task}} = \max \sum_{n \in N} s_n \tag{9}$$

$$Z_L = \min \sum_{n \in N} \Delta L_n^2 \tag{10}$$

$$\text{s.t. } g_k(r_n,\ s_n,\ L_n) \leqslant b_k \qquad n = 1,\ 2,\ \cdots,\ N;\ k = 1,\ 2,\ \cdots,\ m \tag{11}$$

式中：r_n为各列车的收益值；s_n为各列车运输任务完成量；ΔL_n代表各列车运输量方差，方差越小，分配越均衡。

约束方面主要有装车数量限制、线路瓶颈弧承运能力限制、列车载运能力限制等。

2.4　低碳路径与物流成本均衡问题

随着环境保护需求的增加，多式联运在考虑物流成本和效率的基础上融入低碳的理念，进而实现经济和环境效益的双重优化[41-42]。传统运输通常更依赖公路运输，多式联运通过组合不同的运输方式，可以降低整体能耗和温室气体排放[41]。低碳运输需要新技术、新能源装备等支持，其成本通常高于传统运输。降低物流成本与减少碳排放之间取得均衡，对可持续经济发展至关重要。

多式联运路径的优化通常涉及最小化成本和减少碳排放之间的均衡问题[43]。既有研究主要通过分析不同场景下运输成本、转运成本和时间相关成本等因素，在兼顾经济可行性的基础上提出多式联运解决方案[44]。现有研究主要从市场不确定性、政策分析和战略管理等方面，实现低碳发展和成本效率的均衡，从而推进可持续绿色物流。不确定性方面，Li等[17]通过构建低碳集装箱多式联运的随机优化模型，采用混合烟花算法来增强解决方案的鲁棒性，从而解决需求变化和碳交易价格波动问题。孙岩等[41]以运输成本最小和运输碳排放量最少为优化目标，构建了时间敏感型货物多式联运低碳路径多目标优化模型。政策影响方面，段力伟等[42]在碳交易机制下构建货运量不确定机会约束规划模型，探讨碳配额及分配方式、碳交易价格和不确定需求对货运企业联运方案、成本结构及碳排放量的综合影响。战略管理层面，Li等[43]研究了低碳发展与经济效率之间的关系，利用DEA-Malmquist指数模型分析了武汉等城市的道路货运效率。研究结果表明，低碳举措和货运效率的协同发展对可持续物流规划具备适用性。

模型构建通常以成本最低和碳排放最低为目标，根据上述文献基本模型可表示为

$$C = \min f_C(x_n,\ q_n,\ c_n) \tag{12}$$

$$E = \min f_E(x_n,\ q_n,\ c_n) \tag{13}$$

$$\text{s.t. } g_k(x_n,\ q_n,\ c_n) \leqslant b_k \qquad n = 1,\ 2,\ \cdots,\ N;\ k = 1,\ 2,\ \cdots,\ m \tag{14}$$

式中：q_n为运输弧的货运量，t；c_n为运输弧的运输成本，万元；x_n为运输弧0-1决策变量。

约束条件包括每个节点的抵达时间需要在硬性时间窗范围内、运输总碳排放量的限制、货物在任意节点转运量的最大值、运输子路径中各节点的流入流出等。

2.5　多主体协同问题

在多式联运系统中，运输涉及政府、承运人、港口、物流企业以及货主等多类主体，不同主体的目标差异显著：货主关注运输时效与可靠性，承运人强调运输成本与运力利用率，政府则更注重环境效益与交通可持续性。这种多主体并存格局导致传统以单一成本最小化为目标的路径规划模型难以适用，理论上则主要依靠多目标优化。因此，相关研究不再寻求唯一最优解，而是探索多目标的Pareto最优解集，以寻找效率与成本、经济与环境、个体与系统之间的多维权衡。

多式联运多类主体的运营目标、信息结构与决策机制高度分散，极容易导致系统协同效率低下[45-46]。传统运输调度系统通常更关注单一运输方式的运输时间和成本优化，对多种运输方式之间的协调调度考虑不足[47]。对不同运输方式进行独立的优化调度不利于多运输方式之间信息交互，可能导致空载率高与迂回运输，导致资源空闲、等待时间长、运输延误等问题，这些问题均会导致碳排放增加。

