文章编号：1003-1421(2026)01-0120-10
引用格式：熊纯，李海鹰，庞子恒，等. 基于轴辐式网络的高铁快运通达性研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(1)：120-129.
XIONG Chun，LI Haiying，PANG Ziheng，et al. Research on Accessibility of High Speed Rail Express Based on Hub-and-Spoke Network[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：120-129.

基于轴辐式网络的高铁快运通达性研究

熊　纯[1]，李海鹰[1]，庞子恒[2]，韩营竹[3]，郭占清[4]，王　莹[1]

(1.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；2.中国国家铁路集团有限公司 运输调度指挥中心，北京　100844；3.中铁快运股份有限公司 运输调度部，北京　100070；4.中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所，北京　100081)

摘　要：近年来，我国物流市场需求不断增长，高铁快运凭借时效性强、安全性高、通达性好的竞争优势，逐渐成为我国物流体系的重要运输载体。为进一步提升高铁快运的运输效能，通过构建多维度指标量化体系，对我国高铁快运分级轴辐式网络及节点通达性进行研究，进而优化我国高铁快运网络布局。首先，采用系统聚类分析法初步确定网络中的节点等级，再考虑节点办理站地理位置的影响，基于K-means聚类分析法对节点等级进行优化，从而形成我国高铁快运分级轴辐式网络规划方案。在此基础上，基于高铁时刻表信息，提出高铁快运通达性的计算方法。最后，以全国146个办理站为例进行具体分析，并提出优化建议，为高铁快运运输方案的制定和调度调整提供理论支撑。

关键词：高铁快运；轴辐式网络；聚类分析；通达性；网络优化
中图分类号：U294.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250619001

Research on Accessibility of High Speed Rail Express Based on Hub-and-Spoke Network

XIONG Chun[1]，LI Haiying[1]，PANG Ziheng[2]，HAN Yingzhu[3]，GUO Zhanqing[4]，WANG Ying[1]

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Transportation Dispatching Command Center, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China; 3. Transportation Dispatching Department, China Railway Express Co., Ltd., Beijing 100070, China; 4. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, the demand of China's logistics market has been growing, and high speed rail express has gradually become an important transportation carrier in China's logistics system with its competitive advantages of strong timeliness, high safety, and good accessibility. To further enhance the transportation efficiency of high speed rail express, a multi-dimensional index quantification system was constructed to study the hierarchical hub-and-spoke network and the accessibility of nodes of China's high speed rail express and optimize the layout of the high speed rail express network. Firstly, the node hierarchy was preliminarily determined by systematic cluster analysis and then was optimized based on K-means cluster analysis considering the influence of the geographical position of node handling stations, thus forming a hierarchical hub-and-spoke network

收稿日期：2025-06-19
通信作者：王莹(1982—)，女，新疆阜康人，北京交通大学交通运输学院副教授。
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2024X012)

planning scheme for high speed rail express in China. Based on the train operation timetable of high speed railways, a calculation method for the accessibility of high speed rail express was proposed. Finally, taking 146 handling stations in China as examples, a concrete analysis was conducted, and optimization suggestions were put forward, which provided theoretical support for the formulation and scheduling adjustment of the high speed rail express transportation scheme.
Keywords: High Speed Rail Express; Hub-and-Spoke Network; Cluster Analysis; Accessibility; Network Optimization

0　引言

《交通强国建设纲要》(中发〔2019〕28号)明确指出，要建设现代化高质量综合立体交通网络，构筑多层级、一体化的综合交通枢纽体系，到2035年基本形成“全国123出行交通圈”和“全球123快货物流圈”的交通格局[1]。在此战略指引下，我国物流基础设施加速升级，促进了快递业高速发展。快递业务量自2021年连续4年突破1 000亿件，2024年首次突破1 700亿件，同比增长21.5%[2]。高铁快运作为重要运输载体，依托日益完善的高铁网络，展现出高时效性、强安全性的竞争优势。但由于区域经济发展不均衡与物流需求空间差异化，如何构建高适配性的物流网络架构，并精准量化网络节点的通达性，成为实现资源优化配置的关键所在。分级轴辐式网络通过枢纽节点的等级化，可加强轴心办理站对于辐点办理站的辐射能力，提升网络资源聚合度与运输组织集约化水平，进而不断提高车站之间的通达能力，与高铁快运高时效性、强网络性的特征吻合。同时，基于轴辐式网络的通达性计算能够精准识别网络瓶颈，为网络优化决策和运输调度调整提供理论依据，有利于降低物流成本，提高物流效率，对区域经济发展有着重要的影响。

轴辐式网络的研究起源于国外，O’Kelly[3]最早以美国航空网络为研究对象，构建了多种枢纽选址模型，并采用启发式算法进行求解。Sung等[4]首次提出了混合轴辐式物流网络模型以及基于对偶理论的求解算法。Kratica等[5]以单分配轴辐式网络为例，提出了一种新的遗传算法。Alumur等[6]综合优化运输成本和运输时间，提出了多式联运枢纽选址与轴辐式网络协同问题，并采用禁忌搜索算法进行求解。国内诸多学者也针对轴辐式网络进行了研究，金凤君等[7]将轴辐式网络概念引入中国，构建了我国轴辐式航空网络体系。刘荷等[8]构建了节点选择指标体系，并采用主成分分析法和引力模型确定了轴心城市和辐点城市。王玉勤[9]采用主成分分析法评价了贵州省各城市的物流能力，并确定轴心城市及辐射范围，构建了贵州省轴辐式物流网络。张诚等[10]采用主成分分析法明确铁路冷链物流枢纽备选集，并通过改进引力模型确定枢纽省份的辐射范围，进而构建了轴辐式物流网络布局。项寅[11]基于110个国家物流枢纽城市，采用修正引力模型、社会网络分析法等对城市间的轴辐式网络特征进行分析。

