

引用格式:郭倩倩, 张志斌, 马晓敏, 等. 西北地区城市网络结构韧性测度及其优化策略[J]. 资源科学, 2024, 46(8): 1636–1650.
[Guo Q Q, Zhang Z B, Ma X M, et al. Evaluation and optimization strategy of resilience of urban network structures in northwest China[J]. Resources Science, 2024, 46(8): 1636–1650.] DOI: 10.18402/resci.2024.08.13

西北地区城市网络结构韧性测度及其优化策略

郭倩倩, 张志斌, 马晓敏, 赵学伟

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要:【目的】城市网络结构韧性是城市空间组织恢复力与稳定性的重要保障,当前研究多采用单一要素流且聚焦发达地区,而结合多维要素流同时关注欠发达地区网络结构韧性的成果相对较少,因此,本文以欠发达的西北地区为研究对象,并基于多维要素流探究其网络结构韧性,以期弥补相关研究在地域上的留白,并丰富多维要素流视角下网络韧性的实证分析。【方法】以西北地区51个地级行政单元为研究对象,从经济、交通、信息3个视角入手探究2022年西北城市网络的结构特征,定量测度其层级性、匹配性、传输性和集聚性,进而利用计算机仿真模拟研究中断场景下西北城市网络结构韧性,据此提出优化策略。【结果】①西北51个地级行政单元的经济、交通、信息网络总体呈“东密西疏”的分布格局,网络具有“核心-边缘”特点,但3类网络结构存在明显差异。经济网络密度较小、核心节点间的粘性较大,呈现出“以强带弱”与“强强联合”共存的特征、“多组团”格局和“片态化”发展态势;交通网络联系较为紧密,城际联系惯性较强,呈现出“小世界”效应、“纺锤型”格局和“素态化”发展态势;信息网络具有广覆盖性和强渗透性,呈现出协调性特征、“条带状”格局和“湍态化”发展态势。②3类网络的层级性和匹配性差异较大,传输性和集聚性差异较小。经济网络“马太效应”明显,呈现出核心强同配性和边缘弱异配性特征;交通网络趋于立体化发展,表现出小范围“健壮性”和“脆弱性”;信息网络具有高异配韧性,表现出网络结构扁平化和联系路径多元化特征。③蓄意攻击对网络韧性的破坏力显著高于随机攻击,对比脆弱节点,核心节点遭受打击对网络运转效率具有更大影响。【结论】区域发展不均衡的问题在欠发达地区尤为明显,核心城市“权力”集中但辐射半径较短,位于边缘的城市发展动力不足。3类网络之间的韧性特征同中存异,不同攻击模式下网络韧性具有阶段性变化特征。为促进区域可持续发展,应针对区域特性制定应对政策。

关键词:要素流;城市网络结构;韧性评估;中断模拟;优化策略;引力模型;西北地区

DOI: 10.18402/resci.2024.08.13

1 引言

“韧性”(resilience)源于拉丁词“resilio”,指系统遭受外部冲击后恢复至原始稳态的能力^[1]。1973年Holling^[2]将韧性的概念引入生态学领域,用以表征稳定状态下的生态系统特征。随后韧性的研究范围逐渐从生态系统向社会-生态系统扩展,其实践领域则向城乡规划学、地理学、社会学、经济学等延伸,内涵不断得到丰富,但其核心要义仍是系统抵御、吸收、适应不确定风险的能力^[3]。20世纪50年

代以来,随着城市的不断扩张,内部危机与外部扰动产生的各种不确定风险成为制约城市安全和可持续发展的重要障碍^[4],这些风险不仅包括经济衰退、恐怖袭击以及SARS和COVID-19传播等人为灾难,也包括能源危机、气候变化等自然不可抗冲击。面对诸如“黑天鹅”和“灰犀牛”等各类危机,如何“让城市更有韧性”成为当下热议的话题^[5]。在这一大环境下,学者们提出了“韧性城市”(resilient cities)这一概念,并定义为“城市凭借自身抵御灾害,

收稿日期:2023-11-27;修订日期:2024-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41161028;41961029)。

作者简介:郭倩倩,女,甘肃平凉人,博士研究生,研究方向为城市与区域规划。E-mail: nwnugqq@163.com

通讯作者:张志斌,男,甘肃会宁人,博士,教授,研究方向为城市与区域规划。E-mail: zbzhang@nwnu.edu.cn

2024年8月

承受冲击,减轻损失,并合理调配资源以从中恢复的综合能力”^[6]。纵观当今社会,要素的频繁流动打破了城市的孤立状态,世界由相对割裂的地域空间向多极化、多层次的网络空间转变^[7],而网络化的模式在促进要素流转、丰富传播途径的同时,也产生了链路故障、级联失效等风险。可见城市多途径、高关联的“蓬勃发展”应与安全性、可持续的“居安思危”并重,因此,如何评估并增强城市网络韧性成为推进城市高质量发展和促进区域协作交流面临的新课题。

在信息化和经济全球化的大背景下,区域发展机制和模式趋于多元,以等级规模为核心的中心地模式向开放、流动、多中心的网络化模式转变,“流动空间”正悄然替代“传统空间”,城市网络作为一种新的城市地域系统组织形式和研究范式被广泛关注^[8-11],而网络化的模式在为区域带来联动机制和协同效应的同时,也伴随着不可预知的风险和挑战。提升网络抵御、消解、适应不确定风险的能力,建设韧性城市网络,是当下保障城市安全和实现高质量发展的必然要求^[12]。西方学者研究发现,城市网络结构与区域韧性密切相关^[13],网络结构差异对区域功能和韧性产生直接影响^[14],因此,“城市网络韧性”逐渐成为地理学、城市规划学等领域的新方向。

Reggiani等^[15]最早引入韧性概念探究经济发展趋缓时期各区域呈现不同状态的原因,随后,韧性概念在城市网络研究中扩展开来。①从主要内容来看,由于网络韧性的研究框架仍处于完善阶段,导致相关成果以理论探索居多,而从网络结构层面展开韧性评估的实证研究较少,且对城际关系与空间细节的披露不足。如Kazemian等^[16]基于网络视角提出供应链韧性评估框架;Fan等^[17]提出了一种评估多路复合网络韧性的方法;Safaei等^[18]探讨了潜在故障和节点寿命对小世界网络韧性的影响,并凝练出综合评估静态网络和动态网络韧性的框架;谢永顺等^[1]构建了城市网络结构韧性演化的评价模型;李东泉等^[19]探究了行动者网络理论对韧性研究的适应性。②从要素选择来看,当前研究以单一要素居多,涵盖经济、交通、信息等各个层面,而基于多维要素展开韧性评估的研究相对较少,且主要集

中在经济相对发达的地区。如Rogov等^[20]评估了俄乌冲突后俄罗斯的经济韧性;Mackawa等^[21]探究了大地震后日本高速公路网络的韧性特征以及中断道路对社会活动恢复速度的影响;冯怡等^[22]则基于金融、信息、交通和知识的多维网络视角,探讨了长江经济带城市群网络结构韧性的演变特征。③从研究区域来看,学者们多关注全国、发达地区或一线城市等较大尺度或经济发展条件较好的地区,而针对欠发达地区的实证研究较少。如Shutters等^[23]探究了大萧条后美国经济网络韧性;何瑶等^[24]通过中断模拟评估外界冲击下中国航运网络结构韧性的变化特征;滕堂伟等^[25]探究了长江经济带技术网络与城市经济韧性间的相互作用关系;王彦开等^[26]以广州市为案例,考察了企业交易视角下城市供应网络韧性的影响因素。整体而言,虽然国内城市网络结构韧性研究已取得一定进展,但仍滞后于城市体系发展的现实诉求^[1]。

基于此,本文结合复杂网络理论和计算机仿真模拟方法,测度西北地区的网络结构韧性并提出优化策略。首先,以西北地区51个地级行政单元为研究对象,希望弥补韧性研究在欠发达地区的地域留白;其次,选取2022年的社会统计数据、交通数据和百度搜索数据结合相关模型构建经济、交通和信息多维城市网络图谱,从层级性、匹配性、传输性和集聚性入手定量测度城市网络结构韧性,实证检验综合视角下西北地区面临的多重困境;进而通过中断模拟评估分析外界冲击下网络结构韧性特征,旨在揭示网络结构韧性的动态变化特征和不同城市的功能差异;最后,提出优化策略,以期制定相关发展规划提供借鉴。

2 研究区域、数据来源和研究方法

2.1 研究区域

21世纪的国际关系和政治经济格局发生了重大变革,“一带一路”倡议、“西部大开发”“西部陆海新通道”等国家行动以及“陆海内外联动、东西双向互济”的新开放格局使得中国发展的重心逐步由东部沿海向西北内陆纵深推进,西北地区在全球和国家尺度的地缘政治地位有了质的提升,成为中国参与全球竞争的“地缘根基”、保障国家安全的纵深区域以及连接发达地区与欠发达地区的核心纽带^[27]。