由于各主体间缺乏统一的信息交换标准和实时通信机制，导致调度系统不能快速获取实时数据，容易因各系统信息割裂，形成信息孤岛。多主体协同的核心需求在于突破“信息孤岛”与“利益冲突”[48]。一方面，主体间数据割裂(如货运状态、运力资源)导致转运计划脱节与资源空置；另一方面，责任界定模糊与收益分配失衡抑制合作意愿，阻碍信息交互。

目前，大多数研究主要围绕新系统研发、创新技术和环境因素的考虑等方面，通过利用新技术和新方法打通信息屏障，提升多主体系统协同能力，提高多式联运网络运输效率和自适应性。人工智能和机器学习等先进技术是增强决策过程的主要方法。Patel等[49]引入IDUTC系统，该系统集成了人工神经网络和专家系统，可适应动态环境，提供实时决策支持。多式联运数据的集成技术对运输系统中的有效决策亦是至关重要。虞逸云等[50]研究多式联运系统中各经营人之间的协同决策方式，提出采用交替方向乘子法实现分布式协同决策。何维等[39]综合考虑集装箱干线运输和两端接驳环节，研究集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度的协同优化问题，构建以总运营费用最小为目标的混合整数线性规划模型。陆瑞新等[51]提出一种基于SVR-Kalman滤波的多式联运物流协同配送算法。

根据上述文献，基本模型可总结表示为

$$Z = \min \sum_{n=1}^{N} f_n(x_n,\ y_n) \tag{15}$$

$$\text{s.t. } g_k(x_n,\ y_n) \leqslant b_k \qquad n = 1,\ 2,\ \cdots,\ N;\ k = 1,\ 2,\ \cdots,\ m \tag{16}$$

式中：$f_n(x_n,\ y_n)$为运输弧0-1决策变量x_n与转运方式1决策变量y_n共同决定的广义成本，万元。其约束通常包括货物运输连续性、货物运输最大时间限制、路径的最大货运能力和转运方式约束等。

3　低碳路径选择的重点问题分析

3.1　时空动态条件下的动态路径选择

当前多式联运主要以静态路径选择为主，难以实时调整响应交通状况、天气变化或能源成本波动，导致碳排放居高不下。动态路径选择可以根据环境的动态信息实时对运输路线进行调整，从而避免拥堵、缩短运输时间，减少资源浪费，成为多式联运低碳路径选择的必然趋势。

从功能上看，动态路径选择主要通过多种运输方式主体协同调度来实现；而多主体协调依赖于信息共享与实时决策支持。先进的信息技术(如物联网、大数据分析等)可为实时数据共享和决策提供支持，提高运输过程的灵活性和高效性，促进不同主体之间的协调与合作。主要聚焦在以下4个方面，动态路径选择研究内容关系如图4所示。