国外关于网络通达性的概念最早是由英国学者Hansen[12]提出并定义为节点之间相互作用机会的大小。Gutiérrez[13]通过平均加权旅行时间、经济潜力以及日常可达性，分析了西班牙和法国边境拟建的高速铁路通达性影响。Kim等[14]使用加权平均旅行时间和潜力可达性指标，对韩国高速铁路网络可达性进行研究，并评估其空间分布和变化差异。李福星等[15]基于中国铁路客票历史数据，分析了省会城市的铁路通达性变化情况。李欣潼等[16]采用加权平均出行时间、日常通达性指数等分析高铁网络通达格局变化。陈晔等[17]基于高速铁路网络发展完善的5个城市群，对比分析了高速铁路开通前后网络通达性的变化情况。李文军[18]等通过加权平均旅行时间，利用耦合协调度模型和空间计量模型，探究铁路可达性对城市的影响。

国内外关于轴辐式网络和通达性的研究已取得了显著进展，但既有的研究多聚焦于航空、公路等传统领域，对于高铁快运的轴辐式网络适配性研究不足，且未能将轴辐式网络特有的节点等级与通达性研究相结合。因此，本研究基于节点站的高铁快运发送量、高铁快运到达量、始发终到列车数、途经停靠列车数等指标，构建了分级轴辐式网络架构体系，并在此基础上，结合高速铁路时刻表，对高铁快运通达性的计算方法进行研究，解决高铁快运

网络等级化和通达性量化的难题，为高铁快运运输方案的制定和调度调整提供理论依据。

1　分级轴辐式网络架构体系构建

针对传统运输网络在时效性和覆盖性层面存在的不足，亟需构建集约化、等级化的运输组织体系。首先提出分级轴辐式网络的总体架构，用于系统性指导网络资源集约化配置，接着再对网络中的节点进行等级划分。基于节点办理站的指标数据，采用系统聚类分析法初步确定网络中的节点等级，但由于该方法会存在节点分布不均衡的问题，再引入节点办理站的实际经纬度位置，采用K-means聚类分析法对网络中节点等级进行优化，进而形成我国高铁快运分级轴辐式网络规划方案。

1.1　分级轴辐式网络架构

分级轴辐式网络以轴心办理站作为物流枢纽核心，并对周边腹地办理站产生辐射作用。腹地物流经支线向轴心办理站集聚，依托枢纽的资源整合能力实现需求匹配与运量合并，再经由干线在轴心办理站之间运输[19]。分级轴辐式网络最大化合并了运量，减少了点对点运输中空车往返问题，有效地提高了满载率，进而降低了物流运输成本，是现代物流网络发展的主要方向[20]。

基于轴辐式网络理论，结合高速铁路运输的高时效性和广覆盖性优势，提出了分级轴辐式网络架构，分级轴辐式网络示意图如图1所示。网络中的节点集包括一级、二级和三级节点，其中一级节点为全国性枢纽节点，主要承担跨区域干线运输功能，依托高铁快运实现高时效性的骨干物流运输；二级节点是区域性枢纽节点，既可作为一级节点间运输的停靠站点，也可依托城际铁路实现区域内货物的集散和中转；三级节点是区域内高铁快运业务量较小的办理站，主要向区域内的二级节点集聚，实现货物的集散，也可作为一级节点间、一二级节点间运输的途经停靠站点。基于不同等级之间的节点连接关系，一级节点之间通过“轴”直接连接，二级节点通过“辐”与一级节点相连接，三级节点通过“辐”与二级节点相连接，显著地提升了资源集约化水平。

以京沪高速铁路(北京南—上海虹桥)为例，京沪高速铁路通道线路示意图如图2所示。在分级轴辐式网络中，京沪通道作为轴线，青银通道(青岛—银川)上的青岛至济南西区段作为辐线，轴线和辐线可通过济南西实现网络拓扑连接。再综合考虑高铁快运业务量、始发终到及途经停靠列车数等关键参数，对节点进行等级划分，确定北京南、南京南和上海虹桥为一级节点，主要承担跨区域的干线运输；确定济南西、徐州东、蚌埠南、无锡东和青岛为二级节点，负责承担区域内的货物集散作业；其余节点办理站确定为三级节点，实现向区域内的二级节点进行货物的集聚。在运输组织模式层面，

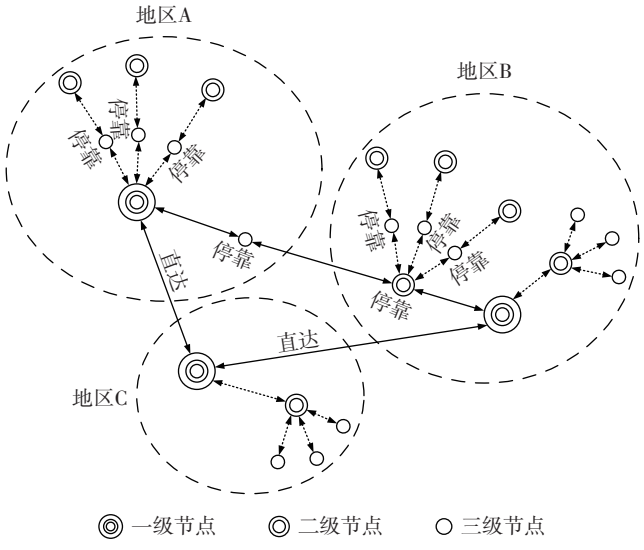


图1　分级轴辐式网络示意图

Fig.1　Hierarchical hub-and-spoke network



图2　京沪高速铁路通道线路示意图

Fig.2　Beijing-Shanghai High Speed Railway passage

从北京南至上海虹桥的干线运输可选择在沿途的二级、三级节点进行停靠，完成沿途货物的装卸作业；从青岛至济南西的支线运输可选择在沿途的三级节点进行停靠，实现区域内货物的集聚和中转。

