

综合交通网络链路关联度评估方法

马文欣¹, 代磊磊², 李瑞敏¹

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 内蒙古自治区公安厅交通管理局, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 外部因素对综合交通网络的干扰会影响其服务功能, 而综合交通网络中不同链路之间的替代关联关系可以缓解这种不利影响。提出综合交通网络在链路层面替代关联关系的评估方法, 可用于识别网络脆弱性。该方法综合考虑链路地理位置与通行能力等属性, 构建量化指标以表征替代关联强度。在京津冀鲁区域高速公路、铁路和航空构成的综合交通网络中开展实证分析, 结果显示: 链路替代关联度呈现显著空间异质性, 受网络密度与通行能力影响明显; 区域整体关联水平存在不平衡, 其中山东省平均链路关联度与网络密度均为最低; 与单一交通网络相比, 部分城市 OD 对表现出显著的关联度增量, 体现出综合交通网络多方式协同的效率优势。

关键词: 交通网络韧性; 综合交通网络; 链路关联度; 替代关联关系; 京津冀鲁区域

Evaluation Method for Link Correlation in Comprehensive Transportation Networks

MA Wenxin¹, DAI Leilei², LI Ruimin¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Traffic Management Bureau of the Public Security Department of the Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: Disruptions caused by external factors can impair the service performance of a comprehensive transportation network. However, substitutive correlations among different links in a comprehensive transportation network can mitigate such adverse effects. This paper proposes a method that evaluates the substitutive correlations at the link level within comprehensive transportation networks, which can be used to identify network vulnerabilities. The method synthesizes link attributes—such as geographic location and traffic capacity—to construct quantitative indicators to characterize the strength of substitutability. An empirical analysis based on this method is conducted on a comprehensive highway-rail-air network in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region. The results reveal the heterogeneity in link substitutive correlations, significantly influenced by network density and link capacity. Notably, the region exhibits spatial imbalance in the overall level of substitutive correlations: Shandong Province records the lowest average link correlation and network density. Relative to single-mode transportation networks, OD pairs of certain cities display significant gains in link correlation, highlighting the efficiency advantage of multimodal collaboration in a comprehensive transportation network.

Keywords: transportation network resilience; comprehensive transportation network; link correlation; substitutive correlation; Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region

收稿日期: 2024-07-24

基金项目: 国家重点研发计划“交通基础设施韧性评估与风险防控基础理论与方法”课题二“交通基础设施复杂网络快速建模与智能仿真”(2021YFB2600502)、公安理论及软科学计划项目“重大公共危机事件下分级交通管控及应急处置机制研究”(2022LL05)

作者简介: 马文欣(1998—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 研究方向为交通网络韧性, 电子邮箱 mawenxin0423@163.com。

0 引言

综合交通网络是社会发展的重要支撑, 但自然灾害、突发事故等异常事件可能影响

其运行, 进而干扰正常的社会和经济活动。《交通强国建设纲要》提出要建设现代化高质量综合立体交通网络, 完善多层次网络布局, 增强系统弹性; 《国家综合立体交通网

规划纲要》也指出综合交通网络韧性还需增强。在完善的网络布局中，失效元素能够被其他元素替代，从而降低异常事件的负面影响，提高交通网络的韧性。

交通网络韧性是指交通系统在遭受干扰后，仍能维持可接受的服务水平，并能在合理成本内恢复至一定运营状态的能力^[1]。近年来，综合交通网络韧性越来越受到研究者的关注^[2-4]。与单一交通网络相比，其研究范式具有显著差异：在单一交通网络中，替代功能的链路局限于同种交通方式内部；而综合交通网络则通过多方式换乘，分散特定链路的扰动风险。

本研究从灾前规划视角出发，提出一种普适性的综合交通网络韧性评估方法，通过量化链路间的替代关联关系识别系统脆弱性，为针对性改善措施提供依据。以京津冀鲁区域为例，构建包含高速公路、铁路及航空网络的综合交通模型，分别从OD对和区域两个层面评估平均链路关联度，最终基于网络脆弱性分析结果提出相应的优化策略。

1 关联度研究方法综述

关联关系描述了系统的两个组成部分之间的依赖关系^[5-6]。关联关系可分为物理关联、信息关联、地理关联和逻辑关联^[7]。物理关联表示一个组分的状态依赖于另一个组分的物质输出；而当一个组分依赖于另一个组分传输的信息时，就会产生信息关联；地理关联指两个位置相近的组分同时受到外部影响；逻辑关联表示除物理、信息和地理关联之外的其他关联关系。关联关系还有其他类型，具体应与研究对象的特点保持一致。例如，R. Zimmerman^[8]将物理关联和信息关联总结为功能关联，将地理关联认为是空间关联；Zhang P.等^[9]考虑了经济因素，认为关联关系包括功能、物理、预算和市场-经济关联；C. Johansen等^[10]则结合应急响应，将关联关系分为服务提供、地理和修复可达性关联。