因此,持续提升其应对外部冲击的能力十分必要;西北地区地域辽阔,国土面积308.01万km²,占全国的32.08%,但人口总量并不多,2022年常住人口10358万人,仅占全国总人口的7.34%,根据国家标准结合常住人口数量划分城市规模,包括1个特大城市,8个I型大城市,25个II型大城市,7个中等城市,10个小城市(图1)。受复杂多样的地貌类型和干旱少雨的气候影响,西北地区地质灾害和气象灾害多发,单位面积产出能力不高,2022年地区生产总值仅占全国总量的5.59%。不论是在生态与国防,还是在社会与经济方面,均与东部地区形成鲜明对比。敏感的地理区位、脆弱的生态环境和复杂的民族构成共同造就了特殊的“西北情境”,使其成为有效推进中国式现代化、全面实现第二个百年奋斗目标必须攻克的“地域堡垒”。可见,切实推进其高质量发展非常迫切。

2.2 网络构建与数据来源

城市网络构建是进行韧性评估的前提。本文将生态作为区域本底^[28],从经济、工程、社会3个领域出发,构建经济网络、交通网络和信息网络。具体方法如下。

(1)经济网络。利用改进的引力模型构建经济网络,公式如下:

$$E_{ab} = (K_a \cdot K_b) / d_{ab}^2 \quad (1)$$

式中: E_{ab} 为城市 a 和 b 的经济联系强度; K_a 和 K_b 为城市 a 和 b 的外向功能量; d_{ab} 为两城市间的直线距离。

参考彭翀等^[29]、魏石梅等^[30]、冷炳荣等^[31]选择城市从业人口的区位熵、第二、三产业所涵盖19项职业门类的就业人数以及人均地区生产总值计算外向功能量,具体计算方法参考冷炳荣等^[31]。其中,城市从业人口数据来源于2022年各省统计年鉴和中国城市统计年鉴;两城市间的直线距离由百度地图(<https://map.baidu.com>)测得。

(2)交通网络。结合西北地区的主要交通联系方式,选择铁路和公路构建交通网络,公式如下:

$$T_{ab} = R_{ab} \cdot \left(\sqrt{P_a N_a} \cdot \sqrt{P_b N_b} \right) / M_{ab}^2 \quad (2)$$

$$R_{ab} = 1/2 \left[(U_a + U_b) / U + (V_a + V_b) / V \right] \quad (3)$$

式中: T_{ab} 为 a 、 b 两城市的交通联系强度; P_a 和 P_b 为表示两城市的经济活动人口数; N_a 和 N_b 为两城市的GDP; M_{ab} 为两城市公路和铁路里程之和; R_{ab} 为 a 、 b 两城市的交通联系系数; U_a 、 U_b 为城市 a 、 b 的公路和铁路客运总量; V_a 、 V_b 为货运总量; U 和 V 则为西北各节点城市客、货运量的均值。其中,统计数据来源于2022年西北各省统计年鉴和中国城市统计年鉴,公路和铁路里程分别在百度地图(<https://map.baidu.com>)和火车票网(<http://www.huochepiao.com/licheng/>)查询得到。

(3)信息网络。采用城市间关注度的乘积^[32]构建信息网络,公式如下:

$$I_{ab} = A_b \cdot B_a \quad (4)$$

式中: I_{ab} 为 a 、 b 两城市的信息联系强度; A_b 和 B_a 分别

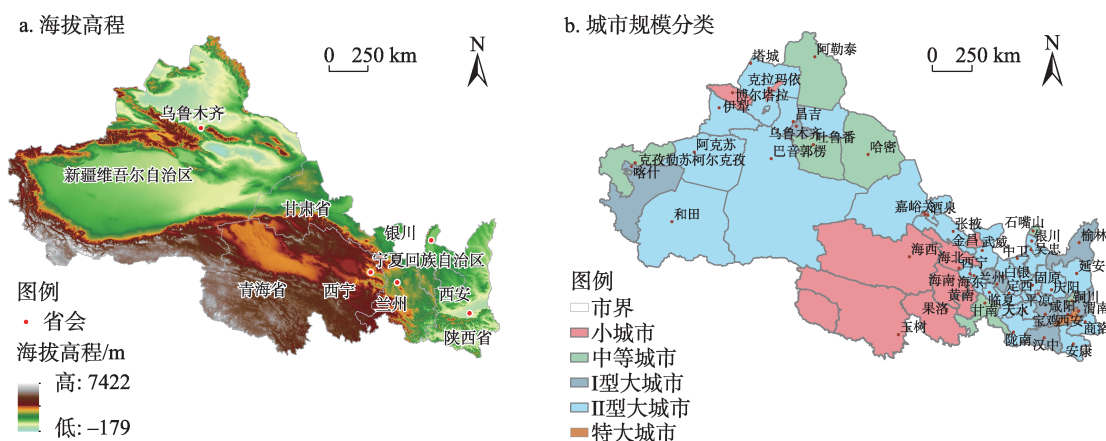


图1 研究区范围

Figure 1 The study area

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图边界无修改。

2024年8月

为 a 对 b 城市和 b 对 a 城市百度关注度的日均值。数据来源于百度指数官网(<http://index.baidu.com>),包括2022年51个地级行政单元两两之间电脑端搜索指数和移动搜索指数的日均值。

2.3 测度指标与方法

2.3.1 网络结构特征评估指标

(1)网络密度。反映网络中要素联系的紧密程度,其值越大,要素交流越频繁,网络联系越紧密^[33]。

$$D = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n X_{ab} / n(n-1) \quad (5)$$

式中: D 为网络密度; n 为城市数目; X_{ab} 为城市 a 与 b 的关系量,在经济网络中表达为 E_{ab} ,交通网络中表达为 T_{ab} ,信息网络中表达为 I_{ab} 。

(2)中心度。判断城市连接能力强弱的指标,度值越大节点连接能力越强^[34]。

$$H_a = \frac{\sum_{b=1}^n X_{ab}}{n-1} \quad (6)$$

式中: H_a 为城市 a 的中心度。

2.3.2 网络结构韧性评估指标

目前,网络结构韧性的评估尚处于探索阶段,借鉴相关研究成果^[30,35],从以下4个层面进行西北城市网络结构韧性评估(图2)。

(1)层级性:利用度分布反映节点度值的层级特征。较高的层级性在凸显高层级城市核心地位的同时也导致了其他城市的路径依赖,当核心节点受到攻击时,低层级城市失去支撑,整体网络韧性水平降低。

$$\ln H_a = \ln W + \theta \ln H_a^* \quad (7)$$

式中: H_a^* 为 H_a 的位序, θ 为度分布幂律曲线的斜率,斜率越大,层级性越明显; W 为常数。

(2)匹配性:利用度关联表征网络中节点的链接偏好和相关程度。若节点倾向于同质“抱团”,说明网络具有同配性,反之具有异配性。同配网络联系路径相对固化,当外界发生扰动时具有较差的适应性和变通能力,网络韧性水平较低;异配性越高,节点联动越灵活,网络韧性水平越高。

$$\overline{H}_a = C + \lambda H_a \quad (8)$$

式中: \overline{H}_a 为与 a 城市发生联系的所有节点中心度的均值; λ 为度关联系数。

(3)传输性:利用平均路径长度表征要素的流转能力。较小的平均路径长度说明网络具有较好的连通性、易达性以及较高的要素传输效率,代表网络具有较高的韧性水平。

$$R = \frac{1}{1/2n(n+1)} \sum_{a \geq b} d_{ab} \quad (9)$$

式中: R 为平均路径长度。

(4)集聚性:综合局部聚类系数和平均聚类系数描述整体网络和节点城市的一体化程度。聚类系数越大,节点间的交往越密切,网络在应对危机时的协调合作越顺畅;同时,较强的集聚性也代表节点间较高的相互依赖程度,而局部中断也将波及到更多区域。

