

杜文瑄，翟国方，鲁钰雯．基于网络要素的城市网络韧性评价研究进展[J]．风景园林，2025，32（10）：21-31．

基于网络要素的城市网络韧性评价研究进展

杜文瑄 翟国方* 鲁钰雯

摘要：【目的】随着信息技术和区域一体化发展，城市网络更易受到各类灾害扰动的影响。城市网络韧性作为区域韧性研究的重要议题，开展科学的韧性评价有利于实现区域可持续发展。目前绝大多数城市网络韧性研究都采用网络结构、网络功能的视角，缺乏系统完善的城市网络韧性综述。【方法】基于CiteSpace和VOSviewer文献计量软件，对2000年1月1日—2025年5月2日的城市网络韧性的研究成果进行综述，揭示该领域的研究热点和演化趋势。【结果】1）交通、信息、经济、创新网络的主要特征及适用的灾害场景具有较大差异。2）基于不同网络要素的城市网络韧性评价方法在实际应用中具有优势和局限。3）探索性提出基于网络要素的城市网络韧性的评价框架，实现从“单网络评价”走向“多元跨网络评价”的网络韧性评估的理论思维突破。【结论】未来可以在网络节点识别、联系空间效应、网络结构特征和网络功能模拟等方面深入研究，为灾害扰动视角下区域韧性评价和政策制定提供科学依据。
关键词：区域规划；复杂网络；城市网络韧性；韧性评价；研究进展
基金项目：国家重点研发计划“城镇可持续发展关键技术与装备”重点专项“城市系统韧性功能提升关键技术研究与应用”（编号2023YFC3805204）；江苏省自然科学基金“洪涝灾害情境下基于深度学习的城市精细时空尺度空间韧性动态优化路径”（编号BK20220782）；中国博士后科学基金特别资助（站中，编号2023T160302）

中图分类号：TU984 文章编号：1673-1530(2025)10-0021-11 收稿日期：2024-11-10
文献标识码：A DOI：10.3724/j.fjyl.LA20240026 修回日期：2025-08-08

伴随区域一体化的发展进程，城市间要素流动加快，逐渐形成一个由交通网络、信息网络、经济网络、创新网络构成的复杂城市网络系统。网络要素是城市网络系统的空间构成和基本表征，涉及网络节点、网络联系、网络结构、网络功能4个部分^[1-4]。其中，网络节点是城市网络系统的基本空间单元；网络联系是节点资源流动的路径通道；网络结构是由不同等级、位置的网络节点和不同规模、方向的网络联系共同构成的空间拓扑关系；网络功能是城市网络系统抵御灾害冲击、迅速恢复系统功能的能力。灾害扰动下，一方面，城市网络系统能够通过保障网络节点辐射作用、网络联系连通水平、网络结构拓扑特征、网络功能恢复程度来实现网络韧性的整体提升；另一方面，也加剧了灾害扰动在城市网络中迅速传播的风险，造成区域性冲击影响^[5]。因此，有必要关注网络节点、网络联系、网络结构、网络功能等网络要素的时空演变，以提升城市网络应对灾害扰动的

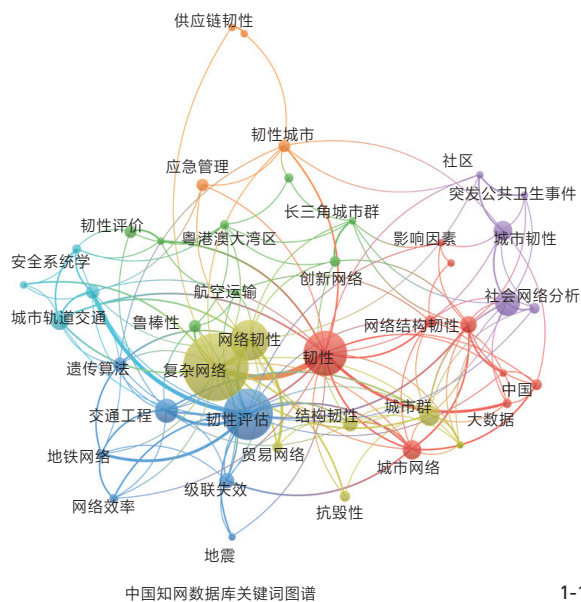
能力。
韧性概念最早应用于工程物理领域，用于刻画外力冲击下物体维持稳定和快速恢复到最初状态的能力。随着区域受到的灾害扰动不断增加，韧性理论开始转向区域韧性研究，反映区域内不同城市的灾害抵御、应对和恢复能力。在交通技术与经济全球化等因素推动下，各类灾害扰动沿着城市间的要素联系迅速扩散，对区域发展造成严重影响。城市网络韧性逐渐成为区域韧性研究的重要内容，其概念内涵和评价方法多从网络结构、网络功能进行分析，如根据网络节点的拓扑关系属性，采用层级性、匹配性等指标来反映网络结构特征^[6]；或构建仿真模型对城市网络开展模拟攻击，探讨灾害扰动下网络功能时序变化^[7]。
在此背景下，如何根据具体灾害场景以选择合适的城市网络类型和网络特征，如何采用科学的评价方法以测度城市网络韧性的时空演变趋势，目前还缺乏系统完善的城市

文章亮点：
1、将交通网络、信息网络、经济网络、创新网络作为城市网络系统的核心构成部分，深入分析灾害扰动对不同城市网络特征的影响路径。
2、以网络要素为研究视角，对基于节点要素、联系要素、结构要素、功能要素的城市网络韧性评价方法展开综述，提炼出城市网络韧性评价方法的适用场景以及局限性。
3、结合“网络类型—网络特征—评价方法”的逻辑链，构建基于网络要素的城市网络韧性的评价框架，探讨了面向具体灾害的城市网络评价方法的选择过程，为防灾减灾政策制定提供科学依据。

网络韧性综述。基于此，笔者按照“韧性本质内涵—城市网络系统构成—城市网络韧性评价方法—城市网络韧性评价框架—未来展望”这一研究主线，在综述交通、信息、经济、创新网络的基本特征及灾害适用场景上，对基于网络要素的城市网络韧性评价研究展开综述。以期对城市网络韧性研究提供理论支持，为区域制定防灾减灾政策提供借鉴。

