

中文引用格式:李杰梅,杨颖,张远雄. 中国内陆地区出境交通系统脆弱性特征及障碍因子分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(1):174-181.

英文引用格式:LI Jiemei, YANG Ying, ZHANG Yuanxiong. Analysis of vulnerability characteristics and obstacle factors of outbound transportation systems in China's inland areas[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 174-181.

中国内陆地区出境交通系统脆弱性特征 及障碍因子分析^{*}

李杰梅 教授, 杨 颖, 张远雄

(昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650504)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0824

基金项目:国家自然科学基金资助(72263022)。

【摘 要】 为优化内陆出境交通系统布局,提升跨境运输韧性,构建“敏感性-应对性”双维度评价指标体系,综合集对分析模型、空间马尔可夫链与障碍度模型,系统解析中国内陆 225 个城市的脆弱性动态特征及其驱动机制。结果表明:脆弱性呈现显著的多极分化与空间俱乐部收敛特征,随时间演化脆弱性整体逐年降低,且由两极化向多极化演变,绝对差异减小。脆弱性具有显著空间自相关特征和空间溢出效应,形成“高脆弱性沿边集聚,低脆弱性以城市群为中心扩散”的空间格局,邻域背景通过路径依赖制约脆弱性演化方向,邻域低脆弱性环境可使城市脆弱性向下转移概率提升 64.5%。货运周转量和进出口贸易总额障碍因子的作用逐年减弱;内陆-口岸公路最短旅行时间障碍效应从相对稳定逐渐转为持续上升;城市枢纽等级和连接度对非枢纽城市脆弱性构成显著制约。

【关键词】 内陆地区; 出境交通系统脆弱性; 时空演化; 空间溢出效应; 障碍因子

Analysis of vulnerability characteristics and obstacle factors of outbound transportation systems in China's inland areas

LI Jiemei, YANG Ying, ZHANG Yuanxiong

(School of Transportation Engineering, Kunming University of Technology, Kunming
Yunnan 650504, China)

Abstract: To optimize the layout of the outbound transportation system and enhance system resilience, a "Sensitivity-Response" dual-dimensional evaluation index system was constructed. The comprehensive methods including set pair analysis, spatial Markov chain, and obstacle degree model were used to analyze the dynamic characteristics and driving mechanisms of vulnerability in 225 inland cities in China. The findings reveal that vulnerability demonstrates significant multi-polarization and spatial club convergence. The overall vulnerability decreases annually, evolving from bi-polarization to multi-polarization, with a reduction of absolute difference. Vulnerability exhibits significant spatial auto-correlation and spillover effects, forming a spatial pattern where "high-vulnerability is clustered along the borders, while low-vulnerability diffuses from urban agglomerations". A low-vulnerability neighborhood environment increases the probability of a city's vulnerability transferring downward by 64.5%. The obstructive effects of both

freight turnover volume and total import-export trade value weaken annually. In contrast, the hindering effect of shortest inland-port road travel time shifts from a relatively stable to a consistent increase. Furthermore, city hub level and connectivity impose significant constraints on vulnerability of non-hub cities.

Keywords: inland areas; vulnerability of outbound transportation systems; spatio-temporal evolution; spatial spillover effects; obstacle factors

0 引 言

畅通对内对外开放通道,深度融入共建“一带一路”开放体系是新时期我国内陆地区发展的重大战略。伴随着内陆开放深度和广度的不断推进,出境交通系统的脆弱性问题不断暴露出来,逐渐成为制约内陆开放发展的瓶颈。探索我国内陆地区出境交通系统脆弱性的时空演化特征,定量评价出境交通系统潜在的易受干扰程度和影响脆弱性降低的障碍因素,对于我国内陆地区开放大通道规划和管理,实现出境运输可持续高效运行,推动内陆形成全面开放新格局具有重大意义。

脆弱性指系统对风险事件的承受和恢复能力,常被应用于生态、环境、经济等领域的相关研究^[1]。NICHOLSON 等^[2]指出交通系统具有脆弱属性。BERDICA^[3]将道路运输系统脆弱性定义为易受事件影响而导致道路网服务能力降低的敏感系数。当前对交通系统脆弱性的研究主要集中在 2 个方面:①基于图论从路网拓扑视角构建交通网络抽象模型,模拟突发事件攻击对路网连通性能的影响^[4],通常认为交通网络脆弱性是与网络中的某些部分失效的概率及其所产生的后果相关的^[5]。研究成果包括计算删除节点和边后的网络效能损失^[6-7],建立基于网络节点度的攻击模型^[8]和网络级联失效模型^[9]。研究场景包括:轨道交通网络脆弱性^[10];高速铁路网络脆弱性及其抗毁性^[11-12];海运网络的拓扑特性和脆弱性^[13]。②从交通的需求、供给以及出行行为等多维信息出发,判断交通网络承载力无法满足需求的概率以及灾害发生时系统的易受损程度及可恢复能力^[14]。JENELIUS 等^[15]关注交通系统的使用者及经济社会影响,将交通系统脆弱性指数与出行模式、人口密度等相联系,阐述其地理差异和空间公平。杨超等^[16]提出交通需求脆弱性概念,定量评估在供给与需求同时变化的情况下,交通网络承受异常事件的能力。伴随着国家“一带一路”倡议、国际国内双循环战略等逐步实施,跨境交通网络脆弱性问题引起学者的关注。王诺等^[17]提出研