$$C_a = \frac{2V_a}{H_a(H_a - 1)} \quad (10)$$

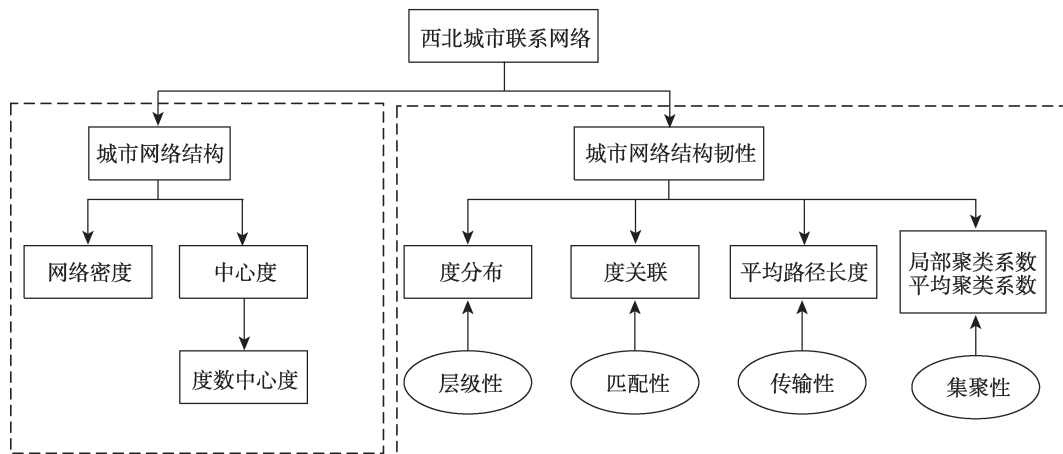


图2 城市网络结构韧性评估指标

Figure 2 Evaluation indicators and technical roadmap of urban network structure resilience

$$C = \frac{1}{n \sum_a C_a} \quad (11)$$

式中: C_a 为局部聚类系数; C 为平均聚类系数; V_a 为城市 a 的邻居间实际产生的边数。

2.3.3 中断场景下的网络韧性评估指标

参考郭卫东等^[36]、赖建波等^[37], 选取网络效率、平均路径长度和最大连通子图3个指标结合计算机仿真模拟方法表征网络在随机攻击和蓄意攻击两种情景下的韧性变化。

(1) 网络效率。反映网络中要素传输的难易程度。网络效率越高, 其通达性越好, 节点交互越顺畅, 韧性水平越高。

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{a=1}^n \sum_{b=1(a \neq b)}^n \frac{1}{D_{ab}} \quad (12)$$

式中: E 为网络效率; D_{ab} 为城市 a 到 b 的网络路径距离。

(2) 最大连通子图。反映外界扰动下网络的连通分量, 表征网络受损程度, 韧性水平较低的网络在外界攻击下容易破碎并分裂为多个子网络。

$$M = \frac{P^*}{P} \quad (13)$$

式中: M 为网络受损程度; P^* 为最大联通子图; P 为初始网络大小。

3 结果与分析

3.1 网络空间结构特征分析

借助复杂网络理论、Gephi 社会网络分析工具和 GIS 空间分析方法从域面、轴线、节点3个层面分析网络结构特征和各韧性指标(表1)。

3.1.1 域面: 网络整体结构特征

计算网络密度反映网络整体结构特征(表1)。经济、交通和信息网络密度分别为 0.67、0.97 和 0.72, 接近于 1, 说明西北城市网络连通性较好。其中经济网络密度最小, 仅有 67% 的节点产生经济交

互, 即整体联系相对松散, 当网络受到冲击时, 容易产生断裂, 这一方面受西北地区整体较低的发展水平影响, 另一方面也和各地市间距离遥远有关; 交通网络密度最大, 有 97% 的节点产生交通联系, 说明网络整体连通度较高, 从兰新高铁、徐兰高铁、银西高铁和连霍高速、京藏高速等交通干线的相继通车, 到中欧班列、西部陆海新通道等重要运输走廊高效运转, 国家的一系列举措填补了西北的交通“留白”, 也为区域交通发展按下了“快进键”, 促进了西北地区综合立体交通网络初步形成, 当网络受到冲击时, 有较为充裕的联系路径作为缓冲; 信息网络虽然覆盖面较大, 但节点间联系的紧密程度低于交通网络, 部分节点在网络中的信息连通度不高, 城市综合实力的影响在信息交流中相对弱化。就网络平均度而言, 交通网络(48.28) > 信息网络(35.84) > 经济网络(33.37), 说明虽然经济网络中各个节点平均可连接一定数量的城市, 但对比交通和信息网络, 节点的连接能力相对较弱, 经济要素的扩散范围较为受限; 大运量、长运距的铁路运输和点多面广且“门对门”的公路运输则保障了节点间的互联互通; 信息要素的无边界性使得不同等级节点在信息网络中的交流机会大于经济网络, 但依然存在网络连接不充分的问题, 城市的信息连通性还有待进一步提升。

3.1.2 轴线: 网络空间格局特征

采用自然断点法将城际联系分为四级并进行空间可视化表达(图3), 刻画西北城市网络联系的层级特征。经济网络共有 851 条连接线路, 核心节点间的经济粘性较大, 城际联系“以强带弱”和“强强联合”共存, 在空间上呈现出“多组团”格局和“片态化”发展态势。第一层级仅有西安-咸阳、西安-渭南及乌鲁木齐-昌吉3个城市对, 均为特大城市与大城市以及大城市之间的联系, 反映了节点链接的

表1 2022年西北城市网络结构及其韧性指标测度

Table 1 Structure of urban networks and resilience metrics in Northwest China, 2022

城市网络	网络结构特征		层级性	匹配性	传输性	集聚性	
	网络密度 D	平均度 \overline{H}_a	度分布 θ	度关联 λ	平均路径长度 R	平均聚类系数 C	局部聚类系数 C_a
经济网络	0.67	33.37	-0.38	-0.08	1.34	0.86	—
交通网络	0.97	48.28	-0.04	-0.14	1.04	0.97	—
信息网络	0.72	35.84	-0.35	-0.21	1.28	0.89	—

2024年8月

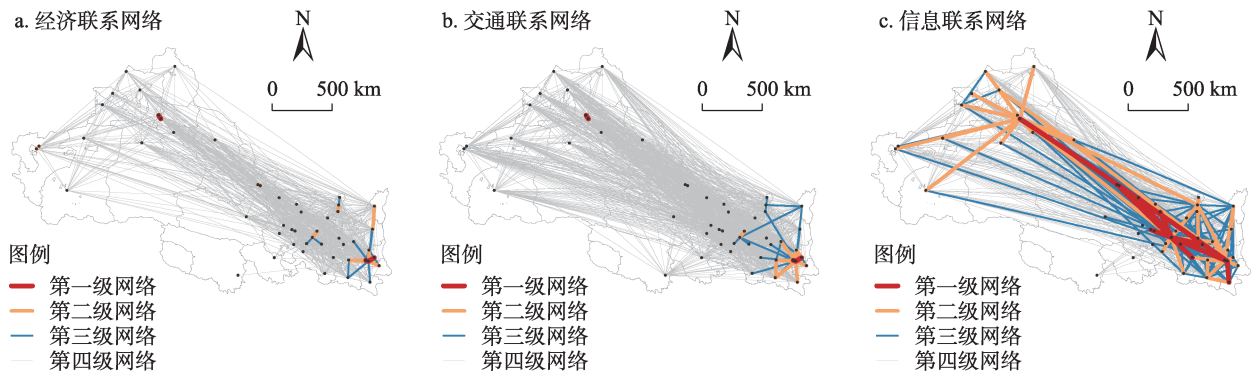


图3 2022年西北城市网络空间格局

Figure 3 Spatial pattern of urban networks in Northwest China, 2022

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图边界无修改。

“择优性”;第二层级包括西安-宝鸡、兰州-咸阳、嘉峪关-酒泉等10个城市对,呈现出“离散状”空间格局;第三层级以西安-汉中、西安-安康、西安-榆林等陕西省内联系为主,在空间上呈“星形放射状”;第四层级覆盖面较广但关联强度低,呈现出“东密西疏”的分布格局。交通网络共包含1231条连接线路,节点联系惯性较大,在空间上呈现出“纺锤型”格局和“紊态化”发展态势。第一层级依然为西安-咸阳、西安-渭南及乌鲁木齐-昌吉;第二层级多为西安-铜川、咸阳-渭南等陕西省内联系,以西安为中心呈“非均质单侧放射状”分布格局;第三层级包括陕甘省内联系和跨省区近距离联系,空间上以西安为顶点自东南向西北呈“弓箭形”格局;第四层级多为规模较小的节点间跨越行政界线的低密度弱联系,空间上依然呈“东密西疏”的分布格局。信息网络共包含914条连接线路,由于信息要素具有虚

拟性、瞬时性和超强渗透性,地理边界对城际联系限制较小,扁平化特征明显,网络具有协调性特征和“湍态化”发展态势。第一层级包括西安、兰州、乌鲁木齐之间及其与本省实力较强的节点间的联系,反映了节点链接的“趋强性”,空间上形成“条带状”分布格局;第二层级主要包括甘、新、宁省会与省内节点、陕西除西安外的省内城市之间及陕甘之间的联系,空间上呈现出“一轴两区多中心”的格局;第三层级在东翼呈“织网状”而西翼呈“窄扇形”分布;第四层级反映了节点间跨越行政界线与地理距离的信息交互。对比3类网络,发现高等级城市对以大城市为主且在各类要素中均具优势,流量上也与其他城市对差距较大,进一步体现了西北地区的资源极化现象和大城市的虹吸效应。

