

DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20240321

高鑫, 丁晨浩, 巫昊燕, 等. 成渝城市群网络空间格局及其结构韧性评估[J]. 西部人居环境学刊, 2024, 39(3): 147-154.

GAO X, DING C H, WU H Y, et al. Evaluation of network spatial pattern and structural resilience of Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2024, 39(3): 147-154.

成渝城市群网络空间格局及其结构韧性评估*

Evaluation of network spatial pattern and structural resilience of Chengdu-Chongqing urban agglomeration

高鑫 丁晨浩 巫昊燕 余鑫鑫 GAO Xin, DING Chenhao, WU Haoyan, YU Xinxin

摘要: 城市群是我国区域发展的重要主体, 其内部表现为各节点相互联系的复杂网络, 分析其在急性冲击与慢性压力下的韧性表现对区域安全可持续发展有重要意义。本文以2020年成渝城市群16个地级市为研究对象, 构建交通、经济、信息和综合联系网络, 从层级性、匹配性、传输性、集聚性四方面评估其网络结构韧性, 模拟分析中断环境下网络结构的吸收能力和容错能力。结果表明: 成渝城市群网络空间格局“双核”为引领, 层级差异鲜明。拓扑结构绝对极化与相对均衡化并存。网络层级性非均质化与立体化特征显著; 异配性强且同质抱团现象不显著; 传输效率偏高, 可达性与扩散性较强; 头部城市强集聚与非核心城市单向联系。在中断环境

下, 吸收能力与容错能力表现为信息网络>经济网络>综合网络>交通网络。

关键词: 成渝城市群; 城市网络; 网络结构韧性; 韧性评估

Abstract: Urban clusters are vital for regional development in China, internally characterized by a complex network of interconnected nodes. Analyzing their resilience to acute shocks and chronic pressures is crucial for the sustainable development and security of the region. This paper investigates the 16 prefecture-level cities within the Chengdu-Chongqing urban cluster as of 2020. It constructs networks of transportation, economy, information, and comprehensive connections. The network's resilience is assessed from four perspectives: hierarchy, matching, transmission, and agglomeration. Simulation analysis is used to examine the network structure's absorption and fault tolerance capabilities in a disrupted environment. Results show that the Chengdu-Chongqing urban cluster's network spatial pattern is dominated by a "dual-core", with pronounced hierarchical differences. The "dual-core" and "networked" patterns are significant in the transportation connectivity network. The economic and information connectivity networks display "bow-shaped" and "spider-web-like" patterns respectively. The comprehensive connectivity network's "networked" feature is the most pronounced. The topological structure exhibits both absolute polarization and relative equalization. Within the economic network's topology, the core area is "dual-driven", with a significant agglomeration effect in the southern cities. In the topology of the information network, node connections are diversified and tend to favor core cities. In the comprehensive network's topology, the "dual-core" main structure persists throughout, with secondary central cities having the potential but not the power to balance. The formation of topological structures results from the combined effects of multiple factors, including geographical conditions, resource distribution, economic development levels, and policy guidance. Developmental differences and collaborative actions within urban clusters cause the network structures of various fields to exhibit characteristics of both absolute polarization and relative equalization. The network's hierarchy is significantly non-homogeneous and three-dimensional. There is strong heterophily and no significant homophily clustering. The transmission efficiency is relatively high, with strong accessibility and diffusivity. Top cities show strong agglomeration, while non-core cities have unidirectional connections. The structural resilience of transportation, economy, information, and comprehensive connectivity networks is characterized by transportation network (strong hierarchy, high heterophily, weak transmission, medium agglomeration), economic network (medium hierarchy, weak heterophily, strong transmission, strong agglomeration), information network (weak hierarchy, medium heterophily, strong transmission, weak agglomeration), comprehensive connectivity network (strong hierarchy, medium heterophily, medium transmission, medium agglomeration). The Chengdu-Chongqing dual-core structure is prominent, which brings a strong radiative driving effect while also generating the risk of spatial closure. Faced with external risks and shocks, there is a certain degree of structural resilience, but there is still much room for improvement. The heterogeneity of network structure resilience stems from the unbalanced development in different fields within the Chengdu-Chongqing urban cluster, as well as the corresponding differences in diverse network structures. The

中图分类号 TU 984.11*3

文献标识码 B

文章编号 2095-6304 (2024) 03-21-08

*国家自然科学基金(41601149); 国家社会科学基金(19XGL027); 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0290); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000515)

作者简介

高鑫(通讯作者): 重庆师范大学地理与旅游学院, 教授, planninggx@126.com

丁晨浩: 重庆师范大学地理与旅游学院, 硕士研究生

巫昊燕: 重庆师范大学地理与旅游学院, 讲师

余鑫鑫: 重庆师范大学地理与旅游学院, 硕士研究生

structural characteristics of different networks reflect the diversity and complementarity within the urban cluster. In a disrupted environment, the order of absorption and fault tolerance capabilities is information network > economic network > comprehensive network > transportation network. Among them, the information network has the strongest structural resilience, the transportation network the weakest, with Chongqing and Chengdu being key nodes affecting absorption and fault tolerance capabilities. The decentralized and distributed characteristics of the information network enhance its resilience, facilitating better adaptation and recovery in disruption scenarios. The transportation network, involving infrastructure, is often susceptible to natural disasters and accidents, making it difficult for the network to quickly adapt and repair in the event of disruptions. The Chengdu-Chongqing urban cluster's dependency on Chengdu and Chongqing is too high, with a significant disparity in external connectivity between central and peripheral cities. The "core-periphery" effect is pronounced, making "peripheral cities" such as Ya'an, Guang'an, and Dazhou more vulnerable.