1.2　节点办理站选取

在进行节点聚类前，需明确节点办理站样本。基于高铁快运业务的全网覆盖需求与轴辐式网络特性，其网络节点划分需遵循综合导向、区域适配、统一规划3大基本原则，同时一、二级节点办理站的选取需满足以下条件。①该办理站是已建成并投入运营的高速铁路车站；②该办理站的高铁快运业务量较大；③该办理站在全国高速铁路网络中占据重要地位[21]。将全国高铁快运办理站中未达到上述筛选标准的车站划定为三级节点，由于三级节点的高铁快运业务量较小且通常为高铁线路上的小站，故不纳入分级轴辐式网络的聚类分析和后续通达性的计算中。

为了与上述条件高度契合，同时兼顾指标体系的科学性、可操作性和市场化运营的适应性[22]，依次确定高铁快运发送量、高铁快运到达量、始发终到列车数、途经停靠列车数4个指标作为影响高铁快运网络节点等级划分的关键因素，并选取146个办理站作为分级轴辐式网络体系的一、二级节点办理站样本。其中，高铁快运发送量和高铁快运到达量是最直接且最核心的业务规模指标，始发终到列车数可用来衡量办理站在高铁快运网络中的核心枢纽地位，途经停靠列车数可用来衡量办理站在网络中的通达性和连接度。4个指标呈现正相关性，指标数值的增长也会带动节点等级的提升，形成梯度更加分明的轴辐式网络体系。

1.3　系统聚类结果分析

利用SPSS24.0软件，对146个节点办理站的指标数据进行系统聚类分析，节点办理站系统聚类分析谱系图如图3所示。由图3可知，若将聚类结果分为2类，并分别作为一、二级节点，则一级节点仅包含长沙南和成都东2个办理站，难以满足高铁快运全国性枢纽节点在地理位置上均衡分布的要求。若将聚类结果分为17类，并将前15类结果合并作为一级节点，则分级轴辐式网络中一级节点共有38个，高铁快运节点办理站系统聚类等级划分结果如表1所示。

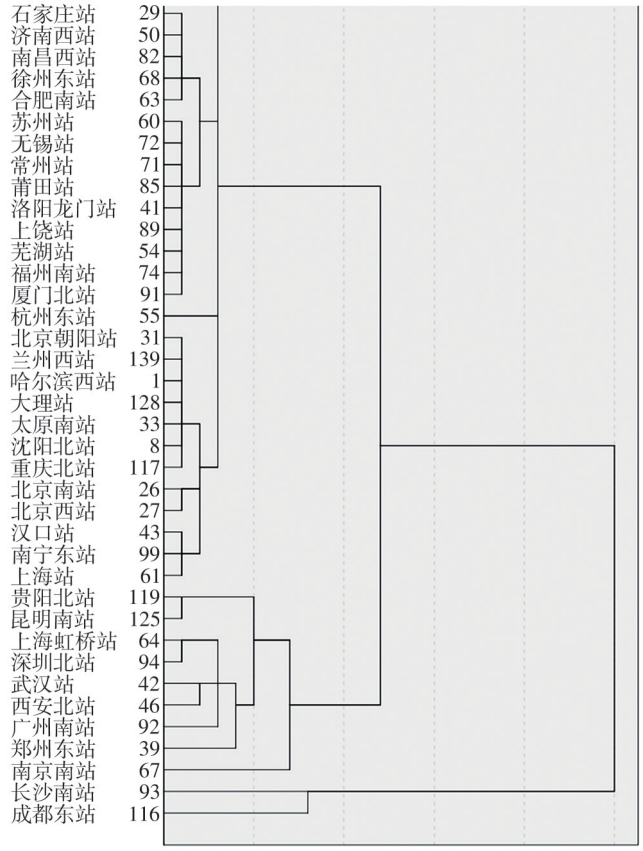


图3　节点办理站系统聚类分析谱系图

Fig.3　System cluster analysis pedigree diagram of node handling stations

1.4　基于K-means聚类分析的节点等级优化

从表1可知，若直接对样本进行系统聚类分析，可能会导致某一地区同一层级的节点在地理位置上过于集中或稀疏，进而影响全国高铁快运业务

表1　高铁快运节点办理站系统聚类等级划分结果

Tab.1　System cluster grade division results of high speed rail express node handling stations

节点等级	办理站数量/个	节点办理站
一级节点	38	石家庄站、济南西站、南昌西站、徐州东站、合肥南站、苏州站、无锡站、常州站、莆田站、洛阳龙门站、上饶站、芜湖站、福州南站、厦门北站、杭州东站、北京朝阳站、兰州西站、哈尔滨西站、大理站、太原南站、沈阳北站、重庆北站、北京南站、北京西站、汉口站、南宁东站、上海站、贵阳北站、昆明南站、上海虹桥站、深圳北站、武汉站、西安北站、广州南站、郑州东站、南京南站、长沙南站、成都东站
二级节点	108	松原站、咸阳站、乌兰浩特站、林芝站、白城站、拉萨站、安康站、达州站、延安站、普洱站……深圳站、郑州站、重庆西站、北京丰台站、银川站、沈阳站、清河站、南宁站、上海南站、昆明站

的协调效率。因此，将节点办理站的实际经纬度位置纳入分级决策体系中，通过K-means聚类分析优化节点等级，保障区域资源的均衡配置，使得最终划分结果更契合高铁快运网络的运转需求。

1.4.1　K-means聚类分析

K-means聚类分析采用距离作为相似性评价指标，将数据集划分为k个簇，使各数据属于距离最近的簇中心，并通过不断调整簇中心的位置，优化簇内的紧密度，从而获得紧凑但彼此分离的簇。在进行K-means聚类分析前，需确定k的取值。参考既有研究，本研究采用均方根法确定最优k值，即假设有m个样本，$k=\sqrt{m/2}=\sqrt{146/2}\approx 9$。进而，通过百度地图测定了146个节点办理站的经纬度坐标，并通过高斯投影法，将其转换为平面直角坐标。基于此，利用SPSS24.0软件，采用K-means聚类分析法对146个节点办理站的地理位置数据进行分析，K-means聚类分析结果如表2所示。