究海运网络脆弱性变化的定量分析方法。吴迪等^[18]分析集装箱海运丝路网络在蓄意攻击下的脆弱性变化情况及其影响因素。王列辉等^[19]分析中美集装箱航运网络脆弱性。

已有研究大多基于图论的复杂网络分析方法,将交通系统简化为节点与边的拓扑模型,模拟节点或连边失效对网络连通性能或网络效率的冲击,仅关注路网结构的脆弱性评估以及节点中断的后果,忽视了交通环境、货运需求以及社会经济等对交通网络脆弱性的影响。随着我国内陆地区对外开放的深入推进,对出境运输的需求越来越大,出货高峰期的运力短缺问题日益凸显;同时,有别于沿海地区,内陆地区货物出境往往需要“公铁”或“公铁海”等多式联运,由枢纽节点换装服务水平引发的运输时间不确定等问题频繁发生。可见内陆地区出境交通系统脆弱性除受路网结构影响外,还受货运需求、服务能力等多元因素交织影响。鉴于此,笔者拟以我国内陆地区为研究对象,从敏感性与应对能力 2 个维度构建出境交通系统脆弱性评价指标,定量评估系统脆弱性,分析其时空演化及空间溢出效应,识别影响脆弱性降低的关键障碍因子,以期优化内陆地区出境交通设施布局、提升系统韧性提供理论依据。

1 研究区域及数据来源

将内陆地区界定为中国大陆非沿海省份的内陆腹地。根据《中国大百科全书》,以中国行政区划为准,扣除包括辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、台湾、广东、香港、澳门、广西、海南等 14 个沿海省份和个别数据获取困难的城市,选定 225 个地级行政区作为研究样本,时间跨度为 2010—2021 年。

数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》及各省份统计年鉴与发展公报等;涉及高速铁路、铁路、高速公路数据源自《中国交通地图册》,运营时速根据《公路工程技术标准》《铁路线路设计规范》确定。

2 出境交通脆弱性及障碍度分析方法

2.1 出境交通系统脆弱性评价模型

将出境交通系统脆弱性定义为内陆地区因开放经济发展需要的交通活动,由于路径敏感性性质、货运需求压力、自身设施和服务水平有限、政府扶持力度不足等,而使得运输计划或服务水平容易受到损

害或负面影响的状态。

1) 脆弱性指标体系构建。脆弱性是系统在内外扰动下易受损失的内在属性,其程度取决于敏感性与应对性的对比。因此,从敏感性和应对性 2 方面分别构建系统的多因子脆弱性评价指标体系,同时运用熵值法测算各指标权重,结果见表 1。

表 1 出境交通系统脆弱性评价指标体系

Table 1 Vulnerability assessment index system of outbound transportation system

准则层	结构层	指标层	指标含义与属性	权重
敏感性指标	关键路径通行时长	内陆-口岸公路最短旅行时间 S_{21}	反映内陆出境公路可达性(+)	0.089
		内陆-口岸铁路最短旅行时间 S_{22}	反映内陆出境铁路可达性(+)	0.069
	运输通道技术等级	铁路技术水平 S_{23}	反映铁路发展水平(-)	0.044
		高速公路通车里程 S_{24}	反映公路发展水平(-)	0.042
		民航及通用机场数量 S_{25}	反映航空发展水平(-)	0.034
	货运需求	货运周转量 S_{26}	反映货运总需求(+)	0.219
		进出口贸易额 S_{27}	反映出境货运需求(+)	0.238
应对性指标	政府干预	交通运输、仓储邮政业固定资产投资比重 R_{21}	反映交通基础设施建设水平(+)	0.034
		城市交通枢纽等级 R_{22}	反映国家对交通战略支持力度(+)	0.059
	交通供给能力	路网密度 R_{23}	反映城市内部交通的发展程度(+)	0.042
		城市连接度 R_{24}	反映城市对外交通联系便利程度(+)	0.073
		交通工具拥有数 R_{25}	反映城市交通工具供给情况(+)	0.023
	运输服务能力	交通运输、仓储邮政业从业人员数 R_{26}	反映交通运输业人力供给水平(+)	0.022
		互联网普及率 R_{27}	反映交通信息化水平(+)	0.013