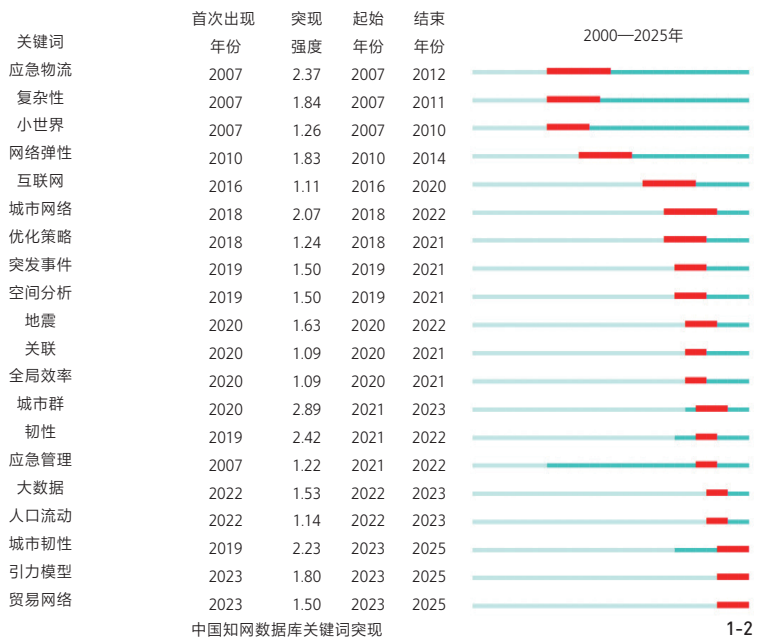
1 城市网络韧性研究趋势

笔者借助CiteSpace和VOSviewer文献计量软件，对城市网络韧性的中英文文献的关键词图谱和关键词突现进行可视化分析，以展示该领域的研究重点和时序演进（图1）。其中，中文文献以中国知网数据库作为数据源，检索词为“网络韧性”和“城市”；英文文献以Web of Science核心数据库作为数据源，检索词为“network resilience”和“cities”，检索的文献发表时间设定为2000年1月1日—2025年5月2日，共检索到中文



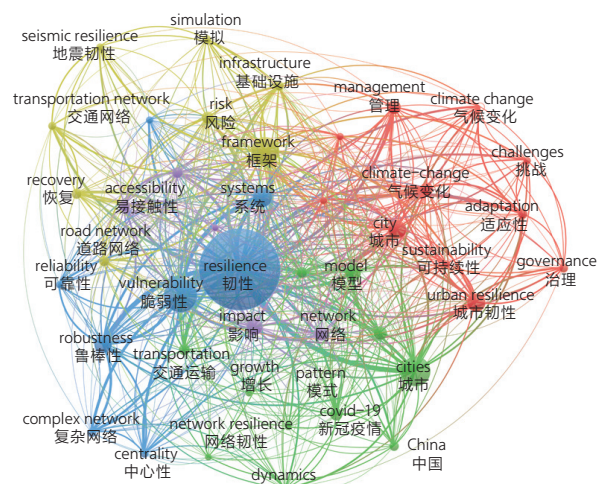
中国知网数据库关键词图谱

1-1



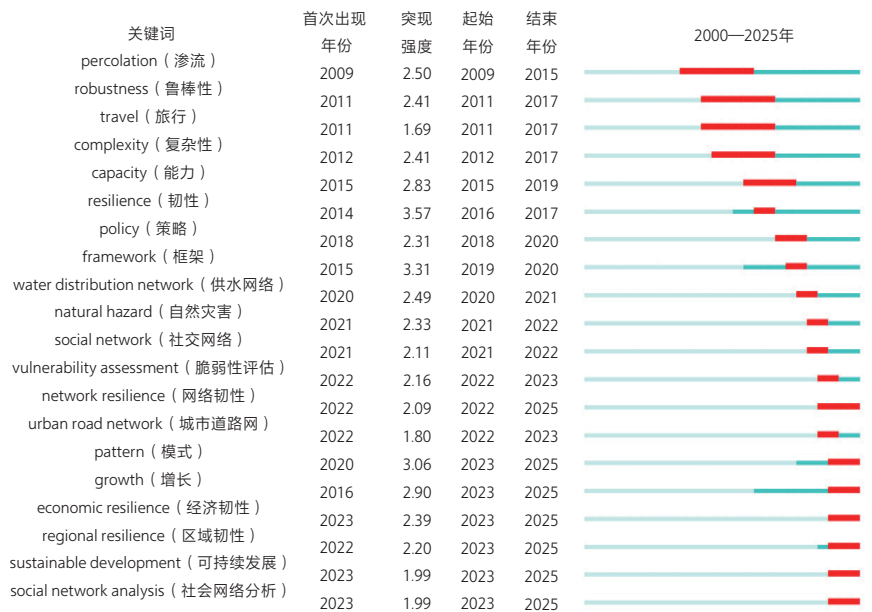
中国知网数据库关键词突现

1-2



Web of Science核心数据库关键词图谱

1-3



Web of Science核心数据库关键词突现

1-4

1

1 城市网络韧性研究关键词图谱

Map of keywords in the research on urban network resilience

文献 861 篇, 英文文献 2 761 篇。在此基础上, 阅读初步检索到的文献全文, 按照以下 2 个标准进一步筛选文献: 1) 研究内容涉及网络节点、网络联系、网络结构、网络功能这 4 个网络要素; 2) 非综述类文献。最终筛选出 439 篇中文文献、542 篇英文文献, 作为本研究的数据库。

中文文献的关键词图谱中, 复杂网络、

韧性、韧性评估、交通工程是主要的聚类关键词,表明中文文献更聚焦于交通网络、复杂网络理论、韧性评价主题。2010年前,中文文献较多涉及复杂网络理论在城市物流系统的应用研究;2010—2020年,较多学者开始探索自然灾害、事故灾害对城市网络韧性的冲击影响以及应对策略;2020年后,中文文献开始聚焦于大数据技术为基础的交通、

创新、信息等多元网络。

英文文献的关键词图谱中,城市、韧性、脆弱性和框架是主要的聚类关键词,表明英文文献聚焦于韧性特征、研究框架。2010年前,多数英文文献关注渗流的复杂网络特性;2010—2020年,学者开始关注鲁棒性、复杂性、框架,探索城市网络特征以及相应的研究框架构建;2020年后,较多研究关注自然

灾害、脆弱性评估、经济韧性、城市道路网等多重网络类型和多维网络韧性评价方法。对比来看，中英文文献都关注各类灾害扰动下城市网络韧性的时空演变，前者更关注各类评估模型在城市网络韧性中的实际应用和制定灾害应对策略，后者更加注重以交通网络为主的网络特征和韧性规律。