1.4.2　节点等级优化调整

基于系统聚类等级划分结果与K-means聚类分析结果，依据以下节点等级调整策略进行优化[21]：①每个区域至少包含1个一级节点；②各区域一级节点的数量由区域内总节点办理站数量决定，每5个节点配备1个一级节点，采用四舍五入原则；③经济发达或高铁快运业务量较大的区域，可适当增设一级节点；④若区域一级节点呈现地理集聚特征，且高铁快运业务量可通过城际铁路集聚到就近一级节点，可合理优化空间邻近节点；⑤调整后的节点办理站可基于高铁快运业务量规模或是否属于省会城市进行选取。经优化调整后，节点办理站等级划分最终结果如表3所示，形成了我国高铁快运“32+114”分级轴辐式网络如图4所示。

2　基于分级节点的高铁快运通达性计算方法研究

为了评估我国高铁快运分级轴辐式网络的覆盖性和便捷性，通过分析高铁快运通达性影响因素，确定通达性计算指标；再结合高速铁路时刻表，对任意2个节点办理站之间的通达性和任一节点办理站的平均通达性进行计算和分析，为高铁快运分级轴辐式网络优化提供决策依据。

2.1　高铁快运通达性影响因素分析

高铁快运通达性指一个节点办理站到达另一个节点办理站所需的时间、距离或成本等，本研究选取节点办理站通过分级轴辐式网络到达其他节点办理站的平均旅行时间表示高铁快运的通达性。高铁快运通达性受多重因素的制约，但核心在于每条高速铁路线路的时刻表和运输速度的协同作用。高速铁路的始发终到站、始发终到时间、停站时间等都会约束通达性阈值，而受不同线路条件、速度等级等因素影响，高铁快运的通达性也会所有差异。

2.2　高铁快运通达性计算方法

分级轴辐式网络由节点集和边集共同构成，节

表2　K-means聚类分析结果

Tab.2　Results of K-means cluster analysis

区域类别	办理站数量/个	节点办理站
1	8	哈尔滨西站、哈尔滨站、佳木斯站、大庆西站、齐齐哈尔站、白城站、乌兰浩特站、松原站
2	8	牡丹江站、长春站、吉林站、珲春站、延吉西站、长白山站、通辽站、乌鲁木齐站
3	21	沈阳站、沈阳北站、大连站、大连北站、丹东站、辽阳站、锦州南站、锦州北站、本溪站、盘锦站、北京南站、北京西站、清河站、天津西站、北京朝阳站、北京丰台站、大同南站、呼和浩特东站、包头站、银川站、嘉峪关南站
4	10	石家庄站、太原南站、临汾西站、延安站、济南西站、青岛站、青岛北站、兰州西站、庆阳站、西宁站
5	13	运城北站、郑州东站、郑州站、洛阳龙门站、汉中站、西安北站、安康站、西安站、咸阳站、盐城站、蚌埠南站、徐州东站、连云港站
6	27	武汉站、汉口站、无锡东站、芜湖站、杭州东站、杭州站、南京站、安庆站、苏州站、上海站、金华站、合肥南站、上海虹桥站、宁波站、南京南站、上海南站、常州站、无锡站、诸暨站、景德镇北站、九江站、成都东站、重庆北站、重庆西站、达州站、拉萨站、林芝站
7	14	南昌站、南昌西站、萍乡北站、宜春站、三明北站、上饶站、长沙南站、永州站、贵阳北站、六盘水站、遵义站、攀枝花南站、西昌西站、丽江站
8	21	福州南站、福州站、赣州站、赣州西站、龙岩站、莆田站、泉州站、三明站、厦门站、厦门北站、柳州站、桂林北站、桂林站、贺州站、昆明南站、昆明站、楚雄站、大理站、云县站、保山站、曲靖北站
9	24	广州南站、深圳北站、深圳站、汕头站、南宁站、南宁东站、梧州南站、北海站、防城港北站、贵港站、钦州东站、百色站、平果站、桂平站、扶绥南站、崇左南站、来宾北站、玉林站、富宁站、普者黑站、临沧站、普洱站、西双版纳站、红河站

表3　节点办理站等级划分最终结果

Tab.3　Final result of node handling station classification

节点等级	办理站数量/个	节点办理站
一级节点	32	哈尔滨西站、长春站、乌鲁木齐站、沈阳北站、北京南站、北京西站、北京朝阳站、呼和浩特东站、银川站、石家庄站、太原南站、兰州西站、郑州东站、西安北站、连云港站、武汉站、汉口站、合肥南站、上海虹桥站、南京南站、成都东站、重庆北站、杭州东站、南昌西站、长沙南站、贵阳北站、福州站、厦门北站、昆明南站、广州南站、深圳北站、南宁东站
二级节点	114	哈尔滨站、佳木斯站、大庆西站、齐齐哈尔站、白城站、乌兰浩特站、松原站、牡丹江站、吉林站、珲春站、延吉西站、长白山站、通辽站、沈阳站、大连站、大连北站、丹东站、辽阳站、锦州南站、锦州北站、本溪站、盘锦站、清河站、天津西站、北京丰台站、大同南站、包头站、嘉峪关南站、临汾西站、延安站、济南西站、青岛站、青岛北站、庆阳站、西宁站、运城北站、郑州站、洛阳龙门站、汉中站、安康站、西安站、咸阳站、盐城站、蚌埠南站、徐州东站、无锡东站、芜湖站、杭州站、南京站、安庆站、苏州站、上海站、金华站、宁波站、上海南站、常州站、无锡站、诸暨站、景德镇北站、九江站、重庆西站、达州站、拉萨站、林芝站、南昌站、萍乡北站、宜春站、三明北站、上饶站、永州站、六盘水站、遵义站、攀枝花南站、西昌西站、丽江站、福州南站、赣州站、赣州西站、龙岩站、莆田站、泉州站、三明站、厦门站、柳州站、桂林北站、桂林站、贺州站、昆明站、楚雄站、云县站、保山站、曲靖北站、深圳站、汕头站、南宁站、梧州南站、北海站、防城港北站、贵港站、钦州东站、百色站、平果站、桂平站、扶绥南站、崇左南站、来宾北站、玉林站、富宁站、普者黑站、临沧站、普洱站、西双版纳站、红河站