注:敏感性指标性质为正(+),说明指标值越大,系统敏感性越大,导致脆弱性越大,反之亦然;应对性指标性质为正(+),说明指标值越大,系统应对能力越强,导致脆弱性越小,反之亦然。

将出境交通系统的敏感性定义为风险扰动下出行主体的出行计划和行为易被改变或影响的程度。一方面,对内陆地区而言,与开放型经济相关的关键陆路运输路径主要有内陆城市与边境口岸相衔接的公路和铁路,其所需通行时间(S_{21} 、 S_{22})越短、承载运输通道技术等级(S_{23} 、 S_{24} 、 S_{25})越高,出行计划及过程更不易受风险事件影响,交通敏感性越低;反之,货运计划及过程更易受到突发事件干扰,造成滞留或行程取消。另一方面,城市货运周转量(S_{26})越大、进出口货运需求量(S_{27})越多,越容易拥堵,交通敏感性越大。

出境交通系统应对性指系统从扰动状态迅速调整到安全稳定状态的能力。一般来说,政府调控力度越大,对城市交通基础设施(R_{21})及交通枢纽规划建设(R_{22})的投资越多,城市交通基础设施越完善,交通风险应对能力越强;城市交通供给能力越强, R_{23} 越高、 R_{24} 越大、 R_{25} 越多,风险事件下出行路径和运输方式灵活度越大,更利于规避或替代风险路径;交通运输业从业人员数(R_{26})越多、 R_{27} 越高,运输服务水平和质量越高,风险应对能力越强。

2) 脆弱性指数测度模型。脆弱性指数测算模型包括优劣解距离法、集对分析法、数据包络分析、神经网络模型等^[20]。集对分析法利用联系度处理不确定性问题,出境交通系统具有多变量相互作用的复杂系统特征,故采用集对分析法进行脆弱性指数测算。其具体模型构建如下:

首先,将出境交通系统脆弱性问题设定为 $\{E, G, W, D\}$ 构成的集合,其中, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, 代表脆弱性评价的 m 个方案; $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, 代表每个评价方案的 n 项指标; $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 代表每个评价指标的权重; D 为各评价指标值 d_{kp} ($k = 1, 2, \dots, n; p = 1, 2, \dots, m$) 构成的评价矩阵。

其次,在同一空间内对比确定各评价指标的最优值 U 和最劣值 V ,则集对 $\{E_k, U\}$ 在区间 $\{V, U\}$ 上的联系度 μ 为:

$$\begin{cases} \mu_{(E_k, U)} = a_k + b_k\alpha + c_k\beta \\ a_k = \sum \omega_k a_{kp} \\ c_k = \sum \omega_k c_{kp} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_{kp} 与 c_{kp} 分别为各评价指标 d_{kp} 的同度和对

立度; ω_k 为第 k 项指标的权重; α 和 β 分别为差异度和对立度系数,其中, $\alpha \in [-1, 1], \beta = -1$ 。

最后,用 r_k 指数衡量待评价方案 E_k 与最优方案之间的关联程度。

$$r_k = \frac{a_k}{a_k + c_k} \tag{2}$$

式中 r_k 反映系统脆弱性大小, r_k 越小,脆弱性越低,系统越稳健,反之系统越脆弱。

2.2 空间马尔可夫模型

采用空间马尔可夫链揭示不同脆弱性类型城市在不同邻域背景下的空间演化方向和转移概率。

$$M_{ij,t+1}(k) = M_{ij,t}(k) \times N \times W_k; M_{ij,t} = \frac{n_{ij}}{n_i} \tag{3}$$

式中: $M_{ij,t+1}(k)$ 、 $M_{ij,t}(k)$ 分别为 $t+1$ 、 t 年,第 k 种类型的概率转移矩阵; W_k 为空间权重矩阵; N 为 $K \times K$ 阶转移矩阵; $M_{ij,t}$ 为 t 年到 $t+1$ 年某城市由 i 状态转变为 j 状态的概率; n_{ij} 为研究期内脆弱性由 t 年的

i 状态转变为 $t+1$ 年的 j 状态的所有空间单元数量之和; n_i 为脆弱性为 i 状态的所有单元数之和。

2.3 障碍度分析模型

障碍度模型用于识别影响出境交通系统脆弱性的主要障碍因子及其影响程度大小,如下式:

$$A_{ij} = \frac{w_{ij}d_{ij}}{\sum_{i=1}^n w_{ij}d_{ij}} \times 100\%; d_{ij} = 1 - y_{ij} \tag{4}$$