2 城市网络系统构成及特征

城市网络系统构建是评价城市网络韧性的前置条件，探索城市网络系统构成及特征对于减轻灾害影响具有重要作用。相比区域韧性研究集中在工程、社会、经济和生态4个系统维度，城市网络韧性研究则更多探讨受到灾害扰动严重影响、以人为活动主体的交通运输、信息传递、经济贸易、创新合作等区域流动关系^[2]，仅将生态联系作为城市网络韧性的发展基底。因此，本研究基于工程、社会、经济和创新系统，将交通网络、信息网络、经济网络、创新网络作为城市网络系统的核心构成部分（表1）。

2.1 工程系统——交通网络

交通网络是城市资源流动的物质载体，能够保障灾害扰动后应急药品、医疗设备等物资的及时运输和合理配置。从基础设施和人群移动视角来看，相关研究可以划分为2类。一类研究是将航运港口、机场、高铁站、地铁站作为网络节点的基础设施网络，探讨事故灾害下不同地理区位、等级地位的城市网络的恢复能力和性能损失，如模拟城市轨道交通网络恢复场景时，优先恢复高层级性节点以提升网络恢复效率^[7]；关注港口安全事故下航运网络的可达性的网络特征变化^[8]。另一类研究则是分析自然灾害、公共卫生事件下移动电话信令、高德迁徙等时空大数据测度的流动人口网络特征变化，如分析极端洪水下的设施损坏对流动人口网络的恢复性、流动性等网络特征的影响^[9]；探究新冠病毒疫情传播与流动人口网络的传输性、集聚性等网络特征的关联^[2]。

交通网络研究相对完善，基础设施网络研究和流动人口网络研究存在互补性和差异性。前者重视网络可达性、层级性，有利于

表1 灾害扰动对不同类型城市网络特征的影响路径 ^[2-3, 8-19]			
Tab. 1 Influence path of disaster disturbance on urban network characteristics ^[2-3, 8-19]			
网络类型	网络特征	灾害类型	影响路径
交通网络	基础设施网络	事故灾害	影响人口、货物移动的便捷程度 ^[8]
			影响关键路径的资源运输 ^[8]
	人口流动网络	自然灾害	影响交通网络结构的复原速度 ^[9]
			灾害物理性破坏使得交通功能损失 ^[9]
信息网络	风险关注网络	公共卫生事件	人口流动频繁的网络节点会加快疫情传播 ^[10]
			具有良好交通集聚功能的区域会加快疫情传播速度 ^[10]
	旅游信息网络	各类灾害	影响灾情信息传播速度和灾害损失降低程度 ^[2, 11]
			影响灾害预警、舆论等信息在城市网络中的通达程度 ^[11]
			影响区域协调替代路径的能力 ^[2]
经济网络	贸易流量网络	公共卫生事件、自然灾害	交通管控政策或灾害物理性破坏可能会降低远距离旅游关注倾向，促进较近地理距离、高同配性的人群流动 ^[12]
			人群能够应用虚拟网络空间的旅游服务产品，提升信息网络韧性 ^[12]
			重要节点的旅游关注量变化可能更易受灾害影响 ^[13]
	企业关联网络	资源供应压力	导致贸易流的联系中断或减弱 ^[14]
			降低城市网络贸易联系的便捷程度 ^[14]
			受到严重灾害扰动的节点的相对优势地位下降 ^[14]
创新网络	专利技术网络	社会安全事件、公共卫生事件、自然灾害	高效率的经济网络结构能够较快响应资源需求变化 ^[15-16]
			高自足性的网络结构能够保障资源的本地供给 ^[16]
			某条企业合作联系路径受到交通管控政策中断时，其他替代路径的资源供应能力 ^[17]
	科研合作网络	社会经济压力	高中心性的网络节点易成为生活物资、医疗药品等资源分配的关键节点 ^[17]
创新网络	人才流动网络	鲁棒性	具有高鲁棒性的城市网络结构能够保障技术合作和就业稳定 ^[2]
			处于较好网络位置的城市能够从周边城市专利合作中获益 ^[18]
	非对称性	紧密性	高层级性网络节点在创新资源配置和风险管理中起重要作用 ^[3]
			影响网络节点间知识交流、论文合作的便捷程度 ^[3]

降低城市交通成本和促进流动人口网络发展；后者则通过流动人口强度反向指引基础设施网络发展方向，优化资源配置。具体来看，基础设施网络研究多从宏观视角探索交通站点的互联互通，有助于制定合理的交通规划策略以提高运输效率，但紧密联系的各类型基础设施网络也会加剧某一节点故障后的级联传播风险。相比基础设施网络仅考虑交通站点的物理连接，流动人口网络研究则更加强调产业差距、城市规模、户籍制度、风险认知等社会经济因素对居民个体的交通流动的微观影响。流动人口网络研究适用于区域发展和人口政策的优化提升，但在交通流量预测、流动路径模拟方面仍具有较大复杂性和挑战性。

2.2 社会系统——信息网络

在信息技术快速发展的影响下，承载政治、经济、文化等内涵的信息网络成为城市网络系统研究的重要内容。从灾害认知和灾后行为的视角来看，信息网络研究可划分为2类。风险关注网络研究集中在探索各类灾害下城市居民对周边城市的风险信息搜索的网络特征变化，如判断台风、新冠病毒疫情影响前后具有高紧密性的网络特征的城市节点，探索其在灾害预警中的重要作用^[2]；评估洪涝灾害下城市网络中灾害信息传递的紧密性、多样性等网络特征^[11]。旅游信息网络研究集中在风险扰动后旅游景点、游览路线、途经城市等旅游信息搜索的网络特征变化，如选取旅游信息网络的匹配性、生长性等网络特征，

表2 不同类型城市网络的网络要素的具体表征

Tab. 2 Specific characterization of network elements of different types of urban networks

网络类型	网络节点	网络联系	网络结构	网络功能
交通网络	机场、高铁、公交、地铁等基础设施站点、城市居民	交通联系道路、人口流动路径	交通集聚区域、人口集聚区域	交通性能恢复速度、物资供给能力
信息网络	城市、城市居民	信息传播路径	信息关注区域、灾情传播区域	灾情通达程度、信息多元传递路径
经济网络	国家、城市、企业、金融机构	资金供应路径、货物运输路线	贸易合作区域、企业关联区域	资源供应能力、企业合作抗扰能力
创新网络	高校、企业研发中心、科研机构、人才	知识共享路径、人才移动路径	创新合作区域、人才集聚区域	技术合作便捷程度、人才吸引水平

探索新冠病毒疫情影响下城市居民旅游倾向的演变^[12]；评估地震后旅游信息网络的规模性的网络特征，分析信息网络强度与地理空间距离、灾后恢复时间的相关性^[13]。