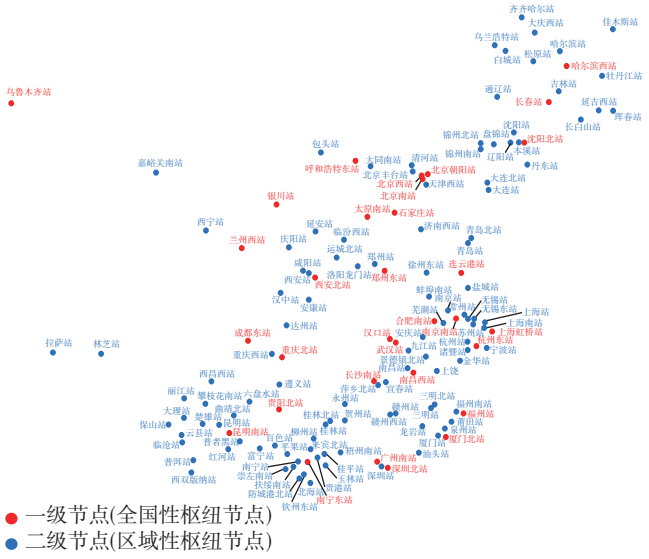


图4　我国高铁快运“32+114”分级轴辐式网络

Fig.4　“32 + 114” hierarchical hub-and-spoke network of China’s high speed rail express

点之间通过铁路线路连接，每条边的权重为各节点办理站之间的旅行时间。因此，综合考虑节点等级关系、列车时刻表、列车等级、运输速度、停站方案和运输组织模式等因素，分别计算同一节点对的所有列车旅行时间，通过径路搜索方法计算得到任意2个节点办理站之间旅行时间的平均值，将其作为办理站间的通达性，进而得到整个分级轴辐式网络的通达性矩阵，具体计算方法如下。

（1）标记节点办理站属性。分别标记146个节点办理站所属区域和在该区域内对应的节点等级，若为二级节点，还需要标记同一区域内一级节点办理站名称。

（2）确定分级轴辐式网络中节点办理站的连接规则。一级节点之间可采取直达运输模式直接相连，或选择在二级节点办理站停靠进行装卸作业；而不作为一级节点之间停靠站点的二级节点只可以与所属区域内的节点相连，不可跨级连接其他区域的节点。

（3）计算2个相邻节点办理站的旅行时间t_{ij}。①输入G字头、D字头、C字头动车组列车的列车时刻表，具体包括始发站、终到站、途经站、始发时间、终到时间、停站时间和车次等信息；②依次遍历列车的始发站和途经站，以始发站和途经站作为出发车站，以该站之后的途经站或终到站作为到达车站；③判断出发车站和到达车站是否均属于146个节点办理站，且是否符合（2）中的节点办理站连接规则，若是，则输出旅行时间t_{ij}

$$t_{ij} = t_{ij_in} - t_{ij_out} \tag{1}$$

式中：i为出发车站；j为到达车站；t_{ij_out}为出发时间，h；t_{ij_in}为到达时间，h。

（4）计算任意2个节点办理站之间的通达性T_{ij}和任一节点办理站的平均通达性$\overline{T_i}$。

①若$i = j$，则旅行时间$t_{ij} = 0$，通达性为$T_{ij} = 0$。

②若节点办理站i和j存在直达路径，则可计算出2个节点办理站之间的通达性

$$T_{ij1} = \frac{\sum t_{ij}}{m_1} \tag{2}$$

式中：m_1为直达路径数量，条。

③若节点办理站i和j存在中转路径，中间节点办理站为k，且$t_{ik_in} < t_{kj_out}$，则其通达性可采用径路搜索方法获得。

$$T_{ij2}=\frac{\sum\left(t_{kj_\mathrm{in}}-t_{ik_\mathrm{out}}\right)}{m_2} \tag{3}$$