关联关系有时被认为是不利的，因为扰动会在相互关联的组分之间传播，引发级联故障并降低系统韧性^[11-13]。例如，桥梁的坍塌可能同时影响公路和水运的正常通行^[2]；电力网络的破坏可能影响道路信号灯的功能，引发道路拥堵，这又会进一步影响电力网络及时获取修复物资^[14]。然而，当考虑互补效应时，关联关系也可以减轻外部扰动的

不利影响^[15]。例如，Fang C.等^[16]研究了中国的铁路和航空系统之间的关联关系，发现一种交通方式受到扰动时，乘客可以换乘另外一种交通方式来满足出行需求，这种互补的关联关系提高了系统总体服务水平，改善了系统韧性。

综合交通网络链路之间的替代关联关系属于逻辑关联的范畴。此外，能够提供替代功能的链路通常位于失效链路的相邻位置，这在一定程度上体现了地理关联。在链路受到扰动时，用户能够通过替代链路到达目的地，因此替代关联关系体现了互补效应，能够帮助改善综合交通网络布局、提高韧性。

本文提出的链路关联度是一类基于网络布局的指标，包括链路替代关联度和平均链路关联度，并分析了多方式交通网络对平均链路关联度增量的影响。其他基于网络布局的常用韧性指标还包括度中心性、介数中心性、最大连通组分、平均路径长度和网络效率等^[11](见表1)。与传统指标相比，链路关联度的核心创新在于：量化综合交通网络中某链路失效时，其他链路对其运输功能的替代能力。该指标拓展了传统韧性评估的维度，不仅保留了网络层面的静态拓扑分析优势，更引入了链路层面的动态功能替代机制，从而能够更精准地识别关键脆弱链路，并为网络优化提供数据支撑。

2 链路关联度评估方法

2.1 链路替代关联度评估方法

当综合交通网络的链路 l_i 满足以下地理邻近的要求时，可能与其他链路存在替代关

表1 基于网络布局的常用韧性指标对比

Tab.1 Comparison of common resilience indicators based on network topology

指标	定义	特点
度中心性	衡量节点直接连接的链路数量	简单易懂，能够快速识别网络中关键节点，关注局部节点
介数中心性	衡量节点或链路在网络中构成最短路径的频率	有助于识别网络中的瓶颈节点或链路，计算复杂度较高
最大连通组分	网络中最大连通子图的节点数量	直观反映网络的整体连通性
平均路径长度	网络中所有节点对之间最短路径的平均值	对局部链路失效的敏感度较低
网络效率	网络中所有节点对之间最短路径倒数之和的平均值	综合考虑了网络整体的传输效率
链路关联度	一条链路失效时另一条链路对其功能的替代能力	既关注网络维度的静态结构特性，也注重链路维度的功能替代

资料来源：文献[1]

联关系。 OD 之间符合此条件的链路被纳入集合 Ω_{OD} 中。

1) 起点和终点之间存在一条通过链路 l_i 的路径。

2) 起点和终点之间通过链路 l_i 的最短路径应受阈值的约束, 即 $f_{R_{i,OD}^m} \leq (1+\tau)f_{R_{OD}^m}$ 。其中, $f_{R_{i,OD}^m}$ 表示在交通方式 m 中, OD 之间经过链路 l_i 的最短路径的成本; $f_{R_{OD}^m}$ 表示在交通方式 m 中, OD 之间最短路径的成本; τ 为对绕路的容忍程度, 取值 1.6^[17-18]。

链路替代关联度 I_{ij}^{OD} 表示链路 l_j 对链路 l_i 的替代能力, 即当链路 l_i 失效时, 链路 l_j 能替代链路 l_i 的程度。结合通行能力和成本量化替代关联关系, 本文提出 OD 之间链路 (l_i, l_j) 的替代关联度

$$I_{ij}^{OD} = \delta_{ij}^{OD} \frac{\min\left(1, \frac{C_j}{C_i}\right)}{\max\left(1, \frac{f_{R_{ij}^{OD}}}{f_{R_{i,OD}^{OD}}}\right)}, \quad (1)$$

式中: δ_{ij}^{OD} 为链路 l_i 和 l_j 之间的替代关联关系, 若存在则 $\delta_{ij}^{OD} = 1$, 否则 $\delta_{ij}^{OD} = 0$; C_i , C_j 分别为链路 l_i 和 l_j 的通行能力/(人次·d⁻¹)。

链路 (l_i, l_j) 之间可能通过多个 OD 产生替代关联。链路 (l_i, l_j) 跨 OD 的综合替代关联度

$$I_{ij} = \frac{\sum_{OD} I_{ij}^{OD}}{\sum_{OD} \delta_{ij}^{OD}}. \quad (2)$$

链路 l_i 被其他链路替代的总能力 S_i 如式(3)所示。较高的 S_i 值表示链路 l_i 被替代的能力更强, 网络可以更好地缓解该链路失效的影响。式(4)中 A_j 表示链路 l_j 为其他链路提供替代功能的总能力。

$$S_i = \sum_j I_{ij}, \quad (3)$$

$$A_j = \sum_i I_{ij}. \quad (4)$$

2.2 平均链路关联度评估方法

OD 之间可能有多个具有替代关联关系的链路, 将这些链路的替代关联度在 OD 内求平均, 可以探究不同 OD 之间的平均链路关联度

$$Z_{OD} = \frac{\sum_{i,j} I_{ij}^{OD}}{|U_{OD}|(|U_{OD}|-1)}, \quad (5)$$

式中: Z_{OD} 为 OD 之间的平均链路关联度;