Keywords: Chengdu-Chongqing urban agglomeration; city networks; network structural resilience; resilience assessment

0 引言

城市群已然成为我国当下区域发展的主体形态以及参与全球竞争的空间载体。各类要素在城市群的网络结构中快速流动,形成“流空间”,极大地促进了区域一体化进程,为区域协调发展及城乡融合提供了有力支撑。《十四五规划和二〇三五年远景目标》中指出:“优化城市群内部空间结构,构建生态和安全屏障,形成多中心、多层次、多节点的网络型城市群”;“顺应城市发展新理念新趋势,开展城市现代化试点示范,建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市^[1]”。然而,城市群在为区域发展带来高效率的同时,也暗藏了巨大风险和不确定性。在高度关联的网络中,核心城市受到攻击,负面影响会在网络中快速蔓延并放大。可见,构建具有韧性的网络型城市群是降低区域风险,提升区域治理能力的重要途径。

物体受到冲击后恢复到受到冲击前状态的物理属性即为“韧性”。从1973年该概念首次引入生态学开始^[2],韧性的概念逐渐融合到经济学、社会学、灾害风险管理、城市与区域研究等众多学科领域。城市网络研究源于“流空间”理论,即在空间作用下各种“流要素”形成的具有一定结构功能的城市空间组合^[3]。城市网络结构与区域韧性密切相关,进而提出网络结构韧性的概念:城市网络系统通过社会、经济、生态等各领域的协作和互补,预防、抵御、响应和适应外部急性冲击和慢性压力的影响并恢复的能力^[4]。同时,网络结构韧性作为区域韧性的一种表现形式,其实质是探索拓扑结构下的区域韧性空间特征。梳理当前国内外各维度各方向的网络结构韧性研究,多采用复杂网络理论中的网络效率、传输性、层级性、核心边缘结构等指标对网络功能和结构进行测度。面对外部冲击,网络效率越高,传输效率越高面对外部冲击的脆弱性越强^[5],显著的核心边缘结构会削弱整体网络结构韧性^[6]。国内学者在以往关于交通网络^[7-8]、创新网络^[9-10]、信息网络^[11-12]、经济网络^[13-14]结构特征刻画的基础上,开始逐步从拓朴视角展开网络结构韧性的研究探索^[15-21],节点等级分布、网络异质性、网络连通性、网络聚集性等被视为影响网络功能与结构的重要因素^[22]。

总体而言,国内研究一方面研究对象多为单一维度网络,城市网络作为一个复杂系统,同一空间中不同网络存在复杂联系,研究结果可能存在片面化现象^[23]。另一方面,缺少网络中关键节点失效问题的考虑,在实际中部分节点的中断会导致整体网络运行受阻^[24]。研究方法上网络结构韧性的评估尚未形成统一的体系,多通过复杂网络理论中的结构拓朴指标进行测度,整体体系仍有待丰富完善^[25]。

基于此,本文构建经济、信息、交通和综合联系多维度网络,将复杂系统理论思想融入韧性研究中,力求更全面地对成渝城市群网络结构韧性进行测度分析。同时,本文根据研究区特点,创新性地模拟了成渝城市群两大核心城市分别中断的场景,对中断环境下网络结构的吸收能力和容错能力进行分析,最后根据研究结果提出提升城市网络韧性的优化策略建议,以期在城市未来韧性规划和安全发展提供科学参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 城市联系强度测算

本文从经济、社会和基础设施三个维度入手,运用修正后的交通和经济引力模型等方法^[26-27]计算交通、经济、信息和综合联系强度,具体计算公式如下:

交通联系强度

$$F_{ij} = K_i^* \left(\sqrt{P_i G_i^* P_j G_j} \right) / R_{ij}^2 \quad (1)$$

$$K_i = \frac{1}{2} (Q_i Q + C_i / C) \quad (2)$$

(1)式中: F_{ij} 为*i*城市对*j*城市的交通引力; p_i 和 p_j 分别为*i*城市和*j*城市的经济活动人口数; G_i 和 G_j 分别为*i*城市和*j*城市的GDP; R_{ij} 为两城市间高速公路里程; K_i 为*i*城市的交通引力系数。

(2)式中: Q_i 和 C_i 分别为*i*城市的公路客运量和公路货运量; Q 和 C 分别为区域整体平均公路客运和货运量。

经济联系强度

$$R = (F_i \times F_j) / d_{ij}^2 \quad (3)$$

(3)式中: R 为*i*城市对*j*城市的经济联系强度; F_i 为*i*城市的外向影响量; F_j 为*j*城市的外向影响量; d_{ij} 是城市*i*和城市*j*的距离。

信息联系强度

$$I = I_{ij} \times I_{ji} \quad (4)$$

(4)式中: I 为*i*城市和*j*城市的信息联系强度; I_{ij} 为*i*城市对*j*城市的百度指数; I_{ji} 为*j*城市对*i*城市的百度指数。

综合联系强度

$$W = \frac{1}{3} (W_1 + W_2 + W_3) \quad (5)$$

(5)式中: W_1 、 W_2 、 W_3 分别为归一化后的交通、经济、信息网络关系矩阵。借助Ucinet软件,以平均值为阈值进行二值化和对称化处

理构建网络。

1.1.2 网络结构韧性指标

本文借助Ucinet软件,从层级性、匹配性、传输性、集聚性四个层面对成渝城市群网络结构韧性进行评估,如表1所示,具体计算方法如下。

1.1.2.1 层级性—度、度分布

网络结构的层级性可以通过计算度值并在此基础之上借用位序-规模法则构建度分布指标表示,度表示网络中的一个节点与其他节点相连接的边的总数目,度越大表明其与其他节点联系越密切。度分布表示网络中节点的度的概率分布或频率分布。层级性具体计算公式为:

$$E_h = C(E_h^*)^a \quad (6)$$

(6)式中: E_h 表示节点i的度值, E_h^* 表示节点i的度值在整个网络中的位序数, C为常数, a表示度分布曲线斜率。

1.1.2.2 匹配性—度关联

网络节点之间的关联存在一定的偏好依附,进而将其匹配性分为同配和异配。在整体网络中发展水平、等级地位等特征相近的节点集聚或抱团发展则称为同配性,反之则称为异配性。网络结构的匹配性可以通过网络中任意一节点与其他直接相连节点的度值平均值表示,具体计算公式为^[28]:

$$\bar{E}_i = \frac{1}{E_h} \sum_{j \in V_i} E_j \quad (7)$$

(7)式中: E_j 表示与节点i相邻的节点j的度值, V_i 表示与节点j所有的相邻节点j的集合。对 E_i 和 \bar{E}_i 进行线性估计得到以下公式:

$$\bar{E}_i = D + bE_i \quad (8)$$

(8)式中: D是常数, b为关联系数,当 $b > 0$ 时为同配性, $b < 0$ 为异配性。

1.1.2.3 传输性—平均路径长度

网络中要素的输送能力通常采用传属性表征,即某一要素从一点传输到另一点所要经过的路径,路径较短传输效率较高,反之则传输效率较低。网络结构的传输性可以通过网络中任意两点之间的节点距离的平均值即平均路径长度来表示,具体计算公式为:

$$L = \frac{1}{1/2n(n+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \quad (9)$$

(9)式中: L是平均路径长度, n网络中节点个数, d_{ij} 是节点i到j的距离。

1.1.2.4 集聚性—集聚系数

集聚系数用于表征网络中节点的集聚程度,网络结构的集聚性可

以通过Ucinet软件计算的整体网络平均聚类系数与局部聚类系数表示,具体计算公式为^[29]:

$$Q_i = \frac{2Z_i}{K_i(K_i-1)} \quad (10)$$

$$Q = 1/n \sum_i^n Q_i \quad (11)$$

(10-11)式中: Q、 Q_i 分别表示平均聚类系数与局部聚类系数, K_i 表示节点的度值, Z_i 表示节点i邻居间实际产生的边数。

1.1.2.5 吸收能力

吸收能力是指网络受到外界刺激,能够通过其他路径以较高的网络效率实现要素流通,具体计算公式为:

$$A = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G_i} \frac{1}{d_{ij}} \quad (12)$$

(12)式中: A表示吸收能力, n表示节点个数, d_{ij} 表示节点i到节点j的最短路径长度, G_i 表示移除节点后网络中其余节点的集合。

1.1.2.6 容错能力

容错能力是指网络中某条路径受到攻击时,整体网络可以通过节点间其他联系路径保证网络稳定运行,具体计算公式为:

$$B = \sum_{i \neq j \in G_i} n_{ij} \div \sum_{i \neq j} n_{ij} \quad (13)$$

(13)式中: B表示容错能力, n_{ij} 表示节点i与j之间的独立路径数量, G_i 表示移除节点后网络中其余节点的集合。

1.1.2.7 TOPSIS中心性评估算法

分别计算度中心性、接近中心性、介数中心性,将三个基本属性融入到TOPSIS多属性决策模型中^[30]。具体计算步骤为:第一,分别计算度中心性、接近中心性、介数中心性;第二,计算每种属性与其最优解与最劣解间距离;第三,计算各节点紧密度,并进行排序。图1为本文对于网络结构韧性进行测度的流程图。

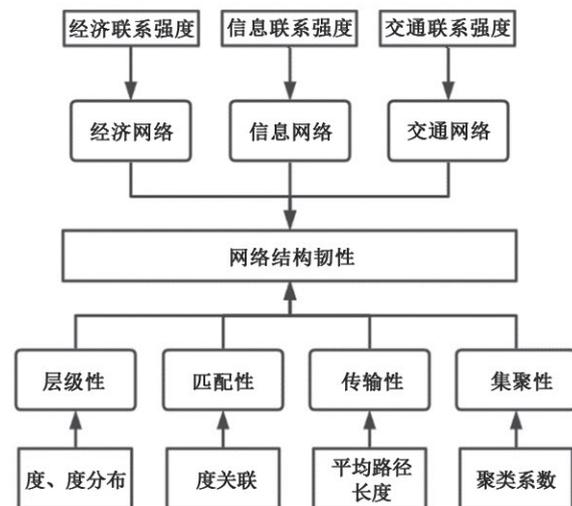


图1 网络结构韧性测度流程图

Fig.1 schematic diagram of network structure resilience measurement process

表1 网络结构韧性指标体系

Tab.1 the indicator system of network structural resilience

网络结构韧性特征	指标	指标解释
层级性	度、度分布	联系程度、度值分布特征
匹配性	度关联	节点联系关联性
传输性	平均路径长度	网络要素传输效率
集聚性	局部集聚系数、平均聚类系数	相邻节点集聚程度、网络整体集聚程度

1.2 数据来源

本文将研究区域定为成渝城市群规划范围内的重庆市部分地区、四川省的成都、自贡、泸州、德阳、绵阳(除北川县、平武县)、遂宁、内江、乐山、南充、眉山、宜宾、广安、达州(除万源市)、雅安(除天全县、宝兴县)、资阳等15个市^[1]。交通、经济、信息网络构建所使用数据来自《四川省统计年鉴》和《重庆市统计年鉴》以及部分县区的统计年鉴,百度指数查询网站等,具体使用方法详见1.1章节。

2 结果分析

2.1 成渝城市群网络空间格局:“双核”引领,层级差异鲜明

成渝城市群城市网络空间格局如图2所示。交通联系网络中,第一层级成都、重庆“双核”交通枢纽格局“初露锋芒”;第二层级“双核心”与更多元的节点连接,成渝“双核”交通中心格局显著;第三层级在空间上形成闭合的“菱形”区域;第四层级空间上的“网络化特征”最显著,已经形成网络化交织的发展格局。成都和重庆在交通联系网络中扮演着“双核”引领的关键角色,通过不同层级的连接,交通联系网络呈现出层级差异鲜明的特点,从“双核心”到形成闭合的“菱形”区域,再到具有网络化交织的第四层,反映出城市群内部交通网络的复杂性和多层次性。经济联系网络中,以成都—德阳、成都—眉山构建起第一层级经济联系网络,在空间上呈现出“弓形”格局,体现两个城市在经济上具有紧密的联系,并在一定程度上形成了经济互补关系。第二和第三层级为以成都、重庆为“双核”引领的网络放射状格局。第四层级网络联系水平较低但网络编织得最为紧密,显示了城市群内经济联系的密集化趋势。信息联系网络中,第一层级表现为成都单中心“蛛网状”格局;第二层级呈现出成都、重庆双核心的“蛛网状”格局,成都—绵阳、重庆—宜宾之间具有较强互动性,在空间上构成信息联系的“倒三角”区域;第三层级在空间上构成一个“菱形”高密度区,东北侧则相对薄弱稀疏;第四层级依托雅安—南充、雅安—