式中：t_{ik_out}为出发时间，h；t_{kj_in}为到达时间，h；m_2为中转路径数量，条。

④通过以上计算可得2个节点办理站的通达性，进而得到分级轴辐式网络的节点办理站通达性矩阵。

$$T_{ij}=\frac{\sum\left(m_1T_{ij1}+m_2T_{ij2}\right)}{m_1+m_2} \tag{4}$$

⑤通过进一步计算，可以得到任一节点办理站到其他节点办理站的平均通达性$\overline{T}_i$。

$$\overline{T}_i=\frac{\sum_j T_{ij}}{n}\qquad j=1,2,\ldots,n \tag{5}$$

式中：n为任一节点可通达其他节点办理站的个数，个。

3　实验结果分析

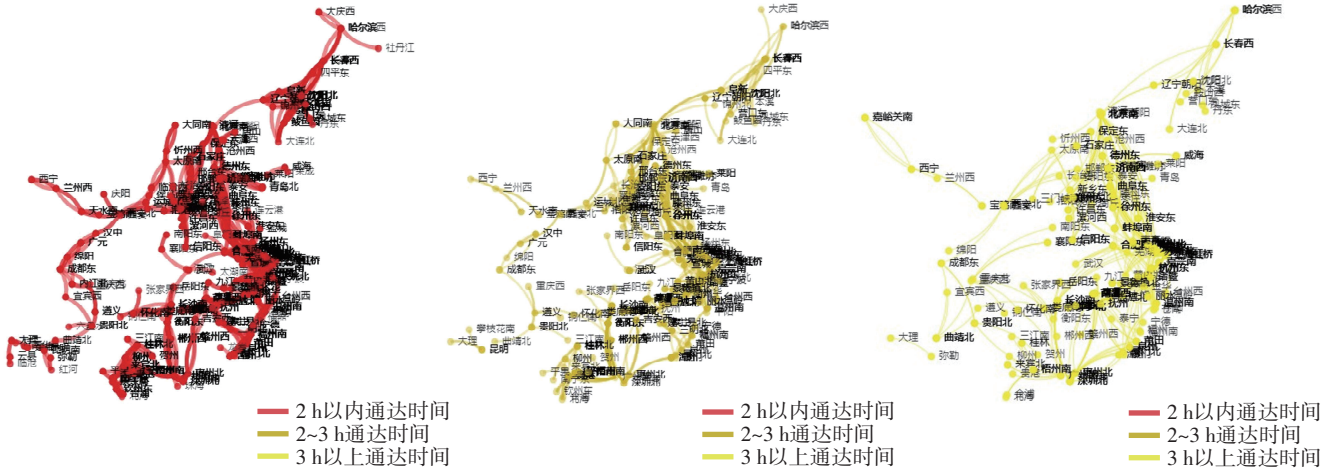
基于所构建的全国高铁快运分级轴辐式网络结构，对任意2个节点办理站之间的通达性和任一节点办理站的平均通达性进行计算和分析，针对其反映出的问题，进一步提出分级轴辐式网络的优化建议，从而推动高铁快运集约化发展。

3.1　任意2个节点办理站的通达性分析

基于分级轴辐式网络架构与高铁快运通达性计算方法，整合146个节点办理站和高铁运行时刻数据，对任意2个节点办理站之间的高铁快运通达性进行量化计算与分析，据此绘制出全国高铁网络2 h以内、2~3 h、3 h以上通达时间示意图，全国高速铁路网络通达时间示意图如图5所示，全国高速铁路网络通达时间统计图如图6所示。结果表明，全国高铁快运通达性呈现出显著的空间差异性，仅有14.33%节点办理站之间能在3 h以内完成通达，这些站点主要集中于京津冀、长三角和珠三角地区，这与其高速铁路线路密集、经济发达的特征相吻合；相比之下，85.67%的节点办理站之间通达时间都超过3 h，其中赣州到西安的时效性最低，耗时高达29.1 h，除此之外，均能在24 h之内完成运输。结合铁路的发展来看，任意2个节点办理站的通达性增强的主要原因在于大量高铁干线开通，高速铁路列车的开行密度逐年增加，平均旅行时间快速减少，进而2个节点办理站之间的通达时间也在逐渐减少，通达性也随之增强。

3.2　任一节点办理站的平均通达性分析

在任意2个节点办理站的通达性计算基础上，进一步研究任一节点办理站的平均通达性，汇总统计了146个节点办理站到其他节点办理站的平均通达时间和通达站点个数，任一节点办理站的平均通达时间和通达站点个数统计图如图7所示。进一步分别统计了不同平均通达时间和不同通达站点个数的节点办理站数量，不同平均通达时间的节点办理站个数统计图如图8所示，不同通达站点个数的节点办理站数量统计图如图9所示。结果表明，任一



a　2 h以内通达时间示意图　　b　2~3 h通达时间示意图　　c　3 h以上通达时间示意图

a　Access time within 2 hours　　b　Access time within 2~3 hours　　c　Access time over 3 hours

图5　全国高速铁路网络通达时间示意图

Fig.5　Access time of national high speed rail network

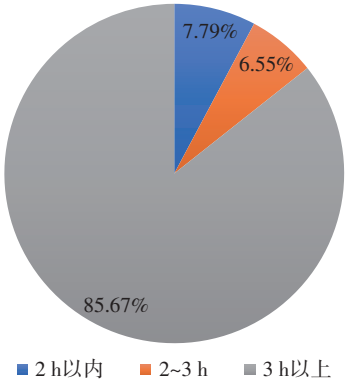


图6　全国高速铁路网络通达时间统计图

Fig.6　Statistics of access time of national high speed rail network

节点办理站的平均通达时间集中于6.42~8.25 h之间，占节点办理站总量的58.22%，且全路网54.11%的节点办理站可通达其他站点的个数在[81，121)区间内，可以看出大部分的节点办理站具有较强的通达性且平均通达时间小于8.5 h。其中，武汉站和郑州东站由于处在“八纵八横”高速铁路网络上，交通区位优势明显，使得到其他办理站的平均通达时间较短，均在6.3 h左右；且通达至其他节点办理站的数量较多，均超过了130个节点办理站，在全路网展现出良好的通达性。相比之下，乌鲁木齐站受地理位置偏远等因素的制约，到其他办理站的平均通达时间较长，约为11 h，且通达至其他节点办理站的数量仅有5个，通达性较差。

3.3　优化建议

通过对任意2个节点办理站之间的通达性和任一节点办理站的平均通达性进行计算和分析，系统揭示了平均通达时间的分布规律。结果表明，该规律在整体上符合所构建的分级轴辐式网络，但仍存在需局部优化的地方。

（1）部分节点办理站间由于距离较远，导致跨区域运输无法突破24 h的时效壁垒，但由于目前高铁快运主要使用的是边际运力资源，无法改变列车开行数量和开行速度，为此，可基于现有的分级轴辐式网络，优先选择较近的一级节点进行高效中转，最大程度地压缩通达时间。例如，赣州到西安平均通达时间高达29.1 h，可优先选择武汉站、郑州东站、长沙南站等一级节点进行中转。

（2）部分节点办理站的实际通达性与其在轴辐式网络中的节点等级划分存在偏差，可对节点等级进行相应调整，提高网络的结构效率。例如济南西站在分级轴辐式网络中定位为二级节点，但其平均通达时间为6.7 h，且通达至其他节点办理站的数量为119个，通达性显著优于同级节点，因此可以将济南西站升级为一级节点，进而强化重要节点之间的连接。