U_{OD} 为 OD 之间所有具有替代关联关系的链路集合。

平均链路关联度考虑了综合交通网络中的所有交通方式。与交通方式子集 M 相比, 当考虑交通方式全集时, 平均链路关联度会增加, 如式(6)所示, 它反映了多种交通方式在提高平均链路关联度方面的优势。

$$W_{OD}^M = \frac{Z_{OD} - Z_{OD}^{i,j \in M}}{Z_{OD}}, \quad (6)$$

式中: W_{OD}^M 为与交通方式子集 M 相比, 所有交通方式带来的 OD 之间的平均链路关联度的增量; $Z_{OD}^{i,j \in M}$ 为交通方式子集 M 中 OD 之间的平均链路关联度。

3 案例分析

3.1 京津冀鲁区域综合交通网络

本文以京津冀鲁区域由高速公路、铁路和航空网络构成的综合交通网络为研究案例。其中, 高速公路数据来自国家地理信息公共服务平台, 铁路数据来自中国铁路 12306 网站, 航空数据来自 Variflight 网站。在综合交通网络中, 节点表示高速公路交叉口、铁路客站和机场, 边表示高速公路线路、铁路线路和航线(后文统称为“链路”)。采用虚拟链路将铁路客站、机场与其附近的高速公路交叉口进行连接^[19], 进而构成本文所研究的综合交通网络。如图 1 所示, 综合交通网络包含 737 个节点和 957 条链路。链路的属性包括长度、通行能力、通行时间和成本等。

3.2 链路替代关联度

由于研究范围和尺度限制, 本文主要考虑长度超过 10 km 的链路的替代关联关系。在此条件下, 京津冀鲁区域综合交通网络共有 594 条链路表现出替代关联关系。图 2 显示了该区域综合交通网络链路之间的替代关联度。图 3a 和图 3b 分别显示了当被其他链路替代和为其他链路提供替代功能时, 不同交通方式的链路总替代能力。

如图 2 和图 3 显示, 京津冀鲁区域大多数高速公路链路对失效链路具有较高的替代能力。这得益于高速公路网络分布密集且相对均匀, 同时高速公路链路通行能力较高。密集均匀的分布使得几乎每一条高速公路链路都能在网络中找到替代链路或者替代附近的链路。同时, 这些链路相对较高的通行能

力使其对失效链路具有较高的替代能力。

铁路网络的密度和地理均匀性低于高速公路网络，导致铁路链路的平均替代能力低于高速公路链路，但铁路链路提供替代能力的分布更广。不同铁路链路的替代能力呈现明显异质性。部分铁路链路(如高速铁路)具有较高通行能力，能够为失效链路提供重要替代功能，但这些链路失效时较难被替代；而通行能力较低的铁路链路(如频次较低的普通铁路)为失效链路提供的替代功能有限，但这些链路失效时较容易被替代。此外，铁路链路分散的通行能力分布和不均匀的地理位置分布，使得铁路网络具有相对分散的替代能力和被替代能力。

在京津冀鲁区域，航空运输使用频率较低，仅存在少量中长距离航线。由于该区域城市间距较近，高速公路和铁路已能充分满足旅客出行需求，导致区域内航线数量有限且替代性较差。具体表现为：航班座位供给不足、班次密度较低，使得航线通行能力有限，进一步制约了正常航线对失效航线的替代能力。航线较低的通行能力也使其在失效时更容易被替代，而高速公路和铁路链路都能提供较大替代能力。

链路替代关联度评估表明，京津冀鲁区域综合交通网络链路之间的替代关联关系呈现异质性。这种异质性与网络密度、链路空间分布和链路通行能力有关。通常，网络密度高、链路空间分布均匀、链路通行能力高等特点有助于增强链路之间的替代关联度。这反映出链路替代关联度既能体现网络布局特点，又能表征链路替代能力特性。其综合性有助于识别链路脆弱性，并为网络布局优化提供依据。具有较高替代关联度的链路能够相对容易地替代失效链路，并在自身发生故障时被其他正常链路替代，从而减轻潜在扰动的不利影响，提高综合交通网络的韧性。

3.3 平均链路关联度

3.3.1 OD对间平均链路关联度

图4展示了京津冀鲁区域内各城市之间OD级别的平均链路关联度。可以看出，很多OD对表现出较高的平均链路关联度，表明该区域综合交通网络中单个链路失效不易引发较大范围的级联故障，因为很多链路能够替代失效链路，从而保障了综合交通网络的韧性。