（1）运输结构调整。运输结构直接决定着运输线路在途的碳排放，动态规划路径可灵活选择低碳的运输方式，如优先使用铁路运输而非公路运输，减少不必要的空载运输。

（2）枢纽节点选择。通过实时评估运输路线的能源效率，选择最节能、低碳的绿色物流线路。开展枢纽节点碳排放生命周期评估，合理的枢纽选择

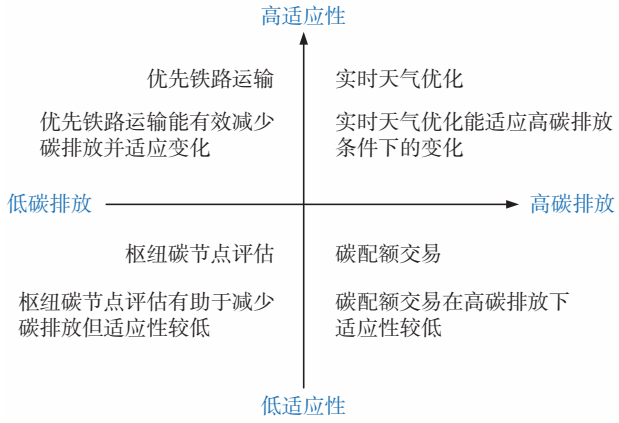

图4　动态路径选择研究内容关系图

Fig.4　Dynamic path planning research content

可以确保货物在多种运输方式之间流转顺畅，减少中转时的能源消耗。此外，动态规划应尽可能确保在途低碳排放的同时，考虑枢纽运输瓶颈，平衡枢纽负荷，进一步降低整体运输过程中的碳排放。

（3）适应不确定因素变化。气候变化、天气等因素会影响运输效率和碳排放，动态路径选择需根据这些信息，适时优化运输路径，以避免天气条件等因素带来碳排放的增加(如高温天气可能增加空调使用，增加能耗)。

（4）碳排放分析及政策调节。利用动态路径选择集成碳排放核算模型，结合碳排放核算模型(如基于GIS的路径碳足迹计算)，实时分析不同运输方式和路径的碳排放水平，为决策者提供低碳优化建议。此外，将多式联运纳入碳市场，通过碳配额交易(如铁路运输企业出售剩余配额给公路企业)，以市场化手段调节运输结构。结合“碳普惠”等机制，例如采用动态路径选择或给予多式联运企业额外收益，弥补低碳技术应用的初期投入。

3.2　智能化协同调度

随着物联网、大数据与人工智能技术的突破性发展，各种信息技术融入到实际生产中。多式联运协同调度也正经历从传统多主体协同向智能化协同调度的转型。虽然针对多主体协同信息互通问题已开展一定研究，但在应对突发天气、需求波动、运力冲突等复杂动态环境时，仍依赖人工经验，决策滞后性与局部优化弊端凸显。

信息技术的迅猛发展为多主体协同调度技术奠定了基础。当前，智能算法和大数据技术开始应用于多主体协同调度问题中。一是将智能算法与调度算法相结合，分析决策资源分配、运输路径优化等调度优化与协调，提高资源利用率、减少等待时间从而提高运输效率降低碳排放。二是采用大数据技术与人工智能、机器学习等技术智能调度各运输方式，使得各运输方式高效衔接、资源得到合理使用，减少能源消耗和环境污染。

结合低碳多式联运的实际问题，智能化协同调度主要可分为3方面内容。一是实现全域数据融合与实时感知。将各系统不同标准数据进行统一处理，利用物联网、5G、北斗/GPS等技术，实现低延迟、高精度实时监控与信息同步，构建统一数据平台。二是智能优化决策与动态调度。基于融合的数据，在复杂的约束条件下，进行全局最优或近优的运输方案制定与动态调整。三是多主体协同机制与自动化执行。建立多主体协同规则和流程，并实现调度指令的自动化执行，智能化协同调度体系如图5所示。这一系列技术将推动多式联运的数智化协同、打通多技术融合通道、助力构建“双碳”目标下的低耗高效运输体系。

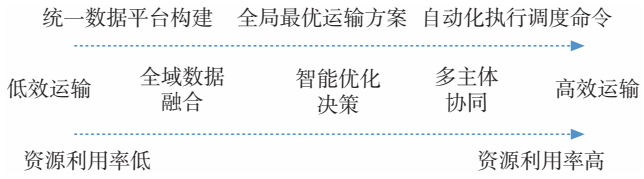

图5　智能化协同调度体系

Fig.5　Intelligent cooperative scheduling system

3.3　枢纽节点低碳生命周期评价

在多式联运体系中，枢纽节点(如港口、铁路编组站、物流园区)不仅承担运输方式的衔接功能，同时也是能源消耗与碳排放的集中环节。传统路径选择多聚焦于运输成本与时间，忽视了枢纽节点在装卸、仓储、等待和设施运行过程中的全生命周期碳排放。这种忽视容易造成“路径成本最优但碳排放高企”的悖论。因此，将生命周期评价(Life Cycle Assessment，LCA)纳入枢纽节点研究，对路径选择具有重要意义与必要性。