风险关注网络研究和旅游信息网络研究都体现了城市居民对灾害扰动的风险信息关注，前者集中在识别高风险节点和风险信息的传递路径，有利于实现灾前及时预警和减灾策略制定。然而，风险关注网络研究依托某一类或几类搜索引擎的查询趋势，其评价结果受到使用人群、关键词选择的偏差影响。旅游信息网络研究对风险关注网络研究起到了拓展和补充作用，更重视灾害信息关注与旅游出行意愿的相关性，进一步为风险扰动下政府和旅游企业的旅游路径推荐和发展规划制定提供理论参考。但旅游信息网络研究仅能够代表居民未来出行的意愿概率，与实际出行下的城市网络韧性格局存在一定差距。

2.3 经济系统——经济网络

城市间多元产业协作形成了经济网络。贸易流量网络研究关注社会安全事件下城市之间的资本、商品等经济活动的动态变化，如采用流动性、连通性、规模性等网络特征，分析国际冲突下石油贸易网络的贸易流向和优势节点变化^[14]。企业关联网络研究以 GaWC 团队于 2010 年提出的链锁网络模型为依据^[15]，侧重企业间金融投资、分支关系所形成的城市经济联系，如探究企业关联网络减轻资源供应压力的自足性、传输性的网络特征^[16]；探讨新冠病毒疫情对核心工业企业关联网络的多样性、中心性的网络特征影响^[17]。

贸易流量网络和企业关联网络都从产业合作的角度对经济网络展开探索，这些研究突破了早期经济引力模型结果不真实的局限，

从产业类型角度更加深入地探讨了经济网络格局的形成机制。具体来看，贸易流量网络聚焦全球层面的贸易往来，有助于理解经济一体化趋势以及促进城市积极融入国际产业分工。但此类研究受到国家贸易政策、经济规模、地理距离的复杂影响，贸易额、货物运输距离难以完全表征全球城市间的实际经济联系强度。企业关联网络研究关注城市群、省域层面企业的经济合作，能够为区域产业政策制定提供决策支持。然而，基于上市公司数据构建的企业关联网络忽视了中小企业的经济活动，易低估边缘城市的中心性、自足性等网络特征水平。

2.4 技术系统——创新网络

随着知识经济和科学技术的加强，区域逐渐转向依托技术知识的创新合作模式。专利技术网络研究关注社会安全事件下专利权主体关系的时空演变，如评估经济危机下具有高鲁棒性、中介性的网络特征的创新节点，有研究发现这类节点能够保障城市创新能力的稳定发展^[18]。科研合作网络关注社会经济压力对论文合作活动的长期影响，如结合层级性、传输性的网络特征，探索期刊论文合作频次较高的城市节点的创新联系强度变化^[3]。人才流动网络关注不同国家人才的时空移动路径，如评价社会经济压力下人才流动网络的非对称性、紧密性的网络特征，以识别能够快速吸引人才资源的核心网络节点^[19]。

这 3 类网络从专利技术、科研知识、人才资源方面分别探索了创新网络的韧性表征。专利技术网络研究关注城市间专利合作申请和专利转让，有助于分析专利技术发展趋势和优化创新产业规划，但专利数据时空分辨率较低，难以捕捉微观尺度下城市间技术的短期流动。科研合作网络研究关注网络节点

间共同专著或论文合作情况，为区域制定科技创新协同政策提供支持；然而，此类研究仅反映论文合作规模，忽视了合作质量对创新发展的作用。人才流动网络研究强调国内外人才迁移活动的时空特征，有利于调整城市人才引进政策并提升区域竞争能力；但人才流动网络研究侧重于学历水平，忽视了技术能力、职业类型等方面的差异对人才移动路径的影响。

3 基于网络要素的城市网络韧性评价方法

城市网络韧性的科学评价是实现区域可持续发展的基础，国内外学者从网络类型、系统阈值、拓扑结构、功能损失等维度探讨城市网络韧性能力^[3, 7, 18]。不同类型的城市网络在网络特征、灾害影响路径方面具有差异性，如交通网络相比信息网络更关注物理路径的连接性和可达性。但是，这些网络在节点、联系、结构、功能这 4 类关键网络要素方面具有共性^[3, 12]（表 2），即城市网络都是由基础设施、企业等节点个体在一定区域范围内的联系路径所构建的，形成的整体网络也都具有拓扑结构和功能意义。因此，网络节点、网络联系、网络结构、网络功能这 4 个网络要素适用于所有城市网络，且在城市网络韧性研究中具有普适性。本研究结合各类城市网络特征，对基于网络要素的城市网络韧性评价研究展开综述。

3.1 城市网络韧性的节点评价

节点评价研究是以城市网络节点的层级性、流动性等网络特征为基础，关注节点在城市网络韧性格局及其时空演变中起到的作用。一方面，早期研究结合中心地理论、中心—外围结构等理论模型开展节点重要程度

评价^[20]，涉及人口规模、经济基础、行政等级等固有属性。然而，这些城市固有属性难以反映真实的城市流动关系和城市空间位置。其中，交通和经济网络的研究结合层级性、中心性的网络特征，采用级联失效下的度中心性、最短路径等指标变化，识别在城市网络中起到人员运输、产品供应的重要实体枢纽节点^[6, 21]；创新和信息网络则更加关注中介性、规模性的网络特征，选取中介中心性、特征向量中心性等方法，反映重要节点在线上知识交互、信息传递方面的带动作用^[12, 22]。另一方面，随着灾害扰动的逐渐增强，病毒、舆情伴随人口流动在城市网络中迅速扩散，部分学者开始关注交通网络、经济网络的流动性特征，结合流行病传播动力学模型以及梯度提升回归树、随机森林等机器学习算法，开展不同人口规模、流动强度的节点传播能力评价^[10, 23]。

总体而言，节点重要程度评价能够识别静态场景下具有积极作用的关键节点，如交通运输中的综合换乘枢纽或经济发展中的贸易合作中心。然而，该方法难以评估各类灾害下城市网络具有潜在消极作用的关键节点，且仅适用于节点间存在依赖关系的城市网络。节点传播能力评价能够模拟预测灾害扰动下的关键节点的信息传递、病毒传播的动态过程，有利于区域及时切断传播途径和实施针对性减灾措施，然而节点传播能力评价多探索人口流动对病毒传播的促进作用，忽视了防灾政策干预、经济文化差异等影响因素。