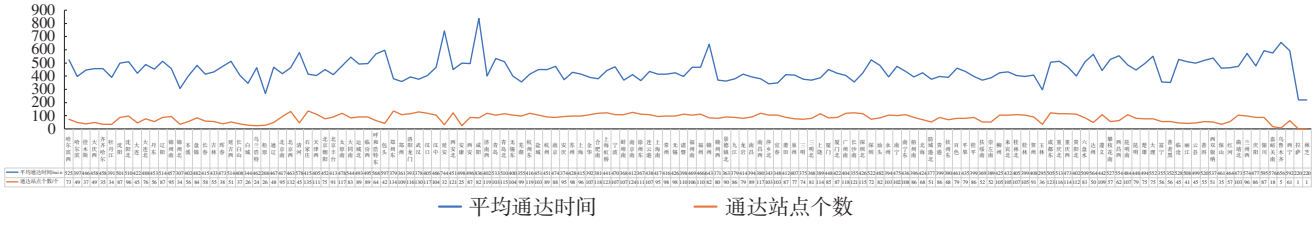


图7　任一节点办理站的平均通达时间和通达站点个数统计图

Fig.7　Statistics of average access time and number of accessible stations of node handling stations

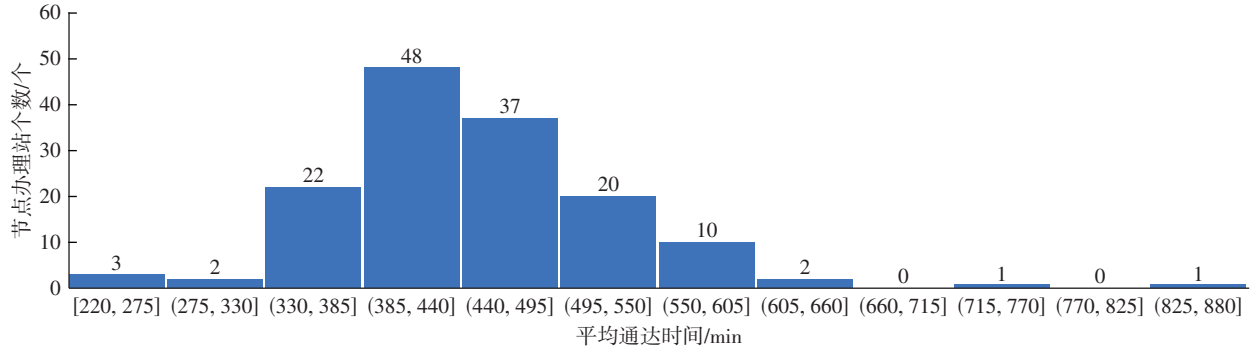


图8　不同平均通达时间的节点办理站个数统计图

Fig.8　Statistics of number of node handling stations with different average access time

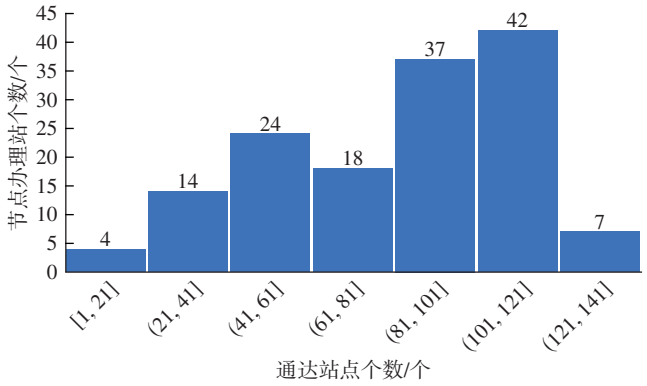


图9　不同通达站点个数的节点办理站数量统计图

Fig.9　Statistics of number of node handling stations with different number of accessible stations

（3）部分边缘节点办理站受地理位置的制约，高铁快运需求量较小且与其他节点办理站的通达时间均较长，导致时效性较低且运输成本偏高。为此可利用该节点办理站与邻近一级节点现有的直达列车，将货物集结至该一级节点，并依托其运输能力进行中转，减少旅行时间，进而加强地区的“轴”“辐”线路，构建强化型的轴辐式网络。例如，乌鲁木齐站可依托其至兰州西站方向的直达列车集结货物，再依托兰州西站一级节点的能力进行中转，提升区域间的互联互通。

综上所述，高铁快运分级轴辐式网络优化需要分阶段推进实施，近期可基于现有的网络，优先强化邻近节点间的中转通道，同时推进相关节点的设备设施升级改造，提高中转效率。中期可结合区域经济增长速率与高铁快运需求预测量，将节点等级规划调整方案纳入后续高铁网络扩容中，同步新增一级节点与其他核心节点的直达线路。远期可结合西部大开发等区域发展战略，推动边缘节点与其他一级节点的直达线路工程，推动区域互联互通升级。

4　结论

围绕高铁快运网络优化开展了系统性研究，通过构建多维度量化指标体系，结合系统聚类与K-means聚类分析法，提出我国高铁快运“32+114”分级轴辐式网络规划方案，更加适配目前高铁快运业务需求特征。在此基础上，创新性地提出了高铁快运通达性的计算方法，并基于高速铁路时刻表信息，以全国146个办理站为例进行实例分析，精准掌握了任意2个节点办理站之间的通达性及任一节点办理站的平均通达性规律，为网络拓扑结构优化提供了支撑，并提出了高铁快运分级轴辐式网络优化的分阶段推进方案。本研究不仅能显著提升运输组织效率，同时也能为高铁快运运输方案的制定及在自然灾害等紧急情况下进行运输调度调整打下良好的基础。未来，还可结合高速铁路边际运力资源，对高铁快运运输方案的制定和调度调整进行深入探讨，进而推动高铁快运向规模化、高效化方向发展。

参考文献：

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. 北京，(2019-09-19)[2025-04-11]. https：//www. gov. cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432. htm.