枢纽节点主要作用是实现运输方式转换与衔接、物流信息集散和处理，是多式联运实现集约化发展、降低整体碳排放的关键节点。现有碳排放评估多聚焦运输环节，容易忽视枢纽设施设备、换装作业、多模式衔接等非在途碳排放。枢纽设施设备

和运营过程中产生的碳排放，包括设施设备、长期运行的能源消耗以及设施维护的碳排放。枢纽内的基础设施包括自动化立体仓库、冷链中转仓、起重设备等；转运作业设备包括电动或燃油驱动货车、铁路车辆、装卸机械等在进行货物转运时使用的搬运设备。此外，枢纽衔接多种运输方式，容易因信息共享不足或计划不协同导致无效运输或重复作业，或是运输工具调度不同步导致空转排放。枢纽碳排放评估内容如图6所示。枢纽的设施设备会随着“初期建设—运营—维护—废弃”全过程的不同阶段，表现出不同程度的碳排放。对多式联运枢纽节点碳排放进行生命周期评价，有助于结合枢纽节点基础设施当下能源消耗和碳排放情况，选择合理的路径。

枢纽低碳生命周期评价是指从设施设备建设、运营、维护到废弃的各个阶段的全过程碳排放评估。对多式联运枢纽开展低碳生命周期评价，是对枢纽各种基础设施设备、运营过程等，通过一系列技术方法分析枢纽综合碳排放影响，帮助决策者根据不同运输结构选择适宜的低碳枢纽转运。利用LCA对不同转运工具和枢纽设施的分析，可以评估不同物流运输发展阶段下枢纽对环境的影响，为绿色低碳运输线路规划提供依据。基于既有研究和发展需求，可从设施设备全生命周期碳足迹评估、转运作业过程直接碳排放监测和多运输方式衔接的综合碳效率分析来开展。

4　研究展望

综合前文对多式联运路径选择问题的系统评述，对低碳路径选择关键问题的进一步分析，可以发现，现有研究在应对复杂动态环境、协调多主体决策以及全面刻画碳排放影响等方面仍存在明显不足。针对运输成本与效率权衡、不确定性条件下路径优化、多主体协同以及低碳路径选择等核心问题，多式联运低碳路径选择研究亟需在方法体系、技术支撑与政策机制层面实现协同推进。基于此，从运输全过程智能化管理、供应链绿色协同与韧性优化，以及不同运输方式间政策协同与标准统一3个方面，对未来研究方向进行展望，以期为多式联运低碳化发展提供系统性的研究思路。

（1）面向低碳目标的多式联运全过程智能化管理。未来多式联运低碳路径选择研究应从单一环节优化转向面向运输全过程的智能化管理与决策支持，通过对运输、转运与调度等环节的统一建模，实现路径选择、运力配置与碳排放控制的协同优化。这一研究方向直接回应了第2章中多主体协同效率不足以及第3章中智能化协同调度能力有限的问题，现有研究多停留在局部或静态优化层面，尚未形成覆盖全流程的系统化决策框架。未来可结合多源异构数据融合、智能算法与实时感知技术，构建支持动态决策和自动执行的智能管理体系，为多式联运低碳运行提供可持续的技术支撑。

（2）供应链绿色协同与韧性导向的多式联运路径优化。在不确定性显著增强的背景下，低碳路径选择研究亟需从传统“最优路径”问题，拓展至兼顾绿色目标与系统韧性的多式联运路径优化。该方向与第2章中不确定性条件下路径优化问题，以及第3章中时空动态条件下动态路径选择的分析形成直接呼应，既有研究虽然引入了随机或鲁棒方法，但对跨环节协同与系统恢复能力的关注仍然不足。未来研究可将路径选择与供应链协同机制相结合，在碳排放约束下系统刻画需求波动、突发事件等冲