式中: A_{ij} 为指标层指标 i 障碍度; w_{ij} 为指标 i 的权重值; d_{ij} 为指标与最大目标之间的差距,设为指标标准化值与 1 的差距; y_{ij} 为指标 i 的标准值。

3 出境交通系统脆弱性时空演化特征

3.1 脆弱性时序演化特征

基于式(1)—式(2),测算 2010—2021 年中国内陆地区出境交通系统的敏感性、应对性、脆弱性指数,结果见表 2。

表 2 中国内陆地区出境交通系统脆弱性、敏感性、应对性指数

Table 2 Vulnerability, sensitivity and responsiveness indices of outbound transportation systems in China's inland areas

指数	年份											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
敏感性	0.581	0.573	0.566	0.552	0.538	0.521	0.507	0.495	0.483	0.458	0.444	0.429
应对性	0.352	0.365	0.375	0.387	0.399	0.411	0.423	0.435	0.448	0.461	0.476	0.490
脆弱性	0.607	0.597	0.590	0.576	0.563	0.548	0.534	0.522	0.510	0.490	0.475	0.461

中国内陆地区出境交通系统敏感性指数持续下降,应对性逐年上升,系统脆弱性显著改善,从 2010 年的 0.607 降至 2021 年的 0.461,年均降幅 2.19%。其中,2013—2021 年间敏感性和脆弱性的年均降幅分别为 3.18% 和 2.82%,显著高于 2010—2013 年间的 1.67% 和 1.68%。这一演变趋势反映了我国出境交通系统发展的 2 个显著特点:①出境交通基础设施建设的有效性。在我国经济高速增长、对外贸易繁荣的背景下,交通基础

设施建设能够较好地满足不断增长的出境货运需求,推动脆弱性不断降低。②政策驱动效应明显。随着“一带一路”倡议以及国家综合交通骨干通道建设的推动,内陆城市的内部路网、城际交通、出境通道等建设取得显著成效,大幅改善了系统脆弱性。

进一步运用核密度揭示中国内陆地区出境交通系统敏感性、应对性和脆弱性的时序动态演化特征和区域差异,如图 1 所示。

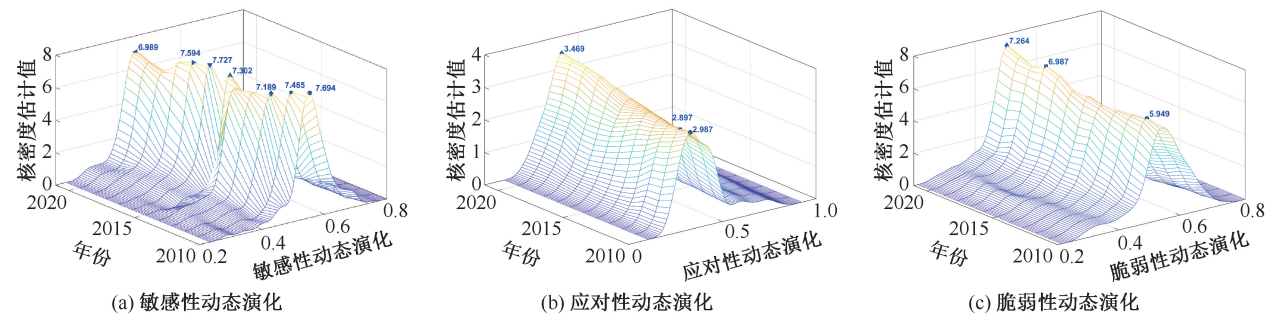


图 1 系统敏感性、应对性和脆弱性的动态演化

Fig. 1 Dynamic evolution of sensitivity, responsiveness and vulnerability of systems

由图 1 可知：①敏感性方面,核密度曲线始终呈现多峰,主峰左移且宽度无明显变化,表明敏感性呈现多极化趋势,绝对差异变化不明显,右侧拖尾拓宽表明敏感性相对较高的城市占比增大。②应对性方面,核密度曲线始终呈 3 峰状态,且主峰右移、峰高上升、宽度变窄,右侧拖尾收敛明显,说明应对性持续提高且绝对差异减小,应对性相对较高的城市占比减小。③脆弱性方面,核密度曲线由双峰变为多峰,主峰左移且峰高上升,表明脆弱性由两极化向多极化演变,总体差异逐渐增大,绝对差异减小,左右拖尾逐渐拓宽和收敛的现象说明远低于和远高于