宜宾,泸州—眉山、泸州—达州在空间上构成了一个“双三角形”密集区。“蛛网状”格局突出了成都在信息传播上的核心地位,“倒三角”区域呈现出成都、重庆双核心的“蛛网状”格局,突出了这两个城市之间的强烈互动性,“双菱形”密集区进一步反映了信息在城市群内部的高度交叉和联系。综合联系网络中,第一层级空间上呈现出“弓形”格局;第二层级空间上双中心放射状格局显著;第三层级中强核心与弱边缘城市间互动性较强,形成“菱形”高活跃区域;第四层级依托弱边缘城市,网络化特征显著成熟,形成“双菱形”嵌套式格局。第一层级和第二层级共同形成了空间上的“弓形”格局和双中心放射状格局,展现了城市群综合联系的多元性和复杂性。第三和第四层级中,强核心与弱边缘城市之间形成了“双菱形”嵌套式格局,突显了城市群内联系的不平衡性和差异性。

2.2 网络拓扑结构特征:绝对极化与相对均衡化并存

成渝城市群城市网络拓扑结构图如图3所示,通过度值一定程度上可以衡量城市网络中节点的地位,度值越高的节点城市对外联系能力越强^[32]。四类网络拓扑结构均以成都与重庆为核心,呈现出“核心城市”为引领,“外围城市”散点分布的模式,绝对极化与相对均衡并存特征。交通网络拓扑结构中,成渝“两极”突出,外围薄弱特征显著;经济网络拓扑结构中,核心区“两轮”驱动,南部城市群集聚效应显著。南部城市群的泸州、自贡、宜宾、内江,凭借空间集聚程度高,区域协同一体化水平高的优势构建起各自网络,成为成渝地区经济增长新动力。信息网络拓扑结构中,节点联系多元化且具有偏向核心城市倾向。度值较低的边缘城市彼此之间的联系频次与信息活力相对较低,且具有倾向于连接高等级核心城市的特征。在综合网络拓扑结构中,“双核”主体结构仍贯穿始终,次级中心城市有制衡之“势”但无制衡之“力”。南部城市群、成都城市群、东北部城市群的宜宾、绵阳、南充等城市以期实现相对均衡,但发展相对缓慢的边缘城市如达州、遂宁、广安等,带来的“木桶效应”使制衡效果不佳。

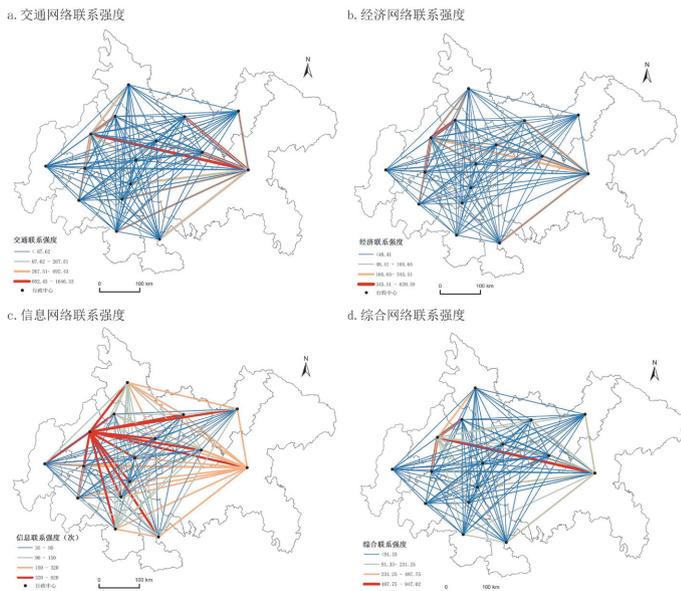


图2 2020年成渝城市群网络空间格局^①

Fig.2 cyber spatial pattern of Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2020

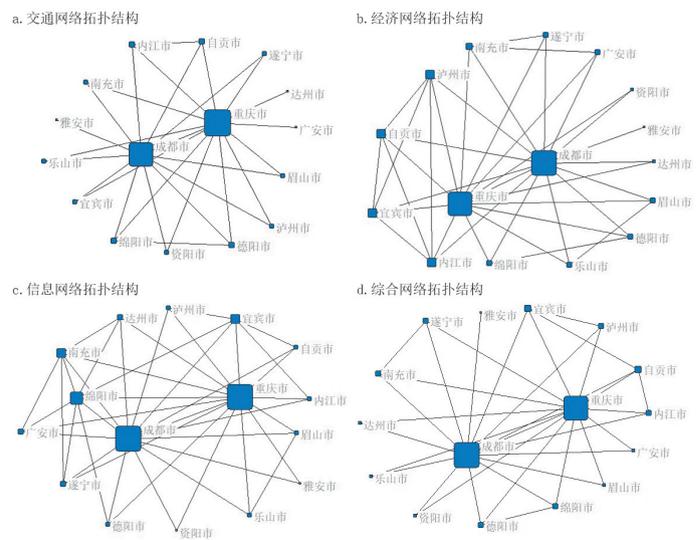


图3 2020年成渝城市群网络拓扑结构

Fig.3 network topology of Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2020