3.1.3 节点:网络中心性特征

如图4所示,计算节点的度值并采用自然断点

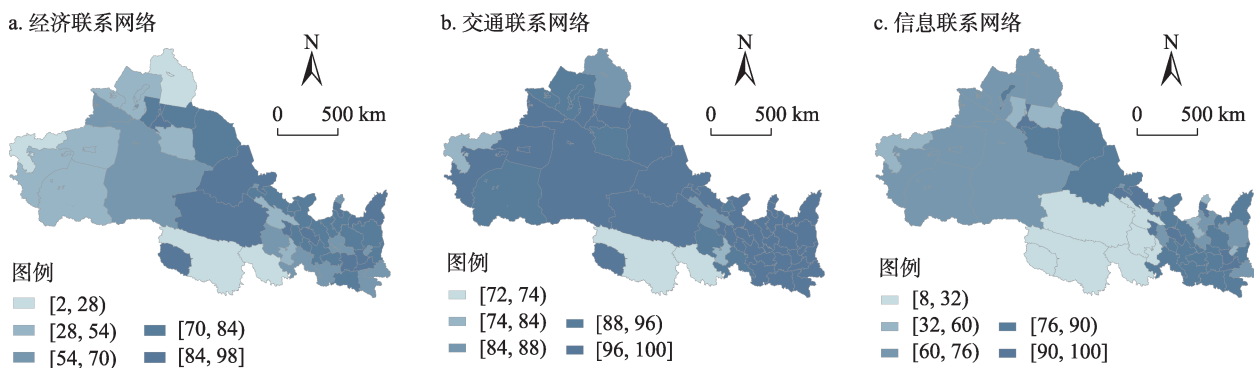


图4 2022年西北城市网络度值空间分布

Figure 4 Spatial distribution of network degree values in Northwest China, 2022

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图边界无修改。

法将其分为五级,从城市层面反映网络中心性特征。经济网络中节点间的联系能力差距较大,高中心度节点多集中在陕甘宁三省,包括西安、兰州、乌鲁木齐和榆林、天水、哈密等规模较大的城市,地理区位较好、经济实力较强且产业集聚明显是其共性特征,青新两省高度值节点分布较为稀疏,尤其青海南部和新疆西南部地区是经济网络的低值区,这也说明产业向心集聚加深了城市联系的路径依赖,当经济流中断或滞缓时,这种区域“锁定”容易阻碍经济要素传播和整体经济发展。交通网络中西安、榆林、兰州、宝鸡、西宁等度值较高的节点多沿陇海—兰新铁路、徐兰高铁及312国道分布,或是位于多条干线的交汇处,在空间上以陇海—兰新线连接徐兰高速为横轴,包兰—兰青线结合银兰高速为纵轴形成“十字形”骨架,节点度值由中间向两侧逐渐递减。信息网络度值较高的城市在空间上相对分散,高层级节点除5个省会城市外,还包括咸阳、张掖、榆林、天水等人口和产业较为集中的地区,而青海和新疆的大部分地区由于人口密度小,产业不集聚等原因在网络中处于被支配地位,成为低层级节点的小范围集聚区。

3.2 网络结构韧性评估

3.2.1 网络总体结构韧性测度

(1) 层级性

从度分布拟合曲线的结果来看,3类网络的斜率介于0.04~0.39之间(图5),说明3类要素流视角下西北城市网络均具有显著的层级性。其中:①经济网络拟合曲线的斜率为0.39,层级性较高,表明西北各地区资源禀赋差异较大,少数核心城市占据发展优势,经济地位突出,多数城市产业结构趋同,发

展受到掣肘,“权力”的过度集中加剧了经济要素的非均质分布,容易形成“内强外弱”的格局;②交通网络拟合曲线的斜率为0.04,层级性较低,说明主要交通路网沿线城市功能相似,仅有少数交通枢纽城市承担集散功能,缺乏强劲的辐射核心。而青海和新疆的多数民族自治州以及甘肃省金昌市等部分小城市由于人口规模较小且路网系统不够完善,对外联系不足,导致其与核心城市之间的互动相对贫乏;③信息网络拟合曲线的斜率为0.35,层级性在3类网络中居中,说明信息网络相对扁平,但也拥有能够带动周边区域信息流转与交换的核心城市组,高层级城市多为省会或区域核心,辐射或集散能力高于其他城市,在空间上相对分散。

(2) 匹配性

经济(-0.08)、交通(-0.14)和信息网络(-0.21)的度关联指数均为负(图6),说明3类网络均具有异配性。取其绝对值发现,3类网络的异配性排名为信息网络(0.21)>交通网络(0.14)>经济网络(0.08)。经济网络异配性最小,说明受西北辽阔的地域范围影响,地理距离对经济发展影响较大,要素主要在核心组团或片区内小范围流动,边缘节点与核心节点经济落差较大,二者联系稀疏,节点间链接的偏好依附和单一且固化的经济联系路径使其更倾向于与实力相近的节点抱团发展,形成区域“锁闭”,从而对外界扰动抵抗力变弱,呈现出核心强同配性和边缘弱异配性特征;交通网络异配性高于经济网络,长距离的铁路网络和高度灵活的公路网络承担着要素的转接功能,大型的交通枢纽通过路网对周边城市形成辐射,而交通线路的延展性在强化中心节点与边缘节点间联系的同时也凸显了“廊道效

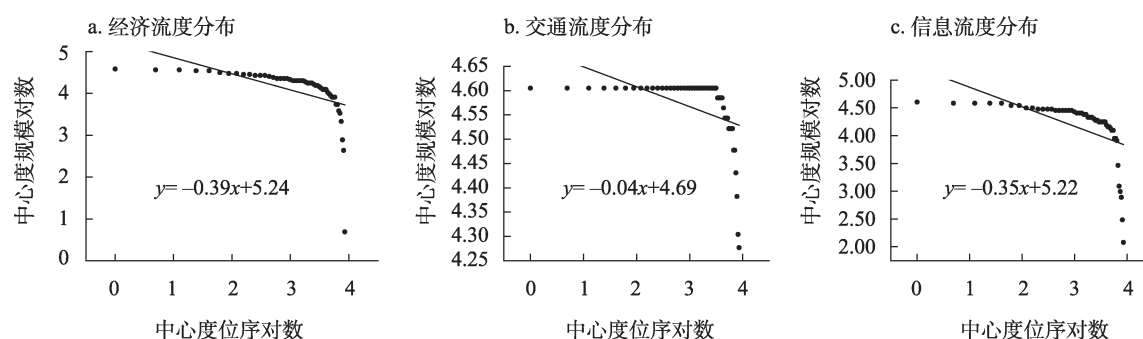


图5 2022年西北地区城市网络度分布

Figure 5 Distribution of urban network degrees in Northwest China, 2022

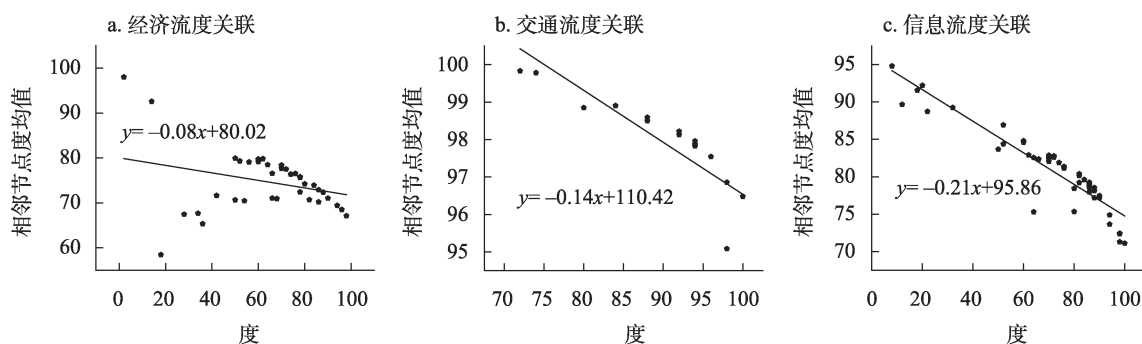


图6 2022年西北地区城市网络度关联

Figure 6 Correlation of urban network degrees in Northwest China, 2022

应”,当网络受到外界干扰时,能够进行适应性调整;就信息网络而言,其无边界和广覆盖的特性使得节点间的联系路径更加多元,节点交流跨越了规模等级、职能类型和地域空间,因而具有明显的扁平化趋势和最高的异配韧性。