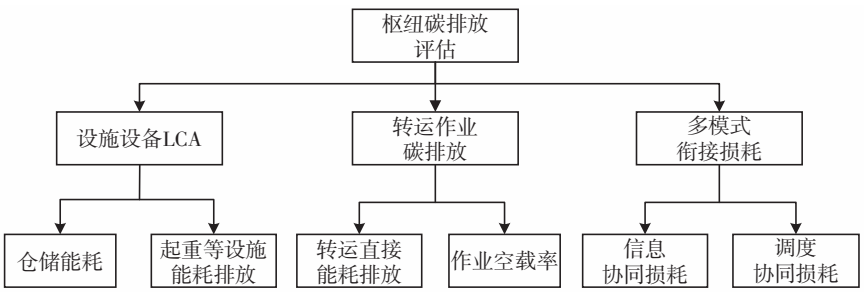

图6　枢纽碳排放评估内容

Fig.6　Structure of hub carbon emission assessment content

击情景，探索多式联运系统在低碳目标下的稳定性与适应性提升路径。同时，该方向亦延续并深化了第2章总结的运输成本与效率权衡问题，在低碳约束和系统韧性目标下，重新界定路径选择的多目标决策逻辑。

（3）多运输方式间低碳政策协同与碳核算标准统一。多式联运低碳路径选择离不开多运输方式间政策协同与统一的碳核算标准体系。该研究方向回应了第2章中低碳路径与物流成本均衡问题，以及第3章中枢纽节点低碳生命周期评价所揭示的碳排放核算碎片化问题，当前不同运输方式、不同环节之间碳排放边界不清，制约了低碳路径选择结果的可比性与可实施性。未来可在LCA方法基础上，进一步探索多式联运统一碳核算规则，并将其与碳交易、碳激励等政策机制相结合，为低碳路径选择提供制度层面的支撑。

5　结束语

针对多式联运国内外主要研究，以时间轴为线索，梳理既有研究多式联运路径选择发展历程，分析得出多式联运路径选择主要聚焦于运输成本与效率均衡问题、运力资源配置问题、低碳路径与物流成本均衡问题和多主体协同调度问题；基于相关研究基础和绿色智慧物流发展趋势，从智能化协同调度、枢纽节点低碳生命周期评价和动态路径选择3个方面分析了低碳路径选择发展关键问题；结合我国多式联运发展实际，进一步提出多式联运全过程智能化管理、供应链协同与韧性优化和多运输方式间政策协同与标准统一等研究思路。

参考文献：

[1] 张得志，万卓群，李双艳，等. 低碳视角下多式联运网络设计优化问题研究[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(5)：1793-1804.
ZHANG Dezhi，WAN Zhuoqun，LI Shuangyan，et al. Optimization of Multimodal Transport Network Design from a Low-Carbon Perspective[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(5)：1793-1804.

[2] DEMIR E，BEKTAŞ T，LAPORTE G. A Review of Recent Research on Green Road Freight Transportation[J]. European Journal of Operational Research，2014，237(3)：775-793.

[3] JANIC M. Modelling the Full Costs of an Intermodal and Road Freight Transport Network[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2007，12(1)：33-44.

[4] 胡永仕，吴浩杰，简文良，等. 混合时间窗下考虑模糊需求的多式联运路径优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(7)：23-33.
HU Yongshi，WU Haojie，JIAN Wenliang，et al. Multimodal Transport Path Optimization Considering Fuzzy Demand under Mixed Time Window[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(7)：23-33.

[5] 赵光辉，李重荣，游　丽. 多式联运助推交通运输高质量发展：现实挑战与治理逻辑[J]. 物流技术，2024，43(12)：139-147.
ZHAO Guanghui，LI Chongrong，YOU Li. Multi-Modal Transport for High-Quality Transportation Development：Realistic Challenges and Governance Logic[J]. Logistics Technology，2024，43(12)：139-147.

[6] 尹浣青，蒋惠园. 不确定条件下长江绿色多式联运路径优化[J]. 北京交通大学学报，2025，49(1)：71-79.
YIN Huanqing，JIANG Huiyuan. Optimization of Green Multimodal Transport Routes in Yangtze River under Uncertain Conditions[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(1)：71-79.