2.3 成渝城市群网络结构韧性评估

2.3.1 网络层级性: 非均质化与立体化特征显著

如图4所示, 四类联系网络度分布曲线斜率 $|a|$ 介于1.063~1.774, 由此可见成渝城市群交通、经济、信息和综合联系网络立体化特征显著, 具有较强层级性, 成都和重庆作为省会和直辖市在整体网络中集聚与辐射能力与区域内其他城市具有显著差距。网络层级性具体表现为: 交通网络>综合网络>经济网络>信息网络。交通联系网络层级性较强使区域中只有少数城市承担交通枢纽职责, 给这些城市带来更多交通运输压力的同时对于边缘城市而言不乏是一种公平性的失衡。经济联系网络层级性较强为区域发展带来双面性影响, 一方面核心城市作为增长极在自身发展过程中可以带动周围地区发展, 促进要素在区域间快速流动提升流动效率^[33]。另一方面, 这种“一家独大”或“双核竞合”的关系不利于整体网络的“鲁棒性”发展, 容易形成闭锁空间。信息联系网络层级性较强造成区域内不同城市间信息传输效率具有较大差距, 高值区的省会或中心城市掌握着核心与第一手信息资源, 不利于整体信息联系网络的“鲁棒性”发展。集交通、经济、信息要素于一体的综合联系网络具有较强层级性, 反映出了三种要素共同作用下成渝城市群网络结构的非均质化和立体化特征。

2.3.2 网络匹配性: 异配性强且同质抱团现象不显著

四类联系网络的度关联系数如图5所示: 交通网络(-0.8552)、经济网络(-0.6345)、信息网络(-0.6915)、综合网络(-0.7937)均小于0, 交通、经济、信息、综合联系网络均具有异配性特征, 同质抱团现象不显著。网络异配性具体表现为交通网络>综合网络>信息网络>经济网络。交通网络异配性最强, 具有良好的扁平化特征。交通基础设施网络综合交错, 节点城市路径多元化, 重要节点城市利用其自身优势辐射带动周边城市, 具有良好的网络结构异配韧性。经济网络其异配性具有两面性, 一方面度值较高重要性较强的节点城市对区域内其他城市起到辐射带动作用, 另一方面过度的经济扁平化发展并不利于整个区域的“鲁棒性”, 其产生的空间闭锁效应使核心节点城市受到外界冲击时会产生较大的连锁反应波及到整体网络。信息网络异配性较强, 节点与其周边节点呈现出负相关关系, 整体呈现出扁平化特征, 既

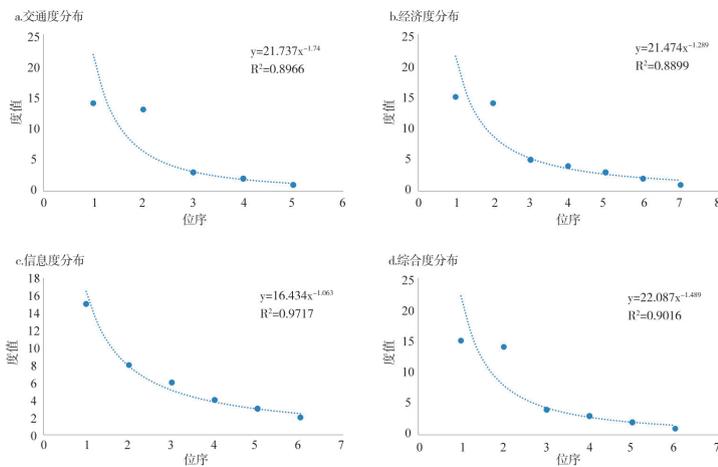


图4 2020年成渝城市群网络度分布
Fig.4 network distribution of Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2020

可与周边节点良好交流沟通, 又与距离较远的节点良性互动。通过多要素叠加而生成的综合网络虽其异配性略低于交通网络, 但是城市作为一个诸多要素组成的复杂综合体, 往往综合联系网络才能更真实地还原城市网络结构韧性的原貌^[34]。

2.3.3 网络传输性: 传输效率偏高, 可达性与扩散性较强

从网络传输效率来看, 四类网络的平均路径长度差距不大, 在1.650—1.783之间。平均路径长度越短其传输性越强, 得益于互联网信息传递的高效性, 信息网络平均路径长度最短于其传输效率最高, 具有较强扩散能力和可达性。经济与交通网络平均路径长度相比与信息网络略长, 要素在此路径上流通时会产生更多的阻力和附加成本, 因此传输性相对较弱, 效率相对较低。综合网络的平均路径长度为1.725, 表明成渝城市群整体联系网络传输性能较强, 传输效率普遍较高。

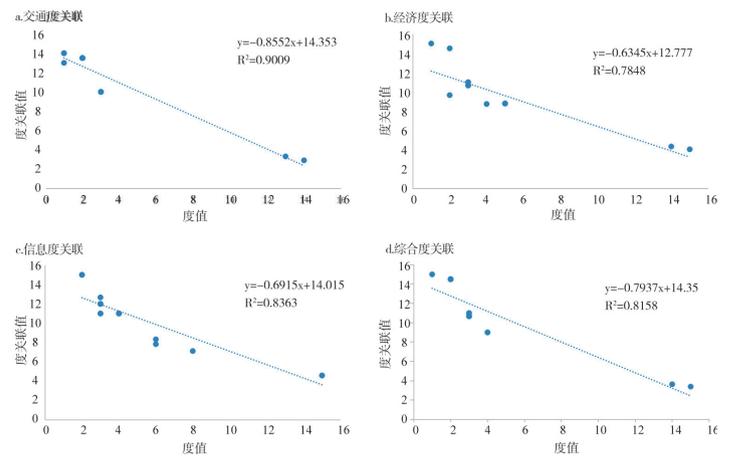


图5 2020年成渝城市群网络度关联
Fig.5 network degree correlation of Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2020

表2 2020年成渝城市群网络结构韧性指标汇总

Tab.2 summary of network structural resilience indicators of Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2020

	层级性	匹配性	传输性	集聚性
	度分布斜率	度关联斜率	平均路径长度	平均聚类系数
交通网络	-1.774	-0.855	1.783	0.870
经济网络	-1.289	-0.635	1.683	0.887
信息网络	-1.063	-0.692	1.65	0.843
综合网络	-1.489	-0.794	1.725	0.869