(3) 传输性

3类网络的平均路径长度介于1.04~1.34之间(表1),即要素在网络中传递时的中转节点不超过2个,表明西北城市网络的整体传输效率较高,要素能以较低的成本和较快的速度在区域流转。经济网络的平均路径长度在3类网络中最大(1.34),表明经济网络虽然具有较好的可达性,但其要素的扩散和互动成本略高于交通和信息网络,当枢纽节点发生中断时,网络瘫痪的面积也相对更大,从而影响整体网络结构韧性;交通网络的平均路径长度最短(1.04),表明交通网络具有较好的扩散性和易达性,但交通中转和集散功能在枢纽城市也更加集中;信息网络平均路径长度在3类网络里居中

(1.28),表明节点之间互补联系和互动交流的效率不及交通网络,但互联网时代信息交互的弥散性、跨域性和融合性等特征使其传输性高于经济网络。

(4) 集聚性

经济、交通和信息网络的平均聚类系数分别为0.86、0.97和0.89(表1),说明3类网络中多数节点与其相邻节点发生联系并形成小团体,孤立节点数量不多。经济网络平均聚类系数最低,说明经济网络小范围抱团,大面积分散,这也在一定程度上缩小了网络中断时的波及范围,增加了邻近城市的可介入性;交通网络的平均聚类系数最大,说明交通网络具有无标度特征和“小世界”效应,成员间产生信任氛围而减少机会主义,但网络受到攻击后节点的离散程度也相对较高,整体网络“鲁棒性”较差;信息网络集聚效应也较为明显,大部分城市与其相邻城市间的关联更加密切,小集团成员具有较强的合作和协调能力。

从单个节点的局部聚类系数来看(图7),经济

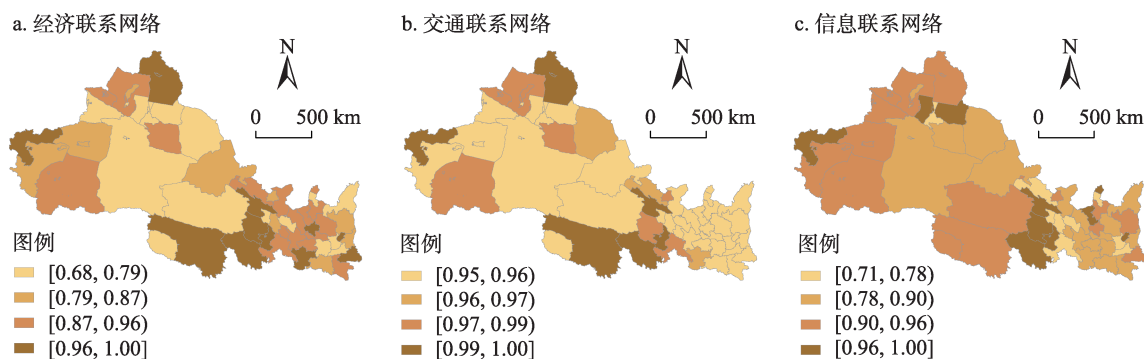


图7 2022年西北城市网络局部聚类系数空间分布

Figure 7 Spatial distribution of local clustering coefficients of urban networks in Northwest China, 2022

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图边界无修改。

和交通网络中节点的集聚性具有明显的空间异质特征,而信息网络中节点集聚能力相对均衡。从单个节点来看,度值居于前列的西安、兰州、乌鲁木齐、西宁、银川等城市的局部聚类系数较低,说明核心城市周边节点间的互动并不频繁,更多的是边缘城市与核心节点的单向联系,边缘区域的集聚效应不明显。果洛、黄南、克孜勒苏柯尔克孜等少数几个边远民族地区则相对孤立,与周边城市交往稀疏。从韧性角度来看,一方面,核心城市集聚不明显表明要素在区域内的流通性较好,有利于打造开放、灵活的网络环境;另一方面,核心城市邻居节点间的弱纽带联系则为外界要素流入提供了机会,增强了网络的“鲁棒性”。

总体来看,西北地区的发展并不均衡,核心节点发展势头较好,但中小城市发育不足,加之地域辽阔,地理距离对经济和交通联系影响较大,所以经济和交通网络表现出了较高的层级性和较小的异配性;但信息要素流动受地理距离约束较小,网

络具有扁平化和均质化特征,其层级性较低且异配性明显;因而3类要素在层级性和匹配性上表现出较大差异。同时,随着区域的发展,城市网络完备程度逐渐提高,要素在各类网络中均能快速流转,在此基础上,大部分城市都倾向于首先与其邻近的城市产生联系,因而3类网络在传输性和集聚性上具有共性,差异较小。

3.2.2 中断场景下的网络结构韧性测度

(1) 网络韧性特征变化

利用计算机仿真模拟方法,首先对OD矩阵进行二值化处理,再利用MATLAB软件结合R语言逐个删除节点模拟级联失效的情况。删除节点时,采取随机剔除和按照中心度位序由大到小剔除两种方式分别模拟气象灾害、地震灾害、地质灾害等随机事件和军事冲突、恐怖袭击、人为病毒传播等蓄意事件下的网络中断场景^[31],并在此基础上计算网络效率、平均路径长度和最大连通子图相对大小等指标,以此来观测西北城市网络结构韧性变化(图8)。

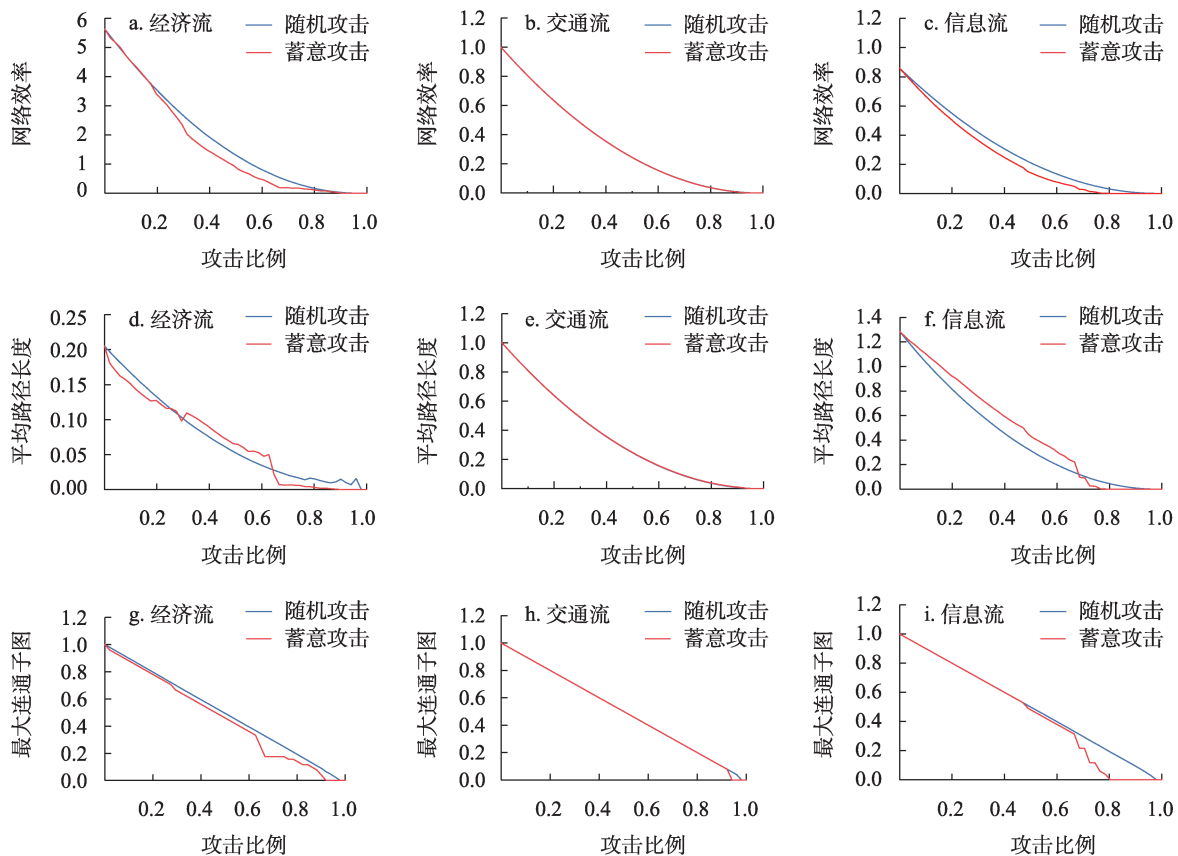


图8 中断场景下网络结构韧性指标变化

Figure 8 Changes in network structural resilience metrics under different interruption scenarios