平均脆弱性水平的城市比例分别增加和减少。综上,敏感性和脆弱性存在多极化发展态势,内部差异加剧;而应对性呈现趋同性改善,反映出我国交通建设的普惠性。

3.2 出境交通系统脆弱性空间演化特征

3.2.1 敏感性-应对性空间演化特征

系统脆弱性是敏感性与应对性共同作用的结果,为更直观地揭示分类区域的空间分布和演化特征,将区域类型划分为高敏感性-高应对性、低敏感性-高应对性、低敏感性-低应对性、高敏感性-低应对性 4 种类型,并进行空间可视化表达,如图 2 所示。

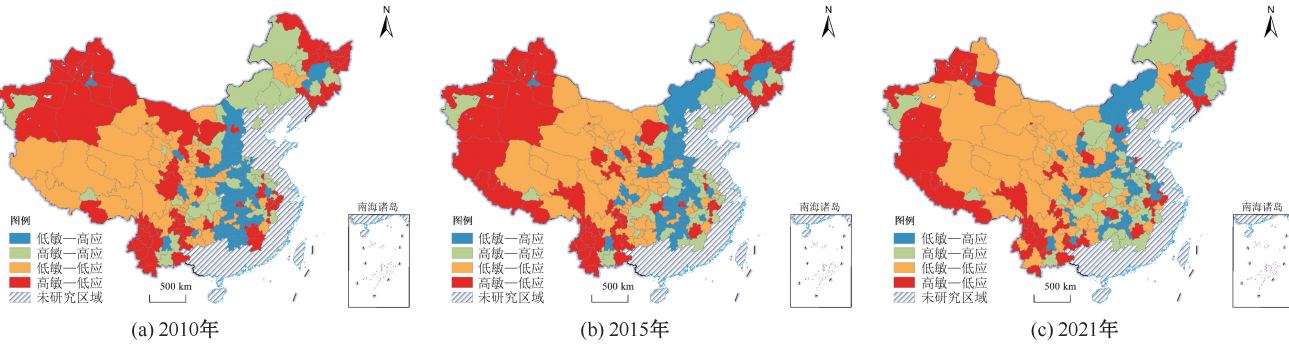


图 2 系统敏感性-应对性 4 种组合类型的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of four combination types of sensitivity-responsiveness

由图 2 可知：①低敏感性-高应对性城市集中分布于中部地区,沿内蒙古呼和浩特至湖南郴州一线呈带状连片分布,在省会城市有零星分布。2021 年此类城市空间分布连片特征减弱。②高敏感性-高应对性城市 2010 年在东北、内蒙古、安徽西南等地存在小片分布,2021 年除东北地区外,长江中游、黄河中游、成渝、滇中等城市群内也呈连片分布。③低敏感性-低应对性城市在西部成片集中,东部则相对分散。④高敏感性-低应对性城市沿边集聚特征明显。

3.2.2 脆弱性的空间分布和关联特征

对中国内陆 225 个地级市出境交通系统脆弱性的全局空间自相关分析,表明中国内陆城市出境交通系统脆弱性具有显著的空间正相关性和集聚特征。进一步通过 ArcGIS 聚类和异常点分析进行局部空间自相关分析,如图 3 所示。图中 H-H 型指高脆弱性单元与高脆弱性单元集聚类型,L-L 型指低-低集聚类型,H-L 型指高-低集聚类型,L-H 型指低-高集聚类型。

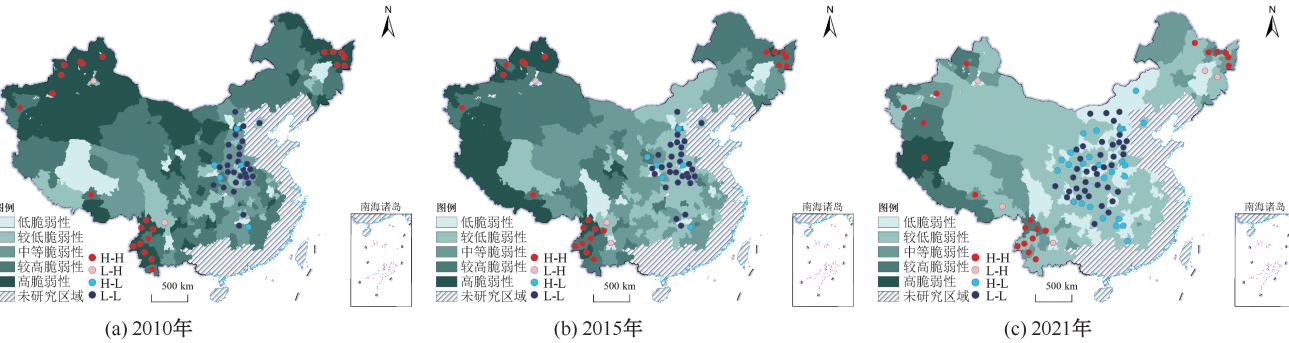


图 3 系统脆弱性空间集聚类型分布

Fig. 3 Spatial distributions of agglomeration types of outbound transportation system vulnerability