表3 2020年成渝城市群网络局部聚类系数

Tab.3 local clustering coefficient of Chengdu-Chongqing urban agglomeration network in 2020

	交通网络	经济网络	信息网络	综合网络
重庆市	0.143	0.253	0.257	0.198
成都市	0.167	0.219	0.257	0.171
绵阳市	1	1	0.571	1
德阳市	1	1	1	1
眉山市	1	1	1	1
乐山市	1	1	1	1
雅安市	0	0	1	0
资阳市	1	1	1	1
内江市	1	1	1	1
自贡市	1	1	1	0.833
宜宾市	1	1	0.600	0.833
泸州市	1	1	1	1
遂宁市	1	1	1	1
南充市	1	0.833	0.800	1
广安市	0	1	1	1
达州市	0	1	1	1

2.3.4 网络集聚性：头部城市强集聚与非核心城市单向联系

如表2-3所示：四类网络整体聚类系数在0.843~0.887，网络的集聚效应较为明显，节点城市之间联系较为密切，具体表现为经济网络>交通网络>综合网络>信息网络。城市网络结构集聚性较强，一方面可以提高节点城市之间的协作效率，避免由于行政区划而产生壁垒；另一方面非核心城市与核心城市联系密切有利于整体网络应对外界冲击和压力。从局部聚类系数来看，表现出较为明显的共性：成都、重庆两大核心城市局部集聚系数在四类网络中均为最低值。表明成都与重庆二者的衔接城市之间联系紧密程度较低，并不显著，更多的是与绵阳、德阳、眉山等这样非核心城市联系。非核心城市受制于其经济、交通、信息等条件，彼此之间联系互动较少，网络结构有待完善。

3 中断环境下的吸收能力与容错能力

3.1 关键节点识别

如表4所示：根据相似紧密度进行排名，选取排名前五名城市进行比较。成都、重庆分别以0.884、0.757的绝对优势占据第一名、第二名。自贡、绵阳、眉山实际相似紧密度与成都、重庆差距较大，差值高达0.766。因此进行中断模拟时，选取排名第一和第二的成都、重庆作为受攻击节点。

表4 2020年成渝城市群网络节点重要度排名

Tab.4 ranking of network node importance in Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2020

	最优解距离	最劣解距离	相似紧密度	排名
成都市	0.134	1.015	0.884	1
重庆市	0.262	0.814	0.757	2
自贡市	0.938	0.168	0.152	3
绵阳市	0.965	0.144	0.130	4
眉山市	0.989	0.132	0.117	5

表5 不同节点被攻击后网络结构的吸收能力变化

Tab.5 the absorption capacity of the network structure changes after different nodes being attacked

	交通网络	经济网络	信息网络	综合网络
未受攻击	0.307	0.327	0.327	0.319
攻击成都市	0.252	0.271	0.314	0.264
攻击重庆市	0.219	0.307	0.314	0.295

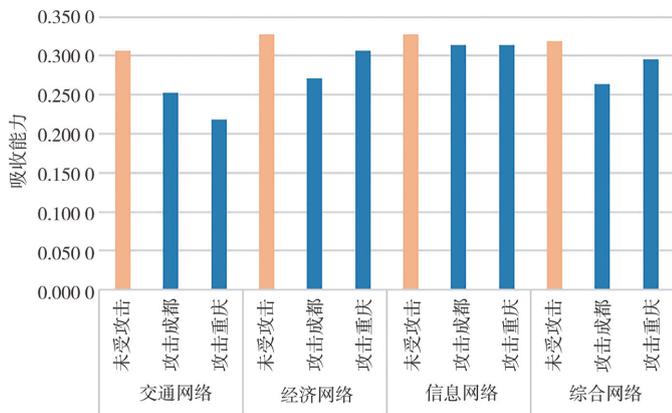


图6 不同节点被攻击后网络结构的吸收能力变化图

Fig.6 diagram of the absorption capacity of the network structure after different nodes being attacked

3.2 吸收能力：核心节点失效交通网络受损显著

表5、图6分别展示了交通、经济、信息和综合网络在未受攻击、攻击成都、攻击重庆三种状态下的吸收能力变化。

在交通网络中，重庆失效的影响大于成都，分别下降了0.055、0.096；在经济网络中，成都失效的影响略大于重庆，分别从下降了0.056、0.020；在信息网络中，成都和重庆失效后其吸收能力相同，均从0.327下降到0.314，下降幅度较小；在综合网络中，成都失效的影响大于重庆，分别下降了0.055、0.024。总体就吸收能力而言，信息网络>经济网络>综合网络>交通网络，交通网络所受到重庆失效影响最大，无法承受较大冲击因此需要格外关注。

3.3 容错能力：四类网络容错能力普遍显著下降

表5、图7分别展示了交通、经济、信息和综合网络在未受攻击、攻击成都、重庆三种状态下的容错能力变化。

交通网络中，成都节点失效的影响大于重庆节点，分别下降了0.652、0.475；经济网络中，成都节点失效的影响大于重庆节点，分别下降了0.553、0.507；信息网络中，成都节点失效与重庆节点失效后容错能力相同，均下降了0.478；综合网络中，成都节点失效的影响大于重庆节点，分别下降了0.589、0.536。总体就容错能力而言，信息网络>经济网络>综合网络>交通网络，交通网络所受到成都节点失效影响最大，易在中断情景下产生发展不平衡不稳定的情况，各次级节点城市间联系路径建设仍需加强。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文使用“流数据”构建起城市群尺度的联系网络，不仅限于单一要素，网络类型多样，一定程度上避免了片面性问题。同时从网络的层级性、匹配性、传输性、集聚性来对成渝城市群进行结构韧性评估并提出优化对策，一定程度上体现出了综合思维。根据城市重要度排名，分别模拟攻击成渝城市群核心城市，还原了急性冲击下整体网络结构韧性的变化，为成渝城市群网络结构研究拓展了韧性的研究视角。