部分OD对表现出相对较低的平均链路

关联度，主要分布在山东省。这些OD对容易受到外部干扰的影响，需要进一步提升平均链路关联度。此外，京津冀鲁区域内平均链路关联度较低的OD对多为山东省的相邻城市。考虑到相邻城市连接在区域交通网络中的基础性作用，增加相邻城市OD对的平均链路关联度不仅有助于提高局部的网络韧性，还能增强更广泛区域的平均链路关联度。

以东营和滨州为例，东营和滨州之间每天只有一趟普通列车(关键链路)(见图5)，导致两地的平均链路关联度较低。与高速铁路相比，普通铁路的行驶速度和发车频率较

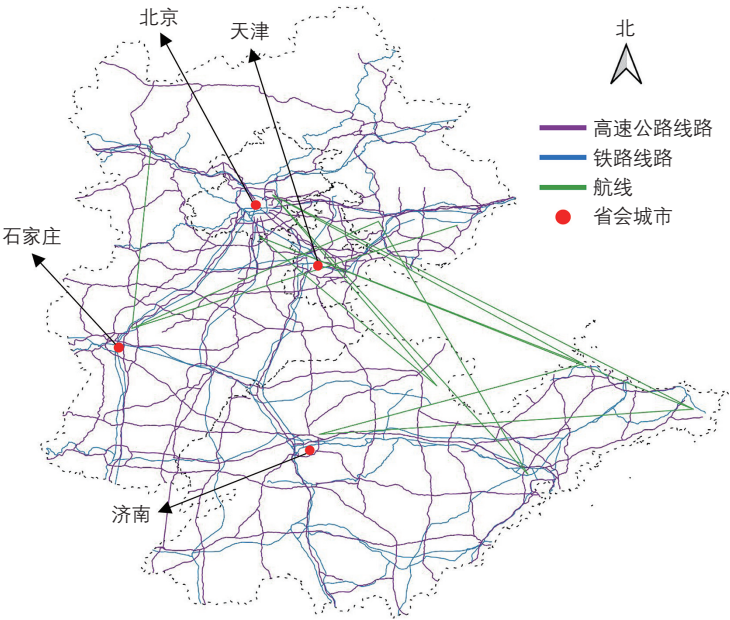


图1 京津冀鲁区域综合交通网络
Fig.1 Comprehensive transportation network in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region

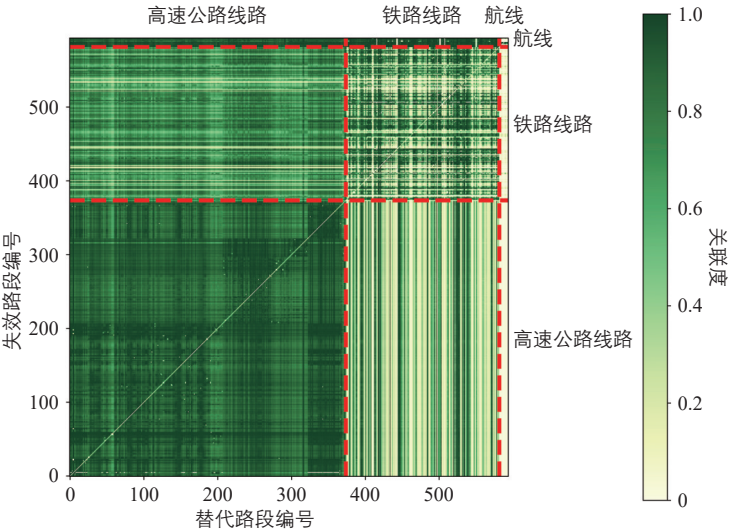


图2 京津冀鲁区域综合交通网络链路之间的替代关联度
Fig.2 Link substitutive correlation within the comprehensive transportation network in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region

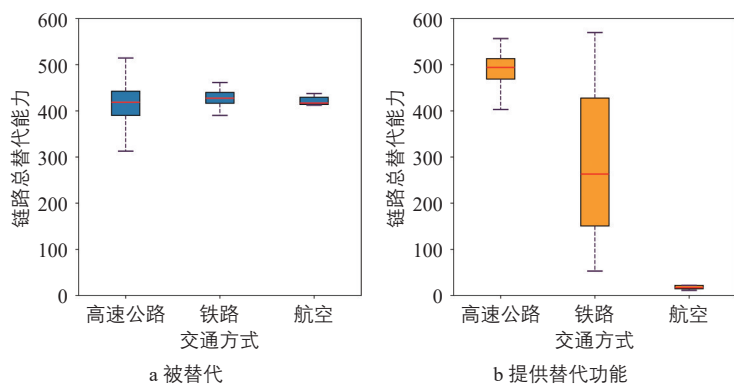


图3 京津冀鲁区域不同交通方式的链路总替代能力

Fig.3 Aggregate link substitutability by travel mode in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region