[7] 朱　晖，曾　鹦. 国际贸易多式联运管理的智能模型分析[J]. 物流技术，2012，31(4)：21-23.
ZHU Hui，ZENG Ying. An Intelligent Model for Managing Multimodal Transportation in International Trade[J]. Logistics Technology，2012，31(4)：21-23.

[8] European Commission. White Paper：Roadmap to a Single European Transport Area：Towards a Competitive and Resource-Efficient Transport System[R]. Luxembourg：Publications Office of the European Union，2011.

[9] BONTEKONING Y M，MACHARIS C，TRIP J J. Is a New Applied Transportation Research Field Emerging? A Review of Intermodal Rail-Truck Freight Transport Literature[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2004，38(1)：1-34.

[10] CARIS A，MACHARIS C，JANSSENS G K. Decision Support in Intermodal Transport：A New Research Agenda[J]. Computers in Industry，2013，64(2)：105-112.

[11] WANG Y，ZHANG D，LIU Q. A Hybrid Intelligent

Algorithm for Intermodal Routing Optimization with Time Windows under Uncertainty [J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2019，130：61-85.

[12] 李玉民，郭晓燕，杨　露. 考虑多目标的中欧集装箱多式联运路径选择[J]. 铁道科学与工程学报，2017，14(10)：2239-2248.
LI Yumin，GUO Xiaoyan，YANG Lu. Route Optimization of China-EU Container Multimodal Transport Considering Various Factors[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2017，14(10)：2239-2248.

[13] 李　珺，杨　斌，朱小林. 混合不确定条件下绿色多式联运路径优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2019，19(4)：13-19，27.
LI Jun，YANG Bin，ZHU Xiaolin. Path Optimization of Green Multimodal Transportation under Mixed Uncertainties[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2019，19(4)：13-19，27.

[14] 张　旭，袁旭梅，降亚迪. 需求与碳交易价格不确定下多式联运路径优化[J]. 系统工程理论与实践，2021，41(10)：2609-2620.
ZHANG Xu，YUAN Xumei，JIANG Yadi. Optimization of Multimodal Transportation under Uncertain Demand and Stochastic Carbon Trading Price[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2021，41(10)：2609-2620.

[15] 吴雅搏，徐晓敏. 低碳视角下多式联运优化模型研究[J]. 物流工程与管理，2024，46(1)：132-136.
WU Yabo，XU Xiaomin. Research on Multimodal Transport Optimization Model from the Perspective of Low Carbon[J]. Logistics Engineering and Management，2024，46(1)：132-136.

[16] 王　彦，王则恺，宋美霞，等. 中转时间不确定下冷藏集装箱多式联运路径优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25(5)：124-134.
WANG Yan，WANG Zekai，SONG Meixia，et al. Path Optimization of Reefer Container Intermodal Transportation under Transfer Time Uncertainty[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2025，25(5)：124-134.

[17] LI M Y，SUN X N，LI M Y，et al. Path Optimization of Low-Carbon Container Multimodal Transport under Uncertain Conditions[J]. Sustainability，2022，14(21)：14098.

[18] DERPICH I，DURAN C，CARRASCO R，et al. Pursuing Optimization Using Multimodal Transportation System：A Strategic Approach to Minimizing Costs and CO_2 Emissions[J]. Journal of Marine Science and Engineering，2024，12(6)：976.

[19] LI H Q，JIANG C L. Research on Enterprise Develop Strategies under Low-Carbon Advantages of Multimodal Transport[C]//2015 International Conference on Logistics，Informatics and Service Sciences (LISS). Barcelona：IEEE，2016：1-4.

[20] OCICKA B. Low-Carbon Scenarios Development for Modal Shift in the Chemical Industry[J]. MATEC Web of Conferences，2017，134：00043.

[21] 魏海蕊，郭思嘉. 中欧集装箱多式联运物流碳排放量测算研究[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(9)：3880-3893.
WEI Hairui，GUO Sijia. Calculation of Carbon Emissions of China-Europe Container Multimodal Transport Logistics[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(9)：3880-3893.