3.2 城市网络韧性的联系评价

网络联系的产生源于不同网络节点间的资源流动，涉及可达性、非对称性等网络特征。已有城市网络韧性文献中有关网络联系评价研究可归纳为 3 类。1) 联系紧密程度方面，Lu 等^[24]基于经济网络的自足性特征，分析了中国经济网络面对新冠病毒疫情的联系强度和稳定程度；赵梓渝等^[25]结合交通网络可达性特征，评价了春运期间加权有向人口流动网络的联系差异和控制能力，该研究结果能够提供比无权无向城市网络更完善的指导参考。2) 联系影响范围方面，Bergantino 等^[26]采用网络直径、最长联系距离的评价方

表3 基于联系要素的城市网络韧性评价方法^[20, 22, 24-33]

Tab. 3 Evaluation method for urban network resilience based on network connection^[20, 22, 24-33]

分类	研究内容	评价方法	具体内涵
联系紧密程度	联系深度	引力模型 ^[20] 、连锁算法 ^[24]	反映人口、GDP等非实测网络和企业投资、专利合作等实测网络的联系强度
	联系广度	结构洞限制度 ^[22]	每条网络联系中涉及的不同基础资源数量
	联系差异	有向转变中心性 ^[25]	城市网络中人口、信息、技术、资金等资源的主要扩散方向和强度
		网络连接度 ^[31]	网络联系深度的时序变化
		特征向量中心度 ^[32]	网络节点间有向联系深度的空间差异
联系影响范围	联系距离	网络直径、最长联系距离 ^[24]	较短的联系距离能够迅速地实现资源传递
	辐射范围	断裂点 ^[33]	网络联系的影响范围和辐射强度
	区域划分	层次聚类、最小跨度树、模块度 ^[27]	根据网络联系的紧密程度、邻接类型划分区域空间
联系空间效应	空间效应	偏离均值标准差倍数、空间计量模型、经济隶属度、多元回归模型 ^[28-30]	依据网络联系方向、深度、节点绩效等，分析网络联系的空间效应

法，分析了交通网络的可达性特征；马海涛等^[27]则进一步根据创新网络紧密性特征，选取最小跨度树、模块度等方法来探索网络联系的辐射范围，划分中国科技创新功能区域。3) 联系空间效应方面，部分学者关注交通网络的可达性特征和经济网络的自足性特征，分别采用偏离均值标准差倍数、多元回归模型的评价方法^[28-29]，探索人口、经济的实体流动对区域发展的借用规模效应；Ren 等^[30]考虑信息、创新网络的及时性、紧密性特征，采用面板平滑转换回归模型和中介效应模型，探索信息、创新资源的虚拟集聚对产业结构的非线性空间效应（表 3）。

目前，城市网络韧性的联系评价方法已经相对完善，重点关注国家、城市群尺度网络联系的时空差异及外部效应。但 3 类网络联系评价研究的实际适用场景是不同的。联系紧密程度评价适用于探索城市网络联系的强度和方向性的场景，评价结果有利于优化产业核心轴线和交通路网布局。联系影响范围评价适用于分析城市网络联系的层级结构和发展模式，可为区域政策制定和地区统筹协调提供理论指导。然而，前 2 类评价研究侧重于基础设施、产业互动层面的城市网络联系，忽略了信息传递、知识合作等非物质层面。联系空间效应评价能够从更为全面的视角来分析城市网络联系的空间效应以及影响因素，但多数研究将全局网络的网络密度、

平均路径长度作为空间效应表征指标，较少采用单个节点的联系类型、联系方向、拓扑特征等。

3.3 城市网络韧性的结构评价

网络结构是各类节点、联系形成的空间拓扑关系，其评价研究主要关注交通、经济网络保障结构稳定的集聚性、连通性特征，以及信息、创新网络促进转型发展的生长性、鲁棒性特征。已有城市网络韧性的网络结构评价研究可以从两方面展开论述。整体网络结构方面，王胜鹏等^[34]结合经济网络的连通性特征，利用网络密度、网络关联度、网络等级度对中国数字经济空间网络结构进行评价；苏海洋等^[35]关注信息网络的生长性特征，采用网络密度、核心一边缘结构、凝聚子群的评价方法，探索社会经济压力下粤港澳大湾区的旅游信息网络结构的适应能力；叶琴等^[36]考量了创新网络的鲁棒性特征，对比随机攻击、蓄意攻击下创新网络保持冗余路径和快速恢复的能力。个体网络结构方面，Taylor 等^[37]根据地理位置、经济创新、基础设施等因素，较早从全球尺度探索了单个城市在全球网络结构中的连通程度和影响能力；Nie 等^[38]以成都和纽约市的出租车出行网络为例，结合交通网络的集聚性特征，评价了城市网络结构内各节点吸纳交通流量的程度（表 4）。

总体上，多数结构评价研究仍采用社会

表4 基于结构要素的城市网络韧性评价方法^[2-3, 21, 34-36, 38-41]

Tab. 4 Evaluation method for urban network resilience based on network structure^[2-3, 21, 34-36, 38-41]

分类	研究内容	评价方法	具体内涵
整体网络结构	整体网络连通程度	网络关联度 ^[34] 网络密度 ^[35]	网络结构中所有节点实现直接或间接联系的概率 网络结构的通达程度
	整体网络等级分布	网络等级度 ^[34] 核心—边缘结构 ^[21]	网络结构的等级秩序分布 网络结构内存在连接紧密的核心区域和相对分散的边缘区域
	整体网络集群特性	凝聚子群 ^[35]	部分网络节点紧密连接形成的小团体现象
		小世界系数 ^[36]	网络结构的内部集聚程度
		模块化指数 ^[39]	网络结构的群落分布特征
	个体网络连接能力	匹配性 ^[3] 平均近邻度、Jaccard相似系数 ^[40]	节点是否倾向于与等级规模、经济结构相似的节点建立联系 用于判断节点在城市网络结构中的分布模式以及共同邻近节点数量
个体网络结构	个体网络地位作用	度中心性、接近中心性、中介中心性 ^[3] 结构洞 ^[38]	节点在城市网络结构的等级地位和联系广泛性 网络结构中存在某些节点能够与核心节点直接发生联系
	个体网络集聚情况	富俱乐部系数 ^[40] 集聚性 ^[41]	城市网络结构中高层级性节点的相互连接程度 城市网络结构中节点的聚集趋势

表5 基于功能要素的城市网络韧性评价方法^[2-3, 5, 7, 10, 40, 42-50]

Tab. 5 Evaluation method for urban network resilience based on network function^[2-3, 5, 7, 10, 40, 42-50]