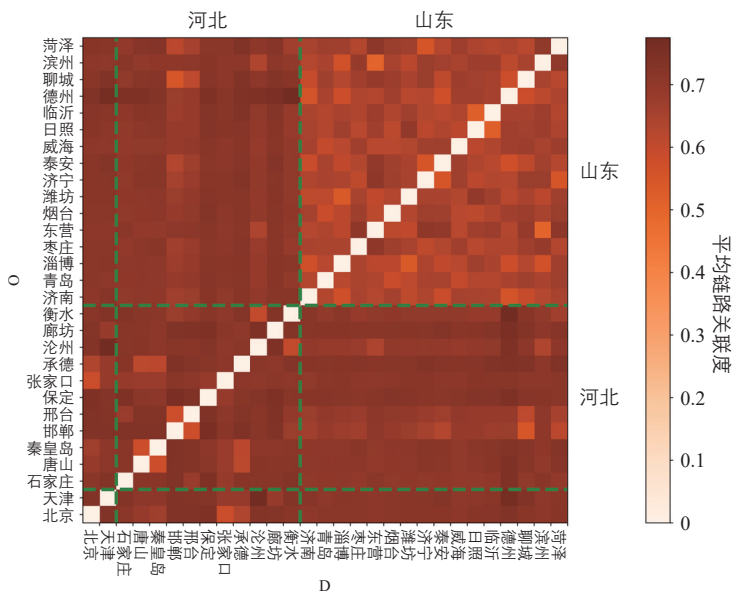


图4 京津冀鲁区域OD对平均链路关联度

Fig.4 Average link substitutive correlation of OD pairs in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region

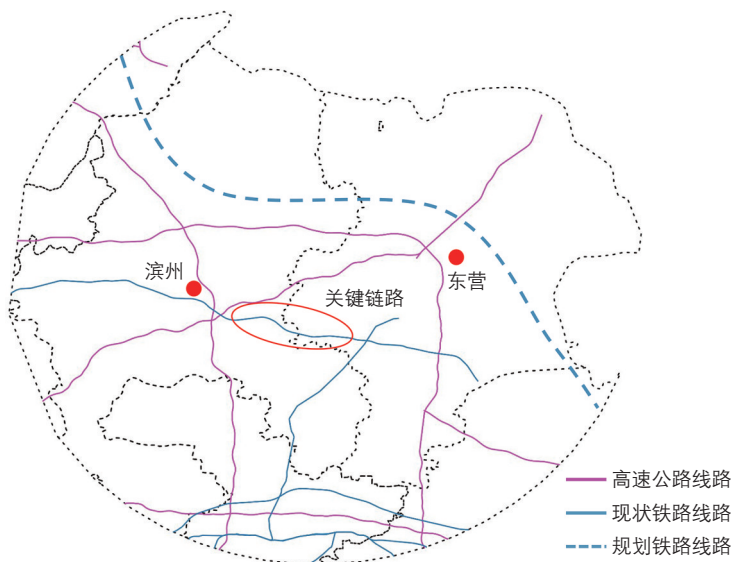


图5 东营—滨州综合交通网络

Fig.5 Comprehensive transportation network of Dongying-Binzhou

低, 导致其运力不足, 替代其他交通方式的能力较弱, 因此东营与滨州之间的平均链路关联度较低。为了改善这种情况, 可采取提升现有铁路链路通行能力等运营措施; 同时, 在网络中新增一条通行能力较高的铁路链路, 也将有助于提高东营与滨州的平均链路关联度。值得注意的是, 中国正在建设连接环渤海区域城市的新高速铁路^[20], 其中包括东营—滨州段。这些高速铁路的建成通车将显著改善山东省部分城市间的链路关联度和连通性, 从而增强网络对潜在扰动的抵御能力。

3.3.2 区域级的平均链路关联度

通过计算省级范围内的平均链路替代关联度, 可以分析不同区域间的差异性特征。如图6a所示, 山东省的平均链路关联度处于最低水平。图6b展示了各省高速公路和铁路的路网密度(以下简称“路网密度”)对比情况。分析发现, 省级平均链路关联度与路网密度呈现显著正相关关系, 这表明在路网密度较高的区域, 当部分链路受到干扰时, 其交通功能更容易通过其他正常链路得到替代。

京津冀鲁区域综合交通网络发展呈现明显的不均衡特征。作为支撑中国经济和社会发展的核心城市群^[21], 北京、天津与河北三地地理位置相邻, 社会经济互动密切。然而, 河北省在平均链路关联度和路网密度指标上均显著低于京津两市。更值得注意的是, 山东省的平均链路关联度为区域最低, 反映出其链路替代能力相对薄弱。这种区域差异主要源于交通网络的地理布局特征: 山东省沿海城市受自然地形条件限制, 高速公路和铁路网络发展相对滞后, 导致沿海城市间的交通连通性不足。

3.3.3 综合交通网络对平均链路关联度的改善作用

尽管铁路和航空链路的替代能力通常低于高速公路链路, 但它们在提高京津冀鲁区域的平均链路关联度和网络韧性方面发挥着重要作用, 特别是在特定城市之间表现显著。相对于仅考虑高速公路网络, 图7显示了包含高速公路、铁路和航空3种交通方式的综合交通网络中平均链路关联度的增量。增量较大的城市OD对主要集中在山东省, 这表明铁路和航空链路弥补了山东省高速公路链路替代关联度的不足, 凸显了多方式综合交通网络对增强综合交通网络韧性的作用。