由图 3 可知：

1) 高脆弱性城市沿边集聚,逐渐呈现两极一弧

的空间格局。2010 年,高脆弱性城市主要分布于吉林、内蒙古、云南等边疆省份,中部地区有零星分布。

随后内蒙古、贵州等省份多数城市及其他边疆省份的非沿边城市逐步退出高脆弱性行列,而西藏边境城市的脆弱性加剧上升。至 2021 年,形成以云南西北部 and 黑龙江东部为“两极”、沿新疆、西藏边境带状区域为“一弧”的格局,该分布与 H-H 型热点区高度吻合,反映出高脆弱性区域的集群化特征。

2) 低脆弱性城市以城市群为中心向外扩散。2010 年低脆弱性城市只有省会及直辖市,之后逐步向周边扩展。到 2021 年,山西中部、中原、关中平原、长江中游和成渝等城市群内多数城市已达到较低脆弱性水平,显示出城市群发展对脆弱性降低的积极影响。从 L-L 型冷点区分布来看,其范围由初期的河南、山西逐步向西、向南扩展至上述城市群。同时,H-L 型异常点在冷点区外围增多,反映出城市群对周边地区具有辐射带动作用,促进更大范围低脆弱性区域的形成。

4 出境交通系统脆弱性的溢出效应

基于式(3)计算中国内陆地区出境交通系统脆弱性的传统马尔可夫概率转移矩阵,结果见表 3。

表 3 系统脆弱性类型传统马尔可夫转移概率矩阵
Table 3 Traditional Markov transfer probability matrix for vulnerability of system

脆弱性等级	低	中	较高	高
低	0.986	0.014	0.000	0.000
中	0.110	0.886	0.001	0.000
较高	0.000	0.014	0.747	0.005
高	0.000	0.000	0.221	0.775

由表 3 可知:①转移概率矩阵对角线上的数值最小为 0.737(大于 0.5),说明各城市脆弱性类型保持不变的概率在 73.7%以上,各脆弱性类型的城市都更趋向于保持不变,脆弱性水平分布相对稳定。②低水平脆弱性对角线上数值最大,表明低脆弱性类型城市保持自身发展类型不变的概率最大,即低脆弱性水平趋同俱乐部的稳定性最大。③对角线两侧都存在大于 0 的数值,且左侧数值明显大于右侧数值,说明脆弱性类型主要以向下转移为主,且大多发生在相邻水平。

在传统马尔可夫转移概率矩阵中加入空间滞后条件,构建空间马尔可夫概率转移矩阵,见表 4。

由表 4 可知:主对角线的数值均在 0.5 以上,说明无论邻接单元脆弱性类型为哪一类,城市脆弱性仍然趋向于保持不变。但对比表 3 发现,在不同的邻接条件下,出境交通系统脆弱性类型的转移概率

表 4 系统脆弱性类型空间马尔可夫转移概率矩阵
Table 4 Spatial Markov transfer probability matrix for vulnerability of systems

邻接类型	脆弱性等级	低	中	较高	高
低	低	1.000	0.000	0.000	0.000
	较低	0.182	0.818	0.000	0.000
	中等	0.000	0.400	0.000	0.000
	较高	0.000	0.000	0.720	0.000
	高	0.000	0.000	0.370	0.601
中	低	1.000	0.000	0.000	0.000
	较低	0.121	0.877	0.000	0.000
	中等	0.000	0.378	0.000	0.000
	较高	0.000	0.079	0.719	0.000
	高	0.000	0.000	0.400	0.600
较高	低	0.900	0.100	0.000	0.000
	较低	0.058	0.923	0.000	0.000
	中等	0.000	0.132	0.019	0.000
	较高	0.000	0.000	0.801	0.010
	高	0.000	0.000	0.194	0.806
高	低	1.000	0.000	0.000	0.000
	较低	0.040	0.940	0.000	0.000
	中等	0.000	0.000	0.000	0.000
	较高	0.000	0.000	0.962	0.000
	高	0.000	0.000	0.102	0.898

发生了明显的变化。具体来看,与低、较低脆弱性水平的城市邻接,其向下转移的概率增加,而与高、较高脆弱性水平的城市邻接时,其脆弱性类型向下转移的概率降低。表明城市脆弱性类型演化受到邻接城市空间溢出效应的影响,具有路径依赖性。