2024年8月

随机攻击情景下,各类指标特征值与移除节点比例之间的关系趋于幂率或线性变化,说明西北城市网络对于随机攻击的容错能力较强,而蓄意攻击下各类指标特征值有较大波动,所以此处着重分析蓄意攻击下的网络结构韧性特征。就经济网络而言,基于蓄意攻击情景的韧性指标变化幅度较大,网络效率在攻击比例达到29%时开始大幅下降,此阶段平均路径长度波动下降,达到第一个低谷后又快速上升,最大连通子图则持续下降,网络总体呈现出稳定变化的态势;当攻击比例达到62%时,网络效率降速趋缓,平均路径长度和最大连通子图在此后出现大幅度下降,此时网络通达率较低,城际联系受阻,网络趋于崩溃;当攻击比例持续至66%时,网络效率达到拐点,平均路径长度和最大连通子图均趋近于0,此时可认为网络基本崩溃,整体网络分化为数个小网络,直至节点呈现孤立状态。交通网络节点间的连通性较高,因此蓄意攻击下的特征值波动不明显。当节点攻击比例为33%时,网络效率下降速度趋缓,网络效率和平均路径长度呈幂率下降,最大连通子图则呈直线下降,整体网络变化相对稳定;当攻击比例达到68%时,网络效率和平均路径长度接近于0,最大连通子图持续下降,网络破碎程度较高,整体趋于崩溃;当攻击比例持续至82%时,网络效率和平均路径长度基本为0,最大连通子图急速下跌,网络完全崩溃。蓄意攻击下信息网络的韧性特征变化较为明显,当攻击的节点比例为47%时,网络效率呈幂率下降,平均路径长度和最大连通子图则呈线性下降趋势,网络变化幅度较小;当66%的节点受到攻击时,网络效率降速变慢,平均路径长度和最大连通子图下降幅度增大,呈断崖式下跌,说明此时网络连通性较差,网络趋于破碎并开始分裂出子网络;当攻击比例进一步上升至72%时,网络效率和平均路径长度几乎为0,最大连通子图为0.12,城际联系中断,网络呈瘫痪状态。

对比随机攻击与蓄意攻击下西北城市网络的韧性,发现3类网络均具有阶段性韧性变化特征。在随机攻击情景下,经济、交通和信息网络分别在攻击比例达到80%、86%、88%时开始瓦解;而蓄意攻击情景下,3类网络分别在攻击比例达到62%、68%、66%时便开始破碎分裂。这说明:一方面,随

机攻击下网络的连通能力和传输效率优于蓄意攻击情景,蓄意攻击对网络破坏力更大,能显著降低网络韧性、加速网络奔溃,且在经济网络中表现尤为明显。另一方面,3类网络韧性存在一定差异,其中交通网络由于可选择路径多样,对抗冲击的能力较强,具有较好的韧性结构;信息网络次之;而经济网络抗毁性最弱,韧性水平最低。同时,3类网络具有显著的核心—边缘特征,一定数量的城市群组构成了网络的核心区,仅有边缘区节点遭受打击时,网络仍能保持较高效率的运转。

(2)核心节点与脆弱节点识别

在不同的攻击方式和攻击强度下,各类韧性指标呈现出明显的突变点,根据脆弱性测度结果,将出现在第一个突变点前的节点划分为核心节点,出现在第3个突变点后的节点划分为脆弱节点,共得到23个核心节点和15个脆弱节点(图9)。核心节点在空间上形成“一横两纵”的分布格局,主要包括5个省会城市及咸阳、榆林、白银、天水、哈密、海东等大城市,这些节点多具有发展基础好、城市功能健全、信息化水平高等优势,在城际交往中发挥经济辐散、交通中转和信息传播等重要功能,对其他城市具有引领和推动作用。脆弱节点多分布在区域边缘,在空间上形成3个片区,主要包括博尔塔拉、塔城、玉树、甘南等民族地区,这些节点在空间上小范围集聚且与核心区域相对割裂,具有人口密

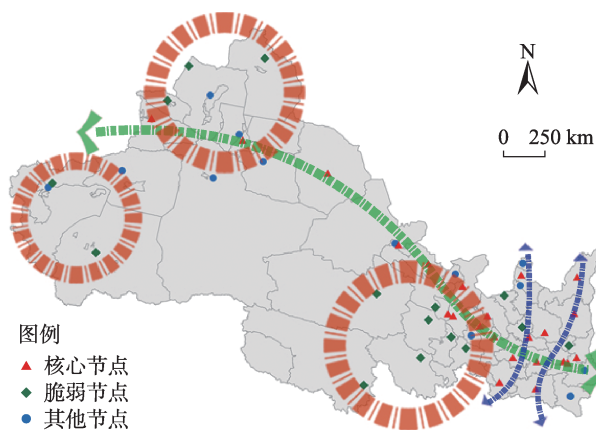


图9 2022年西北城市网络核心节点与脆弱性节点空间分布

Figure 9 Spatial distribution of core and vulnerable nodes of urban networks in Northwest China, 2022

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图边界无修改。

度小、经济实力弱、发展水平低、城市功能不够健全等共同点。尽管这些脆弱节点对整体网络无法造成显著影响,但当网络发生扰动或中断时,便容易成为补救链上的“瓶颈”,导致信息传递不畅、政策响应滞后、物资供应迟缓等问题。

3.3 城市网络结构韧性优化策略

就网络韧性在不同领域发展不平衡而言:经济网络韧性水平在3类网络中最低,而交通和信息网络在各类韧性指标中分别具有优势。需结合3类网络特性,促进网络持续发育,有效提升韧性水平。

①经济网络。应支持开放型经济和区域一体化建设,打破行政边界壁垒,缩小区域发展差距,营造要素自由流动的市场环境。促进传统产业与现代化信息技术产业的集聚合作,加快风电、光伏发电项目建设并网,发展现代丝路寒旱农业,将新疆、宁夏的葡萄酒产业、河西走廊的外繁制种产业等做大做强。重视文化对经济的促进作用,充分发挥甘肃、陕西的历史文化资源在丝绸之路经济带中的重要通道、节点作用,书写“有风景的地方就有经济”这一国际经验的“西北样卷”。以共建“一带一路”为引领,深化陆海双向高水平开放,创建“丝路电商”合作先行区,加速经济要素流动,提升经济网络结构韧性。②交通网络。应加快构建“一带一路”立体互联互通网络,推进中欧班列高质量发展,加快陆海新通道和丝绸之路建设。强化陇海-兰新线、徐兰高铁、G312等一级联系轴线,打造功能齐全的综合运输通道。优化枢纽站点布局,完善区域网络支点,建设城际铁路、市域轨道快线,分担核心城市交通压力,保障网络线路替代性。完善海西、玉树、甘南、阿勒泰等位于边缘的民族地区的交通基础设施网络,以更大力度加快宁夏铁路建设,进一步提升全域高速铁路和高速公路覆盖率,完善交通网络。将西安、兰州、乌鲁木齐等打造成高铁枢纽、交通门户,并强化枢纽城市间的互联互通,促进西北交通系统融入国家立体综合交通网络之中,从而实现交通运输网络结构韧性的提升。③信息网络。应以产学研结合为手段,多元融合,培养人才,加快推进5G、大数据、物联网、人工智能等新技术,打造一批创新基地、科研中心,利用信息流全覆盖与无边界特性,拓展发展空间,构建扁平化的城市网络格

局,加强“智能+”和“互联网+”的建设力度,提升千兆光宽带的覆盖度,推进西北城市网络向数字化转型、朝智能化发展,实现城市网络的韧性水平提升。

对于节点间韧性水平发展不平衡来说:域面层面上整体联系松散,轴线层面上以强带弱不足,节点层面上发展差距较大。从韧性指标看,网络层级性过高且异配性较低,局部集聚性较好但大面积分散。应统筹区域发展目标,分类施策。①通过培育重点区域的方式,扩大核心城市的辐射半径,突破以强带弱不足和异配性较低的困境。具体来说,持续提升核心城市的联系效率和强度,加强城际联动,以西安、兰州、乌鲁木齐、西宁、银川等城市间的深度协同和功能互补为主轴,并延伸出多方向的城际支流,促进要素扩散。核心城市应结合自身属性、立足优势基础、强化内生动力,因地制宜地探寻韧性建设路径,同时扩大渗透半径,充分发挥对周边的辐射带动作用,提高西北片区发展效率;②以强化中间节点、培育边缘城市与促进扁平发展并举的方式,解决节点差距过大、网络层级明显以及整体联系松散等问题。首先,嘉峪关、哈密、天水、宝鸡、固原、庆阳等地处行政交界地带的城市应“擦”去边界、打破壁垒,充分利用地理毗邻、资源相似、产业相近、基础相当等现实条件构建跨省合作纽带。白银、石嘴山、吐鲁番等Ⅱ型大城市和中等城市则应通过省内、省外多向联动,逐步减少对核心节点的依赖。其次,海北、黄南、甘南、塔城等相对薄弱的节点则需找准城市定位,充分利用政策优势、资源优势、人文优势等,强化基础和公共服务设施建设,培养复合型专业人才,主动积极向国家申请项目,与高层级城市构建产业链、打造产业集聚区,实现多样化、数字化的产业布局,逐步缩小与其他城市的差距。最后,结合网络化的大背景,推动等级联系走向扁平发展,加强核心节点与边缘节点间的互动,并将二者的“弱联系”转换为“强联系”,以北疆带动南疆、甘青牵引河西走廊、兰西引领海西和甘肃中部、关中辐射陕南陕北等方式,打造城市联盟,紧密整体联系,构建“西北共同体”。