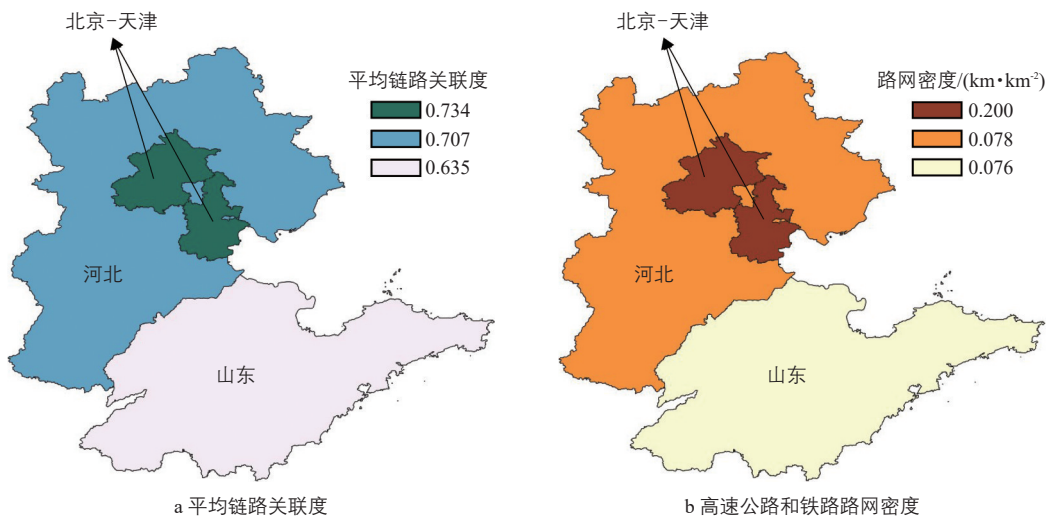


图6 京津冀鲁区域分区域平均链路关联度和路网密度

Fig.6 Sub-regional average link substitutive correlation and network density in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region

部分城市OD对的平均链路关联度增量达到100%(如济宁—枣庄和泰安—济宁),表明这些城市OD对间的高速公路链路替代关联度原本为0。以济宁—枣庄为例(见图8),二者间的高速公路网络较为稀疏,只有一条高速公路链路(关键链路)在可接受的路线长度内连接这两个城市。如果该链路失效,则没有其他高速公路链路可供替代。因此,仅考虑高速公路网络时,济宁—枣庄的平均链路关联度为0,亟须改善高速公路网络布局。而当同时考虑铁路和高速公路网络时,济宁和枣庄间存在多条铁路连接。这些铁路不仅能相互替代,还可作为高速公路的替代链路,从而使平均链路关联度显著提升,增强了济宁—枣庄对网络潜在扰动的抵御能力,充分体现了构建多方式综合交通网络的重要性。

3.3.4 小结

平均链路关联度评估显示,京津冀鲁区域大部分城市间的平均链路关联度较高,反映出综合交通网络整体具有较强的韧性。然而,山东省部分城市间的平均链路关联度较低,需要通过提升链路通行能力和增加网络密度来改善这些区域的网络韧性。铁路和航空网络的引入显著提高了部分城市间的平均链路关联度,特别是在高速公路网络稀疏的区域,这凸显了综合交通网络对提升整体韧性的关键作用。

在链路替代关联度评估基础上,平均链路关联度将研究视角从链路扩展到区域层面,揭示了区域层面的脆弱性。优化链路替代能力与完善网络布局有助于改善区域层面

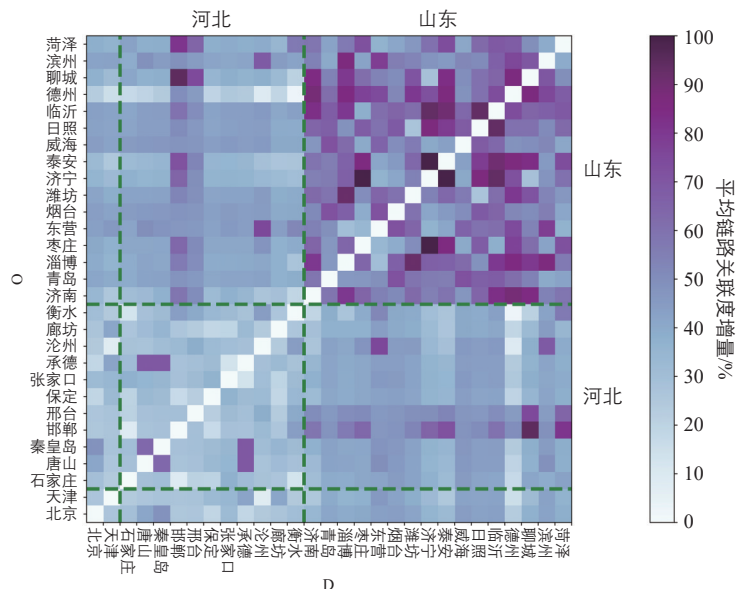


图7 京津冀鲁区域综合交通网络相对于高速公路网络的平均链路关联度增量

Fig.7 Increment in average link substitutive correlation of the comprehensive transportation network relative to the expressway network in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong region