5 出境交通系统脆弱性的障碍因子

基于障碍度模型式(4),计算各指标的障碍度。发现进出口贸易总额、货运周转量、内陆-口岸公路最短旅行时间、连接度及城市枢纽等级是脆弱性降低的主要障碍因素,其累计障碍度占比超过 54%,能够有效解释出境交通系统脆弱性的主要阻碍因素。因此,仅列出障碍度指数排名前 5 的障碍因子,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,
1) 进出口贸易总额与货运周转量是首位障碍因子,其障碍作用逐年下降。2013 年前二者障碍度占比最大,分别为 14.8%和 12.7%,2021 年二者障碍度分别降至 14.1%和 11.9%。这一转变揭示了大规模货运需求在初期可能加剧系统脆弱性,但长期货运需求压力将转化为驱动应对性提升的动力,触发供给能力优化实现脆弱性缓解。

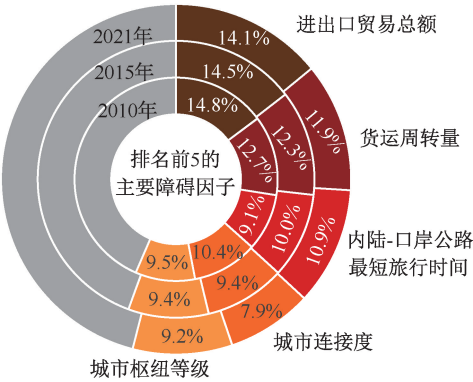


图4 出境交通系统脆弱性主要障碍因子

Fig.4 Main obstacle factors of outbound transportation system vulnerability

2) 内陆-口岸公路最短旅行时间的障碍度持续上升,2021 年成为第 3 大障碍因子。公路运输是内陆地区货物出境的重要运输方式,自 2013 年后我国内陆地区的进出口贸易规模不断扩大,使得公路货物出境运输需求急剧增长。相对滞后的交通基础设施供给无法与高需求匹配,导致内陆-口岸公路最短旅行时间的障碍度越来越高。

3) 连接度与城市枢纽等级的障碍度虽呈下降趋势,但仍对中西部非省会城市和沿边地区构成显著制约。这些地区受地理与制度双重约束,交通设施建设成本高、国家路网建设落地率低、断头路问题突出,形成“低效投资-供给不足”的恶性循环。

6 结 论

1) 我国内陆地区出境交通系统脆弱性的时空

演化受到政策驱动与空间溢出的双重影响。从时间来看,2010—2021 年间脆弱性指数年均下降 2.19%。政策驱动下的交通投资增长是脆弱性改善的核心动因,2013 年后应对性指数年均提升 4.5%,显著抵消需求压力,加速脆弱性降低。从空间来看,沿边地区在供需动态失衡、网络拓扑缺陷及空间溢出的复合约束下,脆弱性持续高位;而中东部城市通过多枢纽协同与网络结构优化实现了脆弱性降低。需要实施区域精准治理,破解“孤岛效应”与强化“网络韧性”。

2) 中国内陆出境交通系统脆弱性呈现显著的空间正相关性和集聚特征,存在“俱乐部收敛”现象。邻域背景对当地脆弱性的转移存在显著的空间溢出效应,导致城市脆弱性类型发展的路径依赖。要建立跨区域的经济、交通合作机制,打破城市间空间壁垒,以周边低脆弱性城市带动本地出境交通系统发展。

3) 障碍因子分析揭示,货运周转量与进出口贸易总额作为首要障碍,其影响逐年减弱,表明由需求压力引发的脆弱性可通过长期供给优化得以缓解;内陆-口岸公路最短旅行时间的障碍作用持续增强;城市枢纽等级与连接度的障碍作用则呈现空间异质性,障碍效应较大的区域集中在相对落后地区和沿边地区。障碍因子的分布与脆弱性的空间溢出效应高度关联,须通过跨区域资源调配以打破路径依赖。因此,应重点加强交通联动与枢纽建设,拓展内陆-口岸主通道能力,并创新政策工具以实现供需动态匹配。

参 考 文 献

[1] SPAANS M, WATEROUT B. Building up resilience in cities Worldwide-rotterdam as participant in the 100 resilient cities programme[J]. Cities, 2017, 61: 109-116.

[2] NICHOLSON A, DU Zhenping. Degradable transportation systems: an integrated equilibrium model[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1997, 31(3): 209-223.

[3] BERDICA K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy, 2002, 9(2): 117-127.

[4] DUAN Yingying, FENG Lu. Robustness of city road networks at different granularities[J]. Physica A: Statistical Mechanics & its Applications, 2014, 411: 21-34.