4 结论与讨论

4.1 结论

以西北地区51个地级行政单元为研究对象,从

2024年8月

经济、交通、信息3个视角入手探究城市网络空间结构特征,定量测度其层级性、匹配性、传输性和集聚性,进而利用计算机仿真模拟方法研究中断场景下西北城市网络结构韧性,并提出优化建议。具体结论如下:

(1)西北地区经济、交通、信息网络总体呈“东密西疏”的分布格局,网络具有“核心-边缘”特点,但其结构存在明显差异。经济网络密度较小、核心节点间的粘性较大,呈现出“以强带弱”与“强强联合”共存的特征、“多组团”格局和“片态化”发展态势;交通网络联系较为紧密,但城际交往受干线走向影响惯性较强,呈现出“小世界”效应、“纺锤型”格局和“紊态化”发展态势;信息网络具有广覆盖性和强渗透性,网络扁平化程度更高,但依然存在趋强与择优现象,呈现出协调性特征、“条带状”格局和“湍态化”发展态势。

(2)3类网络的层级性和匹配性差异较大,传输性和集聚性差异较小。经济网络具有较高的层级性,但其匹配性、传输性和集聚性都较低,核心城市群“权力”过于集中,但辐射半径较小,网络非均质化现象和“马太效应”明显,具有“强同配核心,弱异配边缘”;交通网络具有较高的传输性、集聚性和异配性以及较低的层级性,因而抗干扰能力较强,表现出小范围“健壮性”和“大面积脆弱性”;信息网络具有较高异配性的同时,层级性、传输性和集聚性也较好,表现出网络结构扁平化和联系路径多元化的特征,外界发生扰动时,网络响应较快。

(3)3类网络在遭受攻击时网络结构韧性呈现出阶段性变化特征。蓄意攻击对网络破坏力度更大,能显著降低网络韧性、加速网络崩溃,这在经济网络中尤为明显。核心城市发生故障会在短时间内波及较大范围,对网络结构韧性影响较大;仅有边缘区节点受到冲击时,网络仍能保持较高效率的运转。

4.2 讨论

城市网络结构韧性的研究对降低灾害影响、保障公共安全等具有重要意义。研究结果与相对类似的东北地区相比既有共性又有差异^[4],共性在于:整体网络具有“核心-边缘”结构;不同要素视角下城市网络韧性水平不尽相同,经济网络层级性较

高,异配性较低。交通网络相对成熟,“廊道效应”明显。信息网络则具有均衡化发展趋势,但其层级性高于交通网络。差异在于:西北地区地域辽阔,各地市间相距遥远,这决定了其对交通网络兼具实用性与发展性的诉求,而国家的一系列政策倾斜也使得西北交通建设有了“后发优势”,其在密度和要素传输效率上均大于经济和信息网络;而东北地区的交通建设起步较早,当下发展却略为缓慢。同时,西北各城市经济水平多级分化,资源集聚明显,但核心城市辐射半径不足;而沈阳与哈尔滨等东北地区核心城市则具有较大的经济辐射半径。诚然,本文也存在待改进之处。由于数据获取的局限性,未能基于企业分支机构等实测流构建网络并将西北地区融入全国或全球网络探究其韧性特征,相关内容有待在未来研究中进一步深化。

参考文献(References):

- [1] 谢永顺,王成金,韩增林,等.哈大城市带网络结构韧性演化研究[J].地理科学进展,2020,39(10):1619-1631. [Xie Y S, Wang C J, Han Z L, et al. Structural resilience evolution of multiple urban networks in the Harbin-Dalian urban belt[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1619-1631.]
- [2] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [3] 李睿倩,徐成磊,李永富,等.国外海岸带韧性研究进展及其对中国的启示[J].资源科学,2022,44(2):232-246. [Li R Q, Xu C L, Li Y F, et al. Progress of international research on coastal resilience and implications for China[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 232-246.]
- [4] 刘奕.东北地区城市网络韧性评估及政策优化研究[D].大连:东北财经大学,2022. [Liu Y. Research on Evaluation and Optimization Path of Urban Network Resilience in Northeast Region[D]. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics, 2022.]
- [5] 马鸿佳,唐思思,熊立.网络市场导向对创新创业组织韧性的影响机制研究[J].管理学报,2023,20(12):1809-1817. [Ma H J, Tang S S, Xiong L. Research on the impact mechanism of network market orientations on new venture' organizational resilience[J]. Chinese Journal of Management, 2023, 20(12): 1809-1817.]
- [6] Shamsuddin S. Resilience resistance: The challenges and implications of urban resilience implementation[J]. Cities, 2020, DOI: 10.1016/j.cities.2020.102763.
- [7] 魏冶,修春亮.城市网络韧性的概念与分析框架探析[J].地理科学进展,2020,39(3):488-502. [Wei Y, Xiu C L. Study on the

- concept and analytical framework of city network resilience[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(3): 488–502.]
- [8] 郭倩倩, 张志斌, 陈龙, 等. “流空间”视角下西北地区城市关联特征与网络格局分析[J]. *经济地理*, 2023, 43(3): 88–99. [Guo Q Q, Zhang Z B, Chen L, et al. Characteristics and network structure of urban linkage in Northwest China from the perspective of “flow space”[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(3): 88–99.]
- [9] 郭倩倩, 张志斌, 师晶, 等. 中国西北地区城市网络结构的时空演变: 基于铁路客运流视角的分析[J]. *城市问题*, 2019, (9): 19–27. [Guo Q Q, Zhang Z B, Shi J, et al. Spatial and temporal evolution of urban network structure of Northwest China: Based on the perspective of railway passenger transport flow[J]. *Urban Problems*, 2019, (9): 19–27.]
- [10] 戴靓, 丁子军, 曹湛, 等. 长三角地区城市协同创新网络的演化特征及其驱动力[J]. *资源科学*, 2023, 45(5): 1006–1019. [Dai L, Ding Z J, Cao Z, et al. Change and driving forces of intercity collaborative innovation networks in the Yangtze River Delta region[J]. *Resources Science*, 2023, 45(5): 1006–1019.]
- [11] 郭倩倩, 张志斌, 马晓敏, 等. “流空间”视角下西北地区城市群内部网络空间结构及其驱动机制[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(1): 49–59. [Guo Q Q, Zhang Z B, Ma X M, et al. Internal network spatial structure and driving mechanism of city groups in Northwest China from the perspective of space of flows[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2023, 60(1): 49–59.]
- [12] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1717–1731. [Zhao R D, Fang C L, Liu H M. Progress and prospect of urban resilience research[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1717–1731.]
- [13] Klein R J, Nicholls R J, Thomalla F. Resilience to natural hazards: How useful is this concept?[J]. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 2003, 5(1): 35–45.
- [14] 贺灿飞, 盛涵天. 区域经济韧性: 研究综述与展望[J]. *人文地理*, 2023, 38(1): 1–10. [He C F, Sheng H T. Regional economic resilience: A review and future development outlook[J]. *Human Geography*, 2023, 38(1): 1–10.]
- [15] Reggiani A, Graaff T D, Nijkamp P. Resilience: An evolutionary approach to spatial economic systems[J]. *Networks & Spatial Economics*, 2002, 2(2): 211–229.
- [16] Kazemian I, Torabi S A, Zobel C W, et al. Correction to: A multi-attribute supply chain network resilience assessment framework based on SNA-inspired indicators[J]. *Operational Research*, 2022, 22(3): 1885–1886.
- [17] Fan D M, Sun B, Dui H Y, et al. A modified connectivity link addition strategy to improve the resilience of multiplex networks against attacks[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2022, DOI: 10.1016/j.ress.2021.108294.
- [18] Safaei F, Hashemi Z, Kouchak M M E. Analytical modeling of robustness and stochastic resilience of temporal small-world complex networks[J]. *Journal of Computational Science*, 2024, DOI: 10.1016/j.jocs.2024.102264.
- [19] 李东泉, 王晨哲, 李雪伟. 基于行动者网络理论的社区韧性研究: 理论框架与应用分析[J]. *同济大学学报(社会科学版)*, 2023, 34(5): 60–71. [Li D Q, Wang C Z, Li X W. Research on community resilience based on actor-network theory: Theoretical framework and applied analysis[J]. *Journal of Tongji University (Social Science Edition)*, 2023, 34(5): 60–71.]
- [20] Rogov M, Rozenblat C, Bida M, et al. Evaluating multilevel resilience of Russian urban economies 2010–2019[J]. *Ecology and Society*, 2022, 27(4): 37–37.
- [21] Maekawa M, Kawabata Y, Fujii S. The impact of enhancing expressway networks on the speed of recovery after large earthquakes[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 2023, 78(5): 51–61.
- [22] 冯怡, 彭迪云, 周美楠. 长江经济带城市群网络结构韧性之演化: 基于“流空间”视角的分析[J]. *江西社会科学*, 2022, 42(8): 53–62. [Feng Y, Peng D Y, Zhou M N. The evolution of network structural resilience of city clusters in the Yangtze River Economic Belt: An analysis based on the perspective of flow space[J]. *Jiangxi Social Sciences*, 2022, 42(8): 53–62.]
- [23] Shutter S T, Kandala S S, Wei F W, et al. Resilience of urban economic structures following the great recession[J]. *Sustainability*, 2021, 13(4): 2374–2374.
- [24] 何瑶, 杨永春, 郭建科. 中断模拟下的中国沿海集装箱港口航运网络脆弱性[J]. *资源科学*, 2022, 44(2): 414–424. [He Y, Yang Y C, Guo J K. Vulnerability of the shipping network of China’s coastal container ports under disruption simulation[J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 414–424.]
- [25] 滕堂伟, 张晶. 多样性、技术网络与城市经济韧性: 基于长江经济带城市数据的分析[J]. *同济大学学报(社会科学版)*, 2023, 34(5): 48–59. [Teng T W, Zhang J. Diversity, technology network and urban economic resilience: An analysis based on urban data in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Tongji University (Social Science Edition)*, 2023, 34(5): 48–59.]
- [26] 王彦开, 赵渺希, 吉瑞. 特大城市供应网络韧性: 特征、影响因素与提升策略: 基于广州市信息基础设施企业交易的视角[J]. *城市问题*, 2023, (9): 84–94. [Wang Y K, Zhao M X, Ji R. Resilience of supply network in megacities: Characteristics, influencing factors and promotion strategies: Based on the perspective of information infrastructure enterprise transactions in Guangzhou[J]. *Urban Problems*, 2023, (9): 84–94.]
- [27] 杨永春, 许静, 王雨萱. 新时代地缘视角下中国西部发展的全球地位及核心战略路径[J]. *经济地理*, 2023, 43(2): 22–32. [Yang Y C, Xu J, Wang Y X. The global status and core strategic path of the development of Western China from the geographical per-