分类	研究内容	评价方法	具体内涵
功能模拟预测	灾害扰动模拟	仿真模拟法 ^[3]	采用随机攻击、蓄意攻击等网络攻击策略，分析灾害扰动对网络功能的影响
		韧性曲线法 ^[7]	构建灾害扰动下城市网络功能的时序变化曲线
		网络传播模型 ^[10]	模拟信息、疾病、技术传播过程中的网络功能变化
		贝叶斯模型 ^[42]	基于网络功能的中断概率，开展地震、洪水等急性冲击下的城市网络模拟预测
	未来情景模拟	社会网络分析法 ^[5]	选取多样性、传输性、鲁棒性等网络指标来模拟城市网络功能在慢性压力下的动态变化
		空间网络增长模型 ^[40]	模拟不同政策方案、产业类型、地理空间下城市网络功能变化
		多主体模拟法 ^[43, 48]	探索政府、企业、社区等不同主体在慢性压力中的协同模式
		神经网络法 ^[44]	通过学习人口流动、创新互动等样本数据，模拟和预测未来城市网络功能发展和韧性需求
		蒙特卡洛模拟法 ^[45]	模拟经济发展、资源短缺等不同未来情景下的城市网络韧性的功能损失和演化趋势
		网络协同作用	耦合协调度模型 ^[2]
功能级联效应	网络级联失效	超网络模型 ^[46]	不同城市网络功能的相互依赖关系
		级联故障模型 ^[49]	灾害扰动下具有较高依赖关系的网络节点或联系的连锁失效情景
		节点阈值模型 ^[47]	将相互依赖的节点能够共同承受灾害扰动的阈值作为网络级联失效的前提条件
		网络重载模型 ^[50]	当城市网络功能超出最大负载容量时，会产生级联失效的后果

网络分析方法，对交通设施、信息交互、企业组织和技术合作等领域的城市网络结构进行评估^[2, 8]。整体网络结构评价适用于识别城市群等较大尺度区域的核心集聚区域和边缘区域，探索差异化合作模式和协同策略，但忽视了不同网络节点的韧性水平和发展路径差异。个体网络结构评价适用于识别城市尺度的具有发展潜力的核心节点，强调单个网

络节点从网络结构中获取交通、信息、资金、技术等资源的综合能力，有利于实施针对性的城市规划政策。但此类研究对人口出行、车辆货运等微观层面的数据收集较为困难。此外，整体网络结构和个体网络结构分别从宏观尺度、微观尺度进行城市网络结构评价，不同尺度评价方法的适用性和互补性也需进一步探索。

3.4 城市网络韧性的功能评价

功能评价研究是对风险扰动下恢复性、传输性等网络特征的韧性关注和方法探索。早期研究多围绕地铁、公交等各类城市交通网络，关注单个城市网络的功能模拟预测。研究内容涉及灾害扰动模拟和未来情景模拟，前者侧重自然灾害、事故灾害等急性冲击对城市网络功能的短期扰动，后者则强调资源短缺、城市化进程等慢性压力对城市网络功能的长期影响。灾害扰动模拟方面，Tang 等^[7]结合交通网络的恢复性特征，构建了基于随机攻击和蓄意攻击的线性规划模型，以模拟轨道交通网络的抗扰能力和恢复过程；Jiang 等^[42]基于贝叶斯模型，非线性模拟灾害扰动导致的节点、联系的物理性损坏情景以及城市网络功能演变。未来情景模拟方面，Erfan Doraki 等^[43]根据居民行为特征、城市社会经济、发展模式等条件，采用多主体模拟法，设计 4 类未来情景并探索不同政策干预对交通网络传输性特征的影响；Yang 等^[44]也考虑了交通网络传输性特征，运用长短期记忆网络模型，模拟并对比了不同出站客流量情境下北京交通网络的功能表现；Wang 等^[45]关注经济网络传输性、多样性特征，结合蒙特卡洛模拟法和多主体模拟法，测度了不同碳交易企业的价格波动风险和传染过程，以及模拟了经济网络功能的动态变化。2010 年后，多个城市网络的功能级联效应也逐渐受到关注，如 Du 等^[2]结合基于信息、经济、交通、创新的多层级网络的恢复性、传输性、多样性特征，选取耦合协调度模型，评估了多层级网络的功能协同以及灾后恢复能力；路青等^[46]结合经济网络的传输性特征，利用企业分支机构、投融资关系数据，采用超网络模型对京津冀城市群的超网络之间的经济交互作用进行了评价；Gao 等^[47]考虑交通网络的恢复性特征，研究了灾害扰动下多个相互依赖网络的失效阈值和恢复水平，为基础设施网络的风险管理和应急预案提供了理论依据（表 5）。

已有城市网络韧性的功能评价研究积极探索多元灾害对城市交通网络功能的影响。功能模拟预测研究多用于针对单个城市网络，精确模拟灾害发生概率和冲击强度，为灾前

预警平台搭建、灾中避难路径选择、灾后物资调配等韧性策略提供数据支持，但研究往往忽视其他城市网络的互动影响。功能级联效应研究则适于多个城市网络，以反映各类灾害扰动下不同城市网络间的协同作用或级联失效，从而制定更加有效的区域减灾政策。由于综合考虑灾害传播机制、节点容量负载、网络依赖关系等更多因素，功能级联效应研究的分析模型和计算成本较大。