本文对于成渝城市群网络结构韧性的研究虽然为成渝城市群的

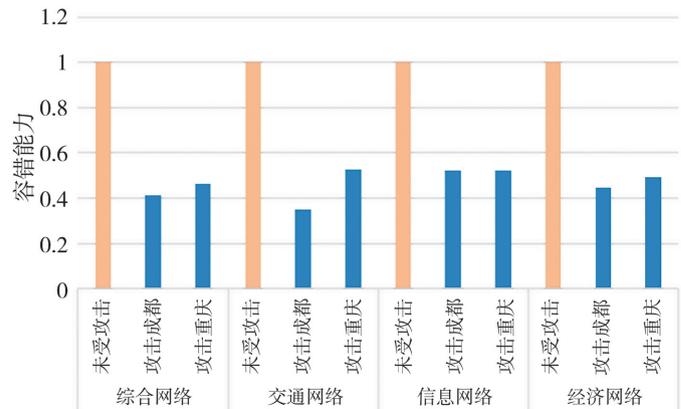


图7 不同节点被攻击后网络结构容错能力变化图

Fig.7 diagram of network structure fault tolerance after different nodes being attacked

安全发展提供了一定的依据和参考,但也存在着一定的局限性。首先,本文仅采用2020年单一年份数据,韧性的过程性特征并未得到很好体现;其次,仅在结构韧性层面进行分析;再次,未对城市网络结构韧性的机制与影响因素展开探讨。在未来的工作中,应不断提升数据的准确性和时效性,充分展示城市韧性的演化过程,展开对其机制与影响因素的探讨,将结构韧性与功能韧性综合,力求更全面的评价城市韧性水平。

4.2 优化建议

结合本文对成渝城市群网络结构韧性评估的结果,提出以下优化建议:第一,加强边缘城市网络连接,通过提升边缘城市与核心城市之间的联系,减缓“核心—边缘”结构对网络韧性的负向作用,增强边缘城市在网络中的地位,降低其脆弱性。雅安、广安、达州呈现出显著的脆弱性,在未来的建设中应加以政策倾斜,完善区内交通网络建设,培育次级交通网络枢纽,因地制宜寻找经济新增长点,提升城市综合实力的均衡性,避免“马太效应”。第二,促进城市群内不同城市的经济多样性,避免过度依赖某一特定经济模式。这有助于提高整体经济网络的韧性,降低对特定城市和经济类型的依赖性。第三,强化社区参与,促进社区层面的参与和自治,建立基层组织和社区网络。社区的主动性和抵抗能力可以在紧急情况下迅速发挥作用,促进城市网络的整体韧性。第四,网络联系路径多元化。由局部聚类系数分析可知,度值较低的城市偏向与度值较高的城市单向联系,如绵阳、德阳偏向与成都联系,广安、达州偏向与重庆联系。边缘城市仅与核心城市联系可能会产生空间上的闭锁,不利于整体网络的“鲁棒性”发展。因此,应加强城市治理机制,建立协同合作的城市网络管理结构,提高应对复杂局面的能力。此外,制定完善的自然灾害准备和规划方案、建立紧急响应机制、利用人工智能、大数据、物联网等,监测城市网络状态,实时分析问题,并采取快速响应措施。推动数字化转型,提高城市运行的智能化水平是制定长期的城市规划和发展战略,应对未来的挑战和变化的重要手段。

4.3 结论

通过构建成渝城市群交通、经济、信息、综合联系网络,从韧性视角测度其网络结构韧性得到以下结论。

第一,2020年成渝城市群的交通、经济、信息、综合联系网络表现出成都、重庆“双核”引领,层级差异鲜明的特征。成都和重庆依靠其拥有区域内重要的交通枢纽的地位使交通联系网络“双核心”格局与网络化特征显著,在空间上形成闭合的“菱形”区域;经济联系网络“两轮驱动”,网络密集化程度高,在空间上呈现独特“弓形”格局。信息联系网络在空间上呈现出“蛛网”状格局,第二和第三层级出现“倒三角”和“菱形”高值区;综合联系网络中,成都和重庆在多个领域的发展相互支撑,呈现出“双核”引领的双中心放射状格局,网络化特征相对成熟,边缘城市在综合联系网络中相对独立,依托于双核心城市以“双菱形”嵌套式格局为主。

第二,拓扑结构呈现出绝对极化与相对均衡化并存的特征。在交通网络拓扑结构中,“两极”突出,外围薄弱特征显著;经济网络拓

扑结构中,核心区“两轮”驱动,南部城市群集聚效应显著;在信息网络拓扑结构中,节点联系多元化且具有偏向核心城市倾向;在综合网络拓扑结构中,“双核”主体结构仍贯穿始终,次级中心城市有制衡之“势”但无制衡之“力”。拓扑结构的形成是地理条件、资源分布、经济发展水平、政策引导等多因素综合作用的结果。城市群内部的发展差异和协同作用使得不同领域的网络结构表现出绝对极化与相对均衡化并存的特征。

第三,交通、经济、信息、综合联系网络在结构韧性上异质性较为显著。交通联系网络表现出“强层级性—高异配性—弱传输性—中集聚性”特征,具有一定抵御风险冲击的能力但其传输效率仍有待提升。经济联系网络表现出“中层级性—弱异配性—强传输性—强集聚性”特征,具有较高的传输效率与较强的集聚效应但其抵御风险能力较弱,对于成都、重庆“双核”经济中心依赖性过强。信息联系网络表现出“弱层级性—中异配性—强传输性—弱集聚性”特征,得益于互联网技术发展信息传输效率与城市间互动性较强,但成都、重庆的信息虹吸效应过强会导致一定的信息封锁。综合联系网络表现出“强层级性—中异配性—中传输性—中集聚性”特征,成都、重庆的双核心格局突出,带来较强的辐射带动效应的同时也产生了空间闭锁风险,面对外来风险与冲击具有一定结构韧性但仍有较大提升空间。网络结构韧性的异质性源于成渝城市群内部不同领域发展的不均衡,以及在多元网络结构中相应的差异,不同网络的结构特征反映出城市群内部的多元性和互补性。