[22] 邱　叶，胡军红，郭缙烨，等. 不确定需求下考虑货物时间价值的多式联运路径选择方法[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(3)：994-1003.
QIU Ye，HU Junhong，GUO Jinye，et al. Multimodal Transport Path Selection Method Considering Freight Time Value[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(3)：994-1003.

[23] 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.

[24] ZHENG C J，SUN K，GU Y H，et al. Multimodal Transport Path Selection of Cold Chain Logistics Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of Advanced Transportation，2022，2022(1)：5458760.

[25] ZHOU J M，WEI H X，ZHAO Y Z，et al. China-Europe Container Multimodal Transport Path Selection Based on Multi-Objective Optimization[J]. Mechatronics and Intelligent Transportation Systems，2023，2(2)：72-88.

[26] LUO H Y，YANG J，NAN X. Path and Transport Mode

Selection in Multimodal Transportation with Time Window[C]// 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing: IEEE, 2018: 162-166.

[27] 胡自强，魏玉光，安　然，等. 复杂网络结构与环境下多式联运网络路径优化与流量分配[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25(3)：44-60.
HU Ziqiang, WEI Yuguang, AN Ran, et al. Optimization of Routing and Traffic Allocation in Multimodal Transportation Network with Complex Network Structure and Environment[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(3): 44-60.

[28] 孙　哲，马胜男，解相朋，等. 基于仿生算法的多式联运路径规划方法综述[J]. 控制与决策，2025，40(2)：375-386.
SUN Zhe, MA Shengnan, XIE Xiangpeng, et al. Bio-Inspired Optimization-Based Path Planning Algorithms in Multimodal Transportation: A Survey[J]. Control and Decision, 2025, 40(2): 375-386.

[29] HU G J, SUN W H, JIANG J. Optimization of Train Operation Scheme for Container Sea-Rail Multimodal Transport[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1802(3): 032068.

[30] ZANJIRANI FARAHANI N, NOBLE J S, MCGARVEY R G, et al. An Advanced Intermodal Service Network Model for a Practical Transition to Synchromodal Transport in the US Freight System: A Case Study[J]. Multimodal Transportation, 2023, 2(1): 100051.

[31] 裴英梅，刘立辉. 考虑运输网络风险的集装箱多式联运路径决策[J]. 工业工程，2023，26(2)：141-147.
PEI Yingmei, LIU Lihui. Route Decisions on Container Multimodal Transportation Considering Transportation Network Risk[J]. Industrial Engineering Journal, 2023, 26(2): 141-147.

[32] TSAO Y C, LINH V T. Seaport-Dry Port Network Design Considering Multimodal Transport and Carbon Emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 481-492.

[33] SUN Z, YANG Q M, LIU J Y, et al. A Path Planning Method Based on Hybrid Sand Cat Swarm Optimization Algorithm of Green Multimodal Transportation[J]. Applied Sciences, 2024, 14(17): 8024.

[34] ZHANG H Z, HUANG Q, MA L, et al. Sparrow Search Algorithm with Adaptive t Distribution for Multi-Objective Low-Carbon Multimodal Transportation Planning Problem with Fuzzy Demand and Fuzzy Time[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238: 122042.

[35] LIU S. Multimodal Transportation Route Optimization of Cold Chain Container in Time-Varying Network Considering Carbon Emissions[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4435.

[36] GUO F, LIANG J F, NIU R L, et al. Robust Optimization of a Procurement and Routing Strategy for Multiperiod Multimodal Transport in an Uncertain Environment[J]. European Journal of Operational Research, 2025, 327(1): 115-135.

[37] CHAVHAN S, GUPTA D, CHANDANA B N, et al. A Novel Emergent Intelligence Technique for Public Transport Vehicle Allocation Problem in a Dynamic Transportation System[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(8): 5389-5402.

[38] 母柏松. 单OD对间集装箱多式联运最优路径选择研究[J]. 铁道运输与经济，2019，41(7)：99-105.
MU Baisong. A Research on the Optimal Path Selection between Single OD Pairs for Multi-Modal Container Transportation[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(7): 99-105.