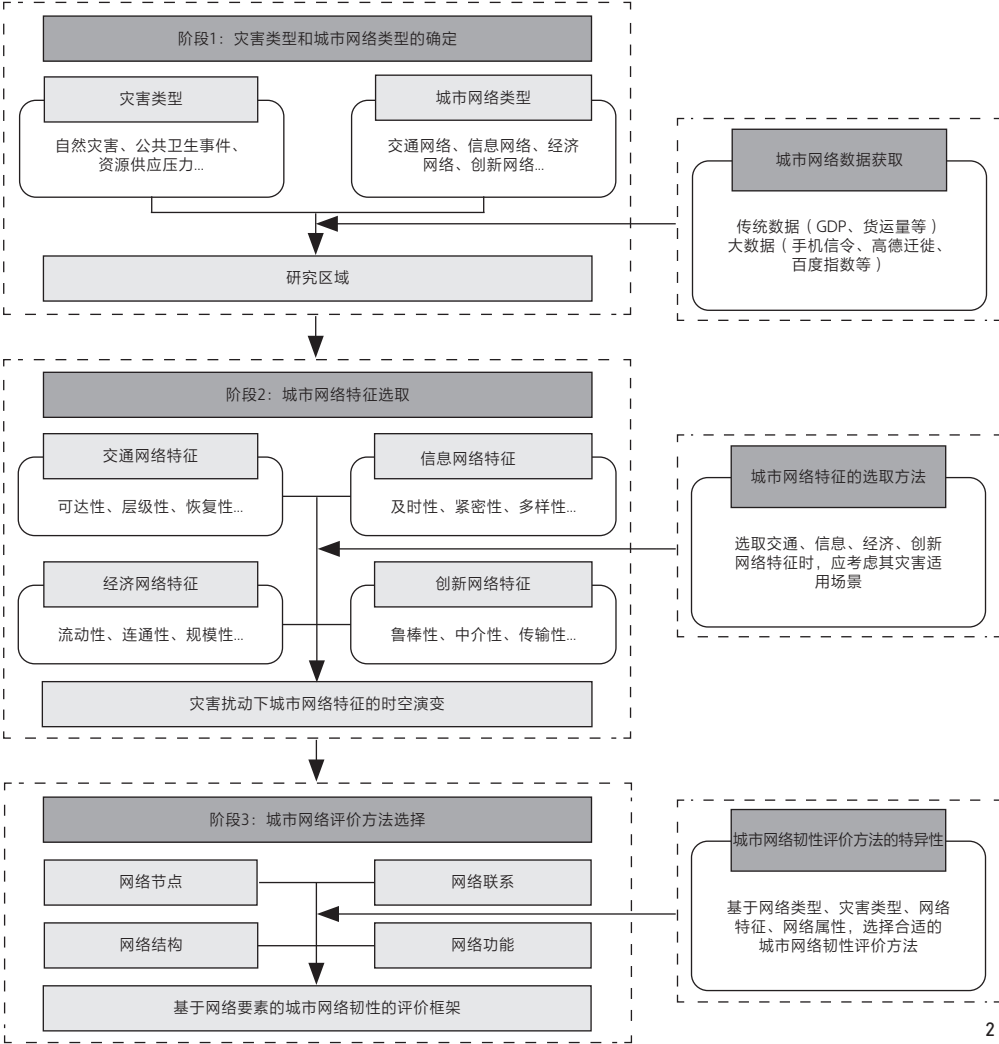
综合来看，基于各类网络要素的城市网络韧性评价方法的适用场景以及局限性是不同的。基于节点要素的评价方法能够直观反映具有积极影响力或消极灾害传播能力的关键网络节点，但忽视了网络整体特性。基于联系要素的评价方法有利于评估不同节点间联系强度和依赖关系，但仅从联系的局部角度考虑网络韧性。基于结构要素的评价方法探索了不同形态特征、拓扑结构的城市的韧性能力。然而，在灾害冲击下结构动态响应方面的评价方法不足。基于功能要素的评价方法能够对城市网络韧性的功能失效阈值、网络性能损失进行评估，但研究结果难以表征真实世界的灾害扰动情况。

4 基于网络要素的城市网络韧性的评价框架

如前所述，多数研究多基于结构要素、功能要素的评价方法对城市网络韧性进行测度，局限于某一类网络要素、忽视灾害属性的评价方法难以综合表征城市网络韧性的动态演进。基于此，笔者结合“网络类型—网络特征—评价方法”的逻辑链，建立基于网络要素的城市网络韧性的评价框架（图2）。

阶段 1：灾害类型和城市网络类型的确定。城市网络类型包含交通网络、信息网络、经济网络、创新网络。在选定灾害类型和城市网络类型后，可以收集 GDP、高铁班次等传统数据，以及手机信令、微博签到、高德迁徙等大数据，实现对研究区域的多源数据整合和跨网络韧性评估。

阶段 2：城市网络特征选取。在考量城市网络特征时，应当分析城市网络特征与灾害类型的适配性。如新冠病毒疫情会伴随人



2 基于网络要素的城市网络韧性的评价框架
Evaluation framework for urban network resilience based on network elements

口流动传播，从而加剧灾害冲击对交通网络的影响，应当选取交通网络的传输性、集聚性特征^[1]。

阶段 3：城市网络评价方法选择。评价方法围绕网络节点、网络联系、网络结构、网络功能的不同网络要素展开。在进行城市网络评价方法选择时，应当综合考量城市网络类型、灾害类型、网络属性、网络特征等方面。如交通网络依赖实体基础设施，涉及重要性、流动性等网络特征，相关研究多构建函数模型来模拟交通网络受到地震、洪水等自然灾害的破坏概率。信息网络具有虚拟性、非地理依赖性的网络属性，涉及规模性、及时性等网络特征，评价方法多采用引力模型

和社会网络分析法，探索灾害冲击后不同阶段的风险信息关注。经济网络强调实体经济活动和产品供需关系，涉及中心性、自足性等网络特征，多采用贝叶斯结构向量自回归模型、QAP（quadratic assignment procedure）分析法来模拟经济网络的灾害连锁性冲击过程和影响因素。创新网络主要依托线上平台交流和技术知识虚拟传播，涉及中介性、非对称性等网络特征，主要采用仿真模拟法来评估创新网络的连通性阈值^[18]（表6）。

5 结论与展望

5.1 研究发现与启示

作为韧性研究的重要议题，城市网络韧

表6 城市网络韧性评价方法的选择
Tab. 6 Selection of evaluation methods for urban network resilience

网络类型	灾害类型	网络属性	网络要素	网络特征	评价方法
交通网络	事故灾害、自然灾害、公共卫生事件等	依赖实体设施地理距离限制	网络节点	重要性、流动性	度中心性、特征向量中心性、流行病传播动力学模型等
			网络联系	可达性	网络直径、最长联系距离
			网络结构	集聚性	模块化指数、凝聚子群、小世界系数等
			网络功能	恢复性、传输性	韧性曲线法、仿真模拟法、网络传播模型等
信息网络	各类灾害	虚拟数据联系非地理依赖性	网络节点	规模性	度中心性、特征向量中心性
			网络联系	及时性、紧密性	网络连接度、面板平滑转换回归模型、结构洞限制度等
			网络结构	匹配性、生长性	匹配性、核心—边缘结构、结构洞等
			网络功能	多样性	社会网络分析法、仿真模拟法、超网络模型
经济网络	社会安全事件、公共卫生事件、自然灾害等	产品供需关系实体经济活动	网络节点	流动性、中心性	流行病传播动力学模型、机器学习算法、度中心性等
			网络联系	自足性	偏离均值标准差倍数、空间计量模型、多元回归模型等
			网络结构	连通性	网络关联度、匹配性、平均近邻度等
			网络功能	传输性、多样性	神经网络法、函数模型法、QAP分析法等
创新网络	公共卫生事件、自然灾害、资源供应压力等	线上平台交流技术知识传播	网络节点	中介性、层级性	中介中心性、度中心性、特征向量中心性等
			网络联系	非对称性、紧密性	网络连接度、结构洞限制度、有向转变中心性等
			网络结构	鲁棒性	网络关联度、网络密度、结构洞等
			网络功能	传输性	社会网络分析法、仿真模拟法、神经网络法等