第四,中断场景下交通、经济、信息和综合网络的吸收能力和容错能力总体差异较小,均表现为信息网络>经济网络>综合网络>交通网络。其中信息网络结构韧性最强,交通网络结构韧性最弱,重庆和成都分别为影响吸收能力和容错能力的关键性节点。信息网络的去中心化和分布式特性使其更具韧性,有助于在中断场景下更好地适应和恢复。交通网络涉及到基础设施,其往往容易受到自然灾害、事故等影响,导致交通网络在面对中断时较难快速适应和修复。

第五,成渝城市群对于成都、重庆的依赖性过高导致整体网络结构韧性与我国其他城市群,如长三角城市群和长江中游城市群还有一定差距。中心城市与边缘城市的对外联系能力差距悬殊,“核心—边缘”效应显著,“边缘城市”如雅安、广安、达州等较为脆弱。

注释:

- ① 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图(审图号为GS(2016)1569)绘制,底图无修改

参考文献:

- [1] 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[N]. 人民日报, 2021-03-13(001).
- [2] CRAWFORD S H. Resilience and stability of ecological system[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [3] 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.
- [4] 侯兰功, 孙继平. 复杂网络视角下的成渝城市群网络结构韧性演变[J]. 世界地理研究, 2022, 31(3): 561-571.
- [5] MARKUS B, DE VRIES B J. Networks that optimize a trade-off

- between efficiency and dynamical resilience[J]. *Physics Letters A*, 2009, 373(43): 3910-3914.
- [6] JOAN C, SUIRE R, VICENTE J. Lock-in or lock-out? How structural properties of knowledge networks affect regional resilience[J]. *Journal of Economic Geography*, 2014, 14(1): 199-219.
- [7] 冯兴华, 修春亮, 刘志敏, 等. 东北地区城市网络层级演变特征分析——基于铁路客运流视角[J]. *地理科学*, 2018, 38(9): 1430-1438.
- [8] 马书红, 武亚俊, 陈西芳. 城市群多模式交通网络结构韧性分析——以关中平原城市群为例[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(7): 1228-1235.
- [9] 林卓玲, 方远平, 张经度, 等. 粤港澳大湾区城市群低碳技术创新网络结构韧性演化研究[J]. *城市观察*, 2023(3): 21-35.
- [10] 吕丹, 王等. “成渝城市群”创新网络结构特征演化及其协同创新发展[J]. *中国软科学*, 2020(11): 154-161.
- [11] 苏航, 谷娇, 赵金丽. 多尺度视角下黄河流域城市信息网络空间结构演化研究[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(7): 1206-1216.
- [12] 苏海洋, 刘人怀, 文彤. 粤港澳大湾区城市旅游信息网络结构[J]. *热带地理*, 2022, 42(2): 220-235.
- [13] 王新越, 刘晓艳. 高铁影响下黄河流域旅游经济网络结构演变及其优化[J]. *经济地理*, 2022, 42(9): 211-218.
- [14] 董宝玲, 孙小龙, 吴佳妮, 等. 旅游经济网络结构的时空演变与驱动因素研究——以贵州省为例[J]. *资源开发与市场*, 2023, 39(8): 1045-1056.
- [15] 李艳, 孙阳, 陈雯. 反身性视角下信息流空间建构与网络韧性分析: 以长三角百度用户热点搜索为例[J]. *中国科学院大学学报*, 2021, 38(1): 62-72.
- [16] 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.
- [17] 马敏, 胡大伟, 舒兰, 等. 城市轨道交通网络韧性评估及恢复策略[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(2): 396-404.
- [18] 谢会强, 杨丹, 张宽. 中国城市经济韧性的时空演化及网络结构研究[J]. *华东经济管理*, 2022, 36(11): 64-74.
- [19] 覃成林, 刘丽玲. 粤港澳大湾区经济韧性分析——基于经济联系网络的视角[J]. *学术论坛*, 2020, 43(6): 10-18.
- [20] 王玉珊, 王光辉. 中国城市技术创新网络结构韧性演化特征与影响因素[J]. *科技管理研究*, 2023, 43(19): 71-78.
- [21] 徐维祥, 周建平, 周梦瑶, 等. 长三角协同创新网络韧性演化及驱动机制研究[J]. *科技进步与对策*, 2022, 39(3): 40-49.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] JAN F, PERALTA D O, VANELLI F, et al. The emergence of urban community resilience initiatives during the COVID-19 pandemic: An international exploratory study[J]. *The European journal of development research*, 2022, 34(1): 432-445.
- [25] 彭翀, 陈思宇, 王宝强. 中断模拟下城市群网络结构韧性研究——以长江中游城市群客运网络为例[J]. *经济地理*, 2019, 39(8): 68-76.
- [26] 王欣, 吴殿廷, 王红强. 城市间经济联系的定量计算[J]. *城市发展研究*, 2006(3): 55-59.
- [27] 李亚, 张曼, 邵方. 河北省城市公路交通联系引力分析[J]. *全国商情(经济理论研究)*, 2007(12): 10.
- [28] 李博, 曹盖. 基于涉海A股上市公司的中国沿海地区海洋经济网络结构韧性演化研究[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(6): 945-955.
- [29] 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.
- [30] 杜雨弦. 复杂网络中节点重要度评估算法的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [31] 成渝地区双城经济圈建设规划纲要[N]. *人民日报*, 2021-10-21(001).
- [32] STEFAN L, THIERSTEIN A, HOYLER M. The world city network: Evaluating top-down versus bottom-up approaches[J]. *Cities*, 2018, 72: 287-294.
- [33] 黄传超, 胡斌. 基于复杂网络的企业关系网络的弹性研究[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(S1): 686-690.
- [34] 叶磊, 段学军, 欧向军. 基于交通信息流的江苏省流空间网络结构研究[J]. *地理科学*, 2015, 35(10): 1230-1237.

图表来源:

图1-7: 作者绘制

表1-5: 作者绘制

收稿日期: 2022-12-21

(编辑: 李方)