[2] 中华人民共和国中央人民政府. 2024年全国快递业务量首次突破1700亿件[EB/OL]. 北京，(2025-02-22)[2025-03-31]. https：//www. gov. cn/lianbo/bumen/202502/content_7005007. htm.

[3] O’KELLY M E. The Location of Interacting Hub Facilities[J]. Transportation Science，1986，20(2)：92-106.

[4] SUNG C S，JIN H W. Dual-Based Approach for a Hub Network Design Problem under Non-Restrictive Policy[J]. European Journal of Operational Research，2001，132(1)：88-105.

[5] KRATICA J，STANIMIROVIĆ Z. Solving the Uncapacitated Multiple Allocation p-Hub Center Problem by Genetic Algorithm[J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research，2006，23(4)：425-437.

[6] ALUMUR S A，KARA B Y，KARASAN O E. Multimodal Hub Location and Hub Network Design[J]. Omega，2012，40(6)：927-939.

[7] 金凤君，王成金. 轴-辐侍服理念下的中国航空网络模式构筑[J]. 地理研究，2005，24(5)：774-784.
JIN Fengjun，WANG Chengjin. Hub-and-Spoke System and China Aviation Network Organization[J]. Geographical Research，2005，24(5)：774-784.

[8] 刘　荷，王　健. 基于轴辐理论的区域物流网络构建及实证研究[J]. 经济地理，2014，34(2)：108-113.
LIU He，WANG Jian. The Construction of Regional Logistics Networks and Its Empirical Research Based on Hub-and-Spoke Theory[J]. Economic Geography，2014，34(2)：108-113.

[9] 王玉勤. 贵州省轴辐式物流网络构建研究[J]. 铁道运输与经济，2015，37(12)：41-46.
WANG Yuqin. Study on Establishment of Hub-and-Spoke Logistic Network in Guizhou Province[J]. Railway Transport and Economy，2015，37(12)：41-46.

[10] 张　诚，刘守臣. 多枢纽混合轴辐式铁路冷链物流网络布局优化研究[J]. 铁道学报，2021，43(7)：1-9.
ZHANG Cheng，LIU Shouchen. Research on Layout Optimization of Multi-Hub Hybrid Hub and Spoke Railway Cold Chain Logistics Network[J]. Journal of the China Railway Society，2021，43(7)：1-9.

[11] 项　寅. 国家物流枢纽城市物流空间联系及其网络特征分析[J]. 铁道运输与经济，2024，46(4)：34-41.
XIANG Yin. Spatial Connection and Network Characteristics of National Logistics Hub Cities[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(4)：34-41.

[12] HANSEN W G. How Accessibility Shapes Land Use[J]. Journal of the American Institute of Planners，1959，25(2)：73-76.

[13] GUTIÉRREZ J. Location，Economic Potential and Daily Accessibility：An Analysis of the Accessibility Impact of the High Speed Line Madrid-Barcelona-French Border[J]. Journal of Transport Geography，2001，9(4)：229-242.

[14] KIM H，SULTANA S. The Impacts of High Speed Rail Extensions on Accessibility and Spatial Equity Changes in South Korea from 2004 to 2018[J]. Journal of Transport Geography，2015，45：48-61.

[15] 李福星，潘旻晶，田　秘. 中国省会城市铁路通达性研究[J]. 铁路计算机应用，2022，31(2)：1-6.
LI Fuxing，PAN Minjing，TIAN Mi. Research on Railway Accessibility of China's Provincial Capitals[J]. Railway Computer Application，2022，31(2)：1-6.

[16] 李欣潼，戴技才. 成渝地区双城经济圈高铁网络通达性的溢出效应[J]. 热带地理，2024，44(05)：804-819.
LI Xintong，DAI Jicai. The Spillover Effect of High Speed Railway Network Accessibility in the Twin-City Economic Circle of the Chengdu-Chongqing Region[J]. Tropical Geography，2024，44(05)：804-819.

[17] 陈　晔，钱勇生，曾俊伟，等. 高速铁路网络协同发展对城市群空间重构的分形研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(4)：119-127，171.
CHEN Ye，QIAN Yongsheng，ZENG Junwei，et al. Fractal Study on Spatial Reconstruction of Urban Agglomerations under the Coordinated Development of High Speed Railway Networks[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(4)：119-127，171.

[18] 李文军，曾俊伟，钱勇生，等. 铁路可达性与城市活力的协调发展研究：以关中平原城市群为例[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：200-209.
LI Wenjun，ZENG Junwei，QIAN Yongsheng，et al. Coordinated Development of Railway Accessibility and Urban Vitality：A Case Study of Urban Agglomeration in Guanzhong Plain[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：200-209.

[19] 李梦瑶，王红春. 轴辐式物流网络研究综述[J]. 物流技术，2018，37(9)：1-5.
LI Mengyao，WANG Hongchun. Review of Research on Hub-and-Spoke Logistics Network[J]. Logistics Technology，2018，37(9)：1-5.

[20] 刘欣蕊. 基于轴辐式理论的中欧班列物流运输网络优化研究[D]. 大连：大连交通大学，2022.

[21] 李　奇. 高铁快运网络节点规划与选址研究[D]. 成都：西南交通大学，2019.

[22] 唐炜琳，郎茂祥，王海超，等. 适应市场经营的铁路现代物流经营评价指标体系设计[J]. 铁路物流，2025，43(9)：1-7，13.
TANG Weilin，LANG Maoxiang，WANG Haichao，et al. Design of an Operational Performance Evaluation Index System for Market-Oriented Railway Modern Logistics Systems[J]. Railway Logistics，2025，43(9)：1-7，13.

(责任编辑　汪沁萱)