2024年8月

- spective in the new era[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(2): 22–32.]
- [28] 石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 等. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 6016–6029. [Shi L Y, Zheng Q Y, Yang M, et al. A review of definitions, influence factors and assessment of urban resilience[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 6016–6029.]
- [29] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略[J]. *地理研究*, 2018, 37(6): 1193–1207. [Peng C, Lin Y Z, Gu C L. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1193–1207.]
- [30] 魏石梅, 潘竞虎. 中国地级及以上城市网络结构韧性测度[J]. *地理学报*, 2021, 76(6): 1394–1407. [Wei S M, Pan J H. Network structure resilience of cities at the prefecture level and above in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(6): 1394–1407.]
- [31] 冷炳荣, 杨永春, 李英杰, 等. 中国城市经济网络结构空间特征及其复杂性分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(2): 199–211. [Leng B R, Yang Y C, Li Y J, et al. Spatial characteristics and complex analysis: A perspective from basic activities of urban networks in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2): 199–211.]
- [32] 王启轩, 张艺帅, 程遥. 信息流视角下长三角城市群空间组织辨析及其规划启示: 基于百度指数的城市网络辨析[J]. *城市规划学刊*, 2018, (3): 105–112. [Wang Q X, Zhang Y S, Cheng Y. Spatial organization of the Yangtze River Delta urban agglomeration and its implications on planning from the perspective of information flow: Analysis of city network based on Baidu index[J]. *Urban Planning Forum*, 2018, (3): 105–112.]
- [33] 胡国建, 陆玉麒, 吴小影, 等. 基于企业间联系视角的长江经济带城市网络结构及其变化特征研究[J]. *人文地理*, 2021, 36(2): 146–154. [Hu G J, Lu Y Q, Wu X Y, et al. Study on the urban network structure and its changing characteristics of the Yangtze River Economic Belt: Based on inter-firm linkages[J]. *Human Geography*, 2021, 36(2): 146–154.]
- [34] 唐承辉, 张衍春. 全球城市区域合作网络结构演变: 以粤港澳大湾区为例[J]. *经济地理*, 2022, 42(2): 25–34. [Tang C H, Zhang X C. The structure evolution of cooperation network on global city region: A case study of Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 25–34.]
- [35] 方叶林, 苏雪晴, 黄震方, 等. 中国东部沿海五大城市群旅游流网络的结构特征及其韧性评估: 基于演化韧性的视角[J]. *经济地理*, 2022, 42(2): 203–211. [Fang Y L, Su X Q, Huang Z F, et al. Structural characteristics and resilience evaluation of tourism flow networks in five major urban agglomerations in coastal China: From the perspective of evolutionary resilience[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 203–211.]
- [36] 郭卫东, 钟业喜, 冯兴华. 基于脆弱性视角的中国高铁城市网络韧性研究[J]. *地理研究*, 2022, 41(5): 1371–1387. [Guo W D, Zhong Y X, Feng X H. Research on the resilience of China's high-speed rail urban network from the perspective of vulnerability[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1371–1387.]
- [37] 赖建波, 朱军, 郭煜坤, 等. 中原城市群人口流动空间格局与网络结构韧性分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2023, 39(2): 55–63. [Lai J B, Zhu J, Guo Y K, et al. Spatial pattern of population flow and the resilience of network structure of Central Plains urban agglomeration[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2023, 39(2): 55–63.]

Evaluation and optimization strategy of resilience of urban network structures in northwest China

GUO Qianqian, ZHANG Zhibin, MA Xiaomin, ZHAO Xuewei

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The resilience of urban network structures is a crucial guarantee for the recovery and stability of urban spatial organization. Current research predominantly employs individual flows and focuses on developed regions, and there is relatively little research that combines multidimensional factor flows while also focusing on the resilience of network structures in underdeveloped regions. Therefore, this study took the underdeveloped Northwest China as the research object and explored its network structural resilience based on multidimensional factor

flow, in order to fill the gap of related research and enrich the empirical analysis of network resilience from the perspective of multidimensional factor flow. **[Methods]** This study focused on 51 prefecture-level administrative units in Northwest China for the year 2022. It investigated the structural characteristics of urban networks from three perspectives: economic, transportation, and information, quantitatively measured their hierarchy, matching, transmission, and agglomeration, and examined the structural resilience of Northwest China's urban networks under various disruption scenarios by using the method of computer simulation and proposed optimization strategies from different perspectives. **[Results]** (1) The economic, transportation, and information networks across the 51 prefecture-level administrative units in Northwest China are generally distributed in a pattern of dense in the east and sparse in the west, showing core-periphery characteristics, but there are significant differences in the structure of the three types of networks. The economic network density is low and the stickiness between the core nodes is large, showing the characteristics of coexistence of "strong assisting weak" and "strong alliances", with multi-group pattern and fragmented development trend. The traffic network is more closely linked, with stronger inertia in intercity links, showing a "small world" effect, a spindle-shaped pattern, and a turbulent development trend. The information network has wide coverage and strong permeability, showing coordinated characteristics, a strip-like pattern, and a turbulent development trend. (2) The three types of networks differ greatly in terms of hierarchy and matching, and less in terms of transmission and agglomeration. The Matthew effect of the economic network is obvious, characterized by strong homophily at the core and weak heterophily at the periphery; the traffic network tends to experience three-dimensional development, showing local robustness and regional vulnerability; and the information network has highly heterogeneous resilience, showing the characteristics of flattened network structure and diversified connection paths, with a high level of resilience. (3) Deliberate attacks are significantly more damaging to network resilience than random attacks, and a hit on a core node has a greater impact on network operational efficiency than on a vulnerable node. **[Conclusion]** The problem of uneven regional development is particularly obvious in less developed regions, where the core city has concentrated power but a shorter radius of radiation, and cities on the periphery are not sufficiently motivated to develop. There are both similarities and differences in resilience characteristics between the three types of networks, and network resilience under different attack modes is characterized by phased changes. In order to promote the sustainable development of the region, response policies should be formulated according to regional characteristics.

Key words: factor flows; urban network structure; resilience evaluation; disruption simulation; optimization strategy; gravity model; northwest China