[5] 尹洪英, 徐丽群. 道路交通网络脆弱性评估研究现状与展望[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(3): 7-13.

YIN Hongying, XU Liquan. Vulnerability assessment of transportation road networks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(3): 7-13.

[6] 杨露萍, 钱大琳. 道路交通网络脆弱性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(1): 105-110.

YANG Luping, QIAN Dalin. Vulnerability analysis of road networks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(1): 105-110.

[7] TAYLOR M A P. Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of regional road networks[J]. Transportation

- Research Part A: Policy & Practice, 2012, 46(5): 761-771.
- [8] 吴泓润, 覃俊, 郑波尽. 基于代价的复杂网络抗攻击性研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(8): 224-227.
WU Hongrun, QIN Jun, ZHENG Bojin. Anti-attack ability bases on costs in complex networks[J]. Computer Science, 2012, 39(8): 224-227.
- [9] 段东立, 吴俊, 邓宏钟, 等. 基于可调负载重分配的复杂网络级联失效模型[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 203-208.
DUAN Dongli, WU Jun, DENG Hongzhong, et al. Cascading failure model of complex networks based on tunable load redistribution[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(1): 203-208.
- [10] 李大愚, 高光锐. 城市地铁网脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 157-161.
LI Dayu, GAO Guangrui. Analysis of vulnerability of urban metro network[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(3): 157-161.
- [11] ZHANG Jianhua, HU Funian, WANG Shuliang, et al. Structural vulnerability and intervention of high-speed railway networks-science direct[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 462: 743-751.
- [12] 于宝, 冯春, 朱倩, 等. 中国高速铁路网络脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(9): 110-115.
YU Bao, FENG Chun, ZHU Qian, et al. Vulnerability analysis of China's high-speed railway network[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(9): 110-115.
- [13] 张欣, 李双菲, 孙代源. 中欧集装箱海铁复合运输网络脆弱性分析[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(3): 48-58.
ZHANG Xin, LI Shuangfei, SUN Daiyuan. Vulnerability analysis of China-Europe container seal-rail intermodal transport network[J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2023, 41(3): 48-58.
- [14] MATTSSON L, JENELIUS E. Vulnerability and resilience of transport systems: a discussion of recent research[J]. Transportation Research Part A: Policy & Practice, 2015, 81: 16-34.
- [15] JENELIUS E, MATTSSON L. Road network vulnerability analysis: conceptualization, implementation and application[J]. Computers, Environment & Urban Systems, 2015, 49: 136-147.
- [16] 杨超, 涂颖菲, 陈小鸿. 交通网络需求脆弱性分析及应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(9): 1 329-1 332, 1 341.
YANG Chao, TU Yingfei, CHEN Xiaohong. Demand vulnerability analysis of transportation network and its application[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2012, 40(9): 1 329-1 332, 1 341.
- [17] 王诺, 董玲玲, 吴暖, 等. 蓄意攻击下全球集装箱海运网络脆弱性变化[J]. 地理学报, 2016, 71(2): 293-303.
WANG Nuo, DONG Lingling, WU Nuan, et al. The change of global container shipping network vulnerability under intentional attack[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(2): 293-303.
- [18] 吴迪, 王宇鹏, 盛世杰, 等. “21 世纪海上丝绸之路”集装箱海运网络的脆弱性变化[J]. 地理学报, 2022, 77(8): 2 067-2 082.
WU Di, WANG Yupeng, SHENG Shijie, et al. Vulnerability changes of the maritime silk road container shipping network under intentional attacks[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(8): 2 067-2 082.
- [19] 王列辉, 叶斐, 郑渊博. 中美集装箱航运网络格局演化与脆弱性评估[J]. 经济地理, 2020, 40(5): 136-144.
WANG Liehui, YE Fei, ZHENG Yuanbo. The assessment of Sino-US container shipping network evolution and vulnerability[J]. Economic Geography, 2020, 40(5): 136-144.
- [20] 杨晴青, 刘倩, 尹莎, 等. 秦巴山区乡村交通环境脆弱性及影响因素: 以陕西省洛南县为例[J]. 地理学报, 2019, 74(6): 1 236-1 251.
YANG Qingqing, LIU Qian, YIN Sha, et al. Vulnerability and influencing factors of rural transportation environment in Qinling-Daba mountainous areas: a case study of Luonan county in Shaanxi province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(6): 1 236-1 251.

作者简介: 李杰梅 (1975—), 女, 云南大理人, 博士, 教授, 主要从事物流系统规划、交通网络建模与仿真、区域经济学方面的研究。E-mail: lijie mei@kust.edu.cn。