性反映了不同城市借助交通、信息、经济、创新等多元网络协作，实现灾害扰动下发育、强化、抵抗、恢复的全过程能力。笔者对已有城市网络韧性研究进行了系统性综述，构建基于网络要素的城市网络韧性的评价框架。本文的研究结论主要包括 3 个方面。

第一，不同城市网络在主要特征和灾害适用场景上具有较大差异。自然灾害、公共卫生事件往往对人口流动产生限制作用，可以探究自然灾害、公共卫生事件对交通网络的可达性、流动性特征的影响。经济危机、资源供应等对经济社会造成长期扰动，未来研究可以关注经济危机、资源供应对经济、创新网络的多样性、鲁棒性特征的影响。若涉及各类灾害下城市居民的风险感知和出行意愿，可以选取信息网络开展匹配性、规模性的网络特征分析。

第二，基于不同网络要素的评价方法各具优点和局限性。基于节点要素的评价方法适用于识别城市网络中具有较强影响力的关

键节点，基于联系要素的评价方法能够用于评估网络联系的相互作用强弱，基于结构要素的评价方法适用于测度不同拓扑结构特征的城市网络韧性，基于功能要素的评价方法能够探索不同灾害下城市网络性能的损失程度和恢复能力。

第三，本研究融合传统数据、大数据等多源数据类型，结合“网络类型—网络特征—评价方法”的逻辑链，构建基于网络要素的城市网络韧性的评价框架。网络类型包含交通网络、信息网络、经济网络、创新网络。在网络特征选择时，应该考量具体城市网络特征的灾害适用场景。在评价方法选择时，应该结合灾害类型、城市网络属性和网络特征，实现科学合理的城市网络韧性评价。该评价框架有助于明确城市网络韧性的概念内涵和组成要素，适用于多数城市网络韧性研究，具有一定的科学性和应用价值。

5.2 未来研究方向

1) 结合灾害传播的重要节点识别。基于

行政等级、人口规模等固有属性或度中心性、最短路径等结构特征的重要节点识别具有一定的参考意义，但仅能从积极的辐射带动方面进行评判，忽视了节点促进灾害传播的消极影响。未来可以借助网络传播模型、代理基模型、微观仿真出行模型、神经网络法等前沿模型方法，模拟信息、病毒、人口等资源在城市网络中的动态传播过程，识别城市网络中兼具资源控制作用和灾害适应能力的重要节点。

2) 探索网络联系的空间效应研究。目前空间效应研究主要采用空间计量模型、回归分析等方法，从静态视角探讨整体城市网络联系的溢出效应，无法反映单个节点的拓扑特征、空间位置、联系深度等因素带来的复杂影响。因此，可以结合中心性、集聚性、传输性等拓扑指标，构建动态视角下的城市网络联系的空间效应评估框架。

3) 完善多维尺度的网络结构测度。已有研究注重全球、城市群、都市圈等宏观尺度，对不同尺度的网络结构的评价方法的差异和适用性探索不足。一方面，宏观尺度既要关注区域整体格局，也应引入动态交通分配模型、图神经网络等精细化的微观尺度模型方法，加深网络结构特征与居民个体属性之间的相关性分析。另一方面，微观尺度在探索居民经济社会属性、出行方式等方面影响的基础上，也应采用模块化指数、核心—边缘结构等宏观尺度方法，探索城市、街道的网络结构特征，有利于提高不同尺度的网络结构评价结果的可对比性。

4) 实现多灾情景的网络功能模拟。已有研究多采用计算机中断模拟的方法，探讨单次灾害扰动下的城市网络功能的时空演变，忽视了不同灾害扰动的传播机制、触发关系对城市网络功能的影响。未来应采用循环神经网络、长短期记忆网络等深度学习方法，建立城市网络功能的综合评估模拟模型。对于多灾情景的模拟，可利用生成对抗网络、卷积神经网络，在模型设计阶段探索不同灾害组合概率，结合历史灾害数据，选择最佳多灾害触发方案，以提高模拟结果准确程度。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] DU W X, ZHAI G F, SHI Y J, et al. Structural Resilience Disparities in Regional City Networks Under the Influence of Typhoon Fitow and COVID-19[J]. Cities, 2024, 155: 105460.
- [3] 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.
- [4] 古恒宇, 黎宇翔, 劳昕, 等.疫情期间中国春运人口流动网络特征及其影响因素[J].经济地理, 2024, 44 (5): 53-63.
- GU H Y, LI Y X, LAO X, et al. Characteristics and Influencing Factors of Population Flow Network During China's Spring Festival Under COVID-19 Pandemic[J]. Economic Geography, 2024, 44 (5): 53-63.
- [5] 林樱子, 彭翀, 王宝强.基于传播模拟的国土开发空间网络结构韧性优化[J].自然资源学报, 2021, 36 (9): 2193-2204.
- LIN Y Z, PENG C, WANG B Q. Optimization of Network Structural Resilience of Territory Development Zones Based on Propagation Simulation[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36 (9): 2193-2204.
- [6] 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.
- LI B, CAO G. Structural Resilience Change of China's Marine Economic Network Based on the Data of Sea-Related A-Share Listed Companies[J]. Progress in Geography, 2022, 41 (6): 945-955.
- [7] TANG J Q, XU L, LUO C L, et al. Multi-disruption Resilience Assessment of Rail Transit Systems with Optimized Commuter Flows[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 214: 107715.
- [8] 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.
- [9] TANG J Q, WANG J, LI J Y, et al. Predicting Human Mobility Flows in Response to Extreme Urban Floods: A Hybrid Deep Learning Model Considering Spatial Heterogeneity[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2024, 113: 102160.
- [10] SHI S, PAIN K, CHEN X. Looking into Mobility in the Covid-19 "Eye of the Storm": Simulating Virus Spread and Urban Resilience in the Wuhan City Region Travel Flow Network[J]. Cities, 2022, 126: 103675.
- [11] 耿硕璘, 周旗, 李明洁, 等.新媒体用户灾害认知和响应的时空分异及影响因素研究: 以山东寿光洪