的脆弱性。

4 讨论

综合交通网络链路关联度评估能够识别链路、网络和区域在面对潜在扰动时的脆弱性。根据上述评估结果,本文提出增强综合立体交通网络及其韧性的对策。

1) 优化综合交通网络布局。

高速公路具有灵活性高、覆盖面广的优势,适用于短距离出行;铁路和航空则具有快速、便捷的特点,适用于中长距离出行。

在常态环境下,多种交通方式优势互补;在非常态环境下,多种交通方式可增强对失效链路的替代能力,从而提升网络韧性。未来综合交通网络的发展需进一步统筹考虑多种交通方式及不同链路之间的替代关联关系,强化合作互补,建立跨部门协调机制,推动交通网络一体化规划与建设,以提高网络整体运输效率和韧性。同时,需关注不同城市之间脆弱交通方式的差异性,如东营—滨州需重点加强铁路网络建设,而济宁—枣庄则需完善高速公路网络。因此,应充分考虑区域异质性,因地制宜优化综合交通网络布局。

2) 提高河北省内综合交通网络链路关联度有助于促进京津冀协同发展。

本文评估结果显示,河北省综合交通网络的平均链路关联度仍有提升空间。可基于关联度评估结果识别脆弱节点,提高网络密度、优化布局,以增强综合交通网络的连通性和便捷性,进而提升其对自然灾害、突发事件等外部干扰的抵御能力。

3) 进一步加强山东省与京津冀区域的交通联系。

山东省在绿色农产品方面具有显著优势,可为京津冀区域提供优质农产品供应服务;同时,双方在高新技术产业领域合作空间广阔,可以共同打造具有国际竞争力的高新技术产业集群。根据链路关联度评估结果,建议重点加强脆弱区域的综合交通基础设施建设,为农产品供应服务及高新技术合作提供有力支撑。

5 结论

本文提出了一种基于地理邻近和最短路径的链路替代关联关系评估方法,能够识别单一交通网络和综合交通网络的链路关联度,为基础设施规划提供决策支持。该方法被应用于京津冀鲁区域的高速公路、铁路和航空多方式综合交通网络,研究结果揭示了不同交通方式链路之间替代关联关系的异质性。这种异质性与网络密度和链路通行能力的分布密切相关。

与单一交通网络相比,综合交通网络对链路关联度的提升作用显著。研究结果显示,各区域综合交通网络存在不平衡现象,地理位置因素在一定程度上造成了这种差异,特别是沿海城市更容易受到交通网络发展水平相对滞后的影响。值得关注的是,现有交通网络规划与本文的发现具有一致性,进一步验证了本文研究方法在实际应用中的有效性和实用性。基于链路关联度评估结果,本文分别从综合交通网络布局优化、京津冀协同交通体系建设,以及山东省交通基础设施韧性增强方面提出了具体建议。

本文未对每一对关联链路进行逐一分析,但通过总体性分析和代表性个案研究,揭示了综合交通网络的内在韧性特征。需要说明的是,本文研究方法基于单条链路失效的假设,而实际灾害(如地震、洪水)可能导致多条链路同时失效。未来可从多条链路失效角度探讨综合交通网络的关联度和韧性,并据此提出更全面的韧性增强方案。此外,本文主要从交通基础设施网络布局角度研究链路间的替代关联关系,未来可进一步考虑需求差异性,制定差异化的链路关联度标准,以更好地应对潜在扰动对交通网络的影响。

参考文献:

References:

- [1] 黄建中, 胡刚钰, 石佳宁, 等. 城市交通系统的韧性研究: 概念、特征与议题[J]. 城市规划, 2025, 49(2): 119-130.
HUANG J Z, HU G Y, SHI J N. Research on resilience of urban transportation system: concept, characteristics, and important issues[J]. City planning review, 2025, 49(2): 119-130.
- [2] HE Z D, NAVNEET K, VAN DAM W, et al. Robustness assessment of multimodal freight transport networks[J]. Reliability engineering