[39] 何　维，何世伟，迟居尚，等. 集装箱多式联运全程运输路径与接驳集卡调度协同优化[J]. 控制与决策，2025，40(7)：2175-2184.
HE Wei, HE Shiwei, CHI Jushang, et al. Collaborative Optimization of Door-to-Door Transport Routes and Drayage Truck Scheduling in Container Intermodal Transport[J]. Control and Decision, 2025, 40(7): 2175-2184.

[40] 曹淑迎，范林榜. 我国物流企业资源配置现状及演化趋势：基于CiteSpace知识图谱分析[J]. 物流科技，2022，45(5)：16-19.
CAO Shuying, FAN Linbang. Present Situation and Evolution Trend of Resource Allocation in China's Logistics Enterprises: Based on CiteSpace Analysis[J]. Logistics Sci-tech, 2022, 45(5): 16-19.

[41] 孙　岩，葛　岩，王福华，等. 区间模糊需求下时间敏感型货物多式联运低碳路径优化[J/OL]. 铁道科学与工程学报(2025-06-20)[2026-01-08]. https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20250620.

[42] 段力伟，高慧艳. 碳交易机制下考虑需求不确定的多式联

运路径优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：40-52.
DUAN Liwei，GAO Huiyan. Route Optimization of Multimodal Transport Considering Demand Uncertainty under Carbon Trading Mechanism[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：40-52.

[43] LI J，ZHENG Y H，LIU B，et al. The Synergistic Relationship between Low-Carbon Development of Road Freight Transport and Its Economic Efficiency：A Case Study of Wuhan，China[J]. Sustainability，2024，16(7)：2636.

[44] 徐国权，郑　瑞，袁韶秋，等. 混合不确定条件下低碳多式联运路径模糊鲁棒优化[J]. 北京交通大学学报，2025，49(1)：55-70.
XU Guoquan，ZHENG Rui，YUAN Shaoqiu，et al. Fuzzy Robust Optimization of Low-Carbon Multimodal Transport Paths under Mixed Uncertainty[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(1)：55-70.

[45] 马玉涵，杨培杰，薛　杰，等. 中国集装箱多式联运研究热点及发展趋势[J]. 交通信息与安全，2025，43(1)：15-30.
MA Yuhan，YANG Peijie，XUE Jie，et al. Research Hotspots and Development Trends of Container Multimodal Transport in China[J]. Journal of Transport Information and Safety，2025，43(1)：15-30.

[46] STEADIESEIFI M，DELLAERT N P，NUIJTEN W，et al. Multimodal Freight Transportation Planning：A Literature Review[J]. European Journal of Operational Research，2014，233(1)：1-15.

[47] WANG X B，REGAN A C. Local Truckload Pickup and Delivery with Hard Time Window Constraints[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2002，36(2)：97-112.

[48] PAN S L，BALLOT E，FONTANE F. The Reduction of Greenhouse Gas Emissions from Freight Transport by Pooling Supply Chains[J]. International Journal of Production Economics，2013，143(1)：86-94.

[49] PATEL M，RANGANATHAN N. IDUTC：An Intelligent Decision-Making System for Urban Traffic-Control Applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2001，50(3)：816-829.

[50] 虞逸云，黄袁凯. 基于ADMM的多式联运分布式协同决策方法研究[J]. 物流工程与管理，2025，47(2)：78-83.
YU Yiyun，HUANG Yuankai. Research on Distributed Collaborative Decision-Making Method for Intermodal Transport Based on ADMM[J]. Logistics Engineering and Management，2025，47(2)：78-83.

[51] 陆瑞新，刘春梅，聂　峰. 多式联运物流协同配送模型设计与仿真[J]. 计算机仿真，2022，39(8)：171-174，481.
LU Ruixin，LIU Chunmei，NIE Feng. Design and Simulation of Multimodal Transport Logistics Collaborative Distribution Model[J]. Computer Simulation，2022，39(8)：171-174，481.

(责任编辑　金　晶)