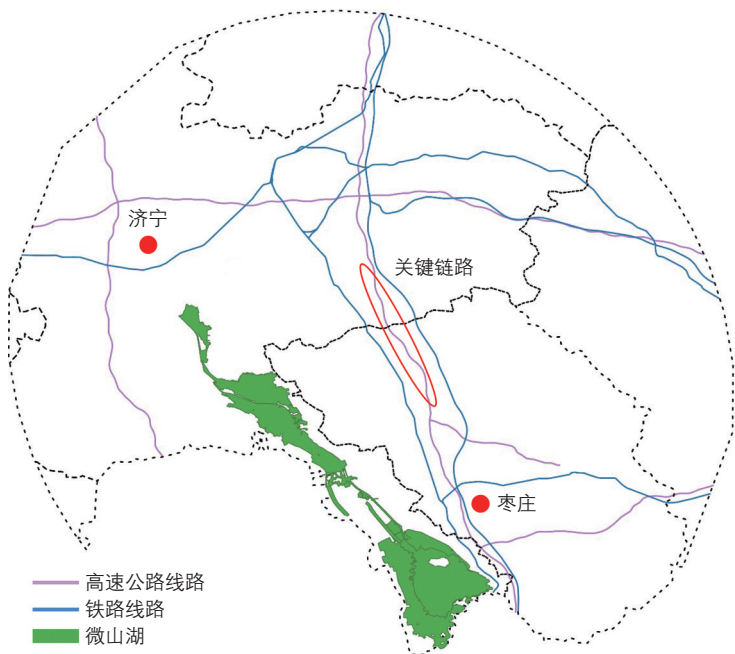


图8 济宁—枣庄综合交通网络

Fig.8 Comprehensive transportation network of Jining-Zaozhuang

- & system safety, 2021, 207: 107315.
- [3] XU P C, LU Q C, XIE C, et al. Modeling the resilience of interdependent networks: the role of function dependency in metro and bus systems[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2024, 179: 103907.
- [4] 孙小慧, 刘毅, 米玉梅, 等. 韧性视角下城市地铁与常规公交网络关键站点及线路识别[J/OL]. 复杂系统与复杂性科学, 2024: 1-9[2024-07-12].
SUN X H, LIU Y, MI Y M, et al. Identification of key stations and routes in urban metro and conventional bus networks from a resilience perspective[J/OL]. Complex systems and complexity science, 2024: 1-9[2024-07-12].
- [5] SHARMA N, GARDONI P. Mathematical modeling of interdependent infrastructure: an object-oriented approach for generalized network-system analysis[J]. Reliability engineering & system safety, 2022, 217: 108042.
- [6] BELLÈ A, ZENG Z G, DUVAL C, et al. Modeling and vulnerability analysis of interdependent railway and power networks: application to British test systems[J]. Reliability engineering & system safety, 2022, 217: 108091.
- [7] RINALDI S M, PEERENBOOM J P, KELLY T K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies[J]. IEEE control systems magazine, 2001, 21(6): 11-25.
- [8] ZIMMERMAN R. Social implications of infrastructure network interactions[J]. Journal of urban technology, 2001, 8(3): 97-119.
- [9] ZHANG P C, PEETA S. A generalized modeling framework to analyze interdependencies among infrastructure systems[J]. Transportation research part B: methodological, 2011, 45(3): 553-579.
- [10] JOHANSEN C, TIEN I. Probabilistic multi-scale modeling of interdependencies between critical infrastructure systems for resilience[J]. Sustainable and resilient infrastructure, 2018, 3(1): 1-15.
- [11] SUN J R, ZHANG Z M. A post-disaster resource allocation framework for improving resilience of interdependent infrastructure network[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2020, 85: 102455.
- [12] HONG S, LYU C, ZHAO T D, et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network[J]. Journal of physics A: mathematical and theoretical, 2016, 49(19): 195101.
- [13] SERDAR M Z, KOÇ M, AL-GHAMDI S G. Urban transportation networks resilience: indicators, disturbances, and assessment methods[J]. Sustainable cities and society, 2022, 76: 103452.
- [14] ZOU Q L, CHEN S R. Enhancing resilience of interdependent traffic-electric power system[J]. Reliability engineering & system safety, 2019, 191: 106557.
- [15] LU Q C, XU P C, ZHAO X M, et al. Measuring network interdependency between dependent networks: a supply-demand-based approach[J]. Reliability engineering & system safety, 2022, 225: 108611.
- [16] FANG C, CHU Y Z, FU H R, et al. On the resilience assessment of complementary transportation networks under natural hazards[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2022, 109: 103331.
- [17] LEURENT F M. Curbing the computational difficulty of the logit equilibrium assignment model[J]. Transportation research part B: methodological, 1997, 31(4): 315-326.
- [18] WANG Z J, XU X D. Assessing route redundancy of freeway networks in mega-city regions[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2022, 106: 103275.
- [19] 徐凤, 朱金福, 陈丹. 基于多层网络的空铁联运双层加权网络结构特性[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(1): 49-56.
XU F, ZHU J F, CHEN D. Structure characteristics of air-rail double-layer weighted network based on multilayer network[J]. Complex systems and complexity science, 2023, 20(1): 49-56.
- [20] 山东省交通运输厅. 山东省综合立体交通网规划纲要(2023—2035年)[EB/OL]. 2023 [2024-07-12]. <http://jtt.shandong.gov.cn//col/col268383/index.html>.
- [21] CHEN S N, GUO J. Climatic risks of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration and their changes[J]. Geomatics natural hazards & risk, 2021, 12(1): 1298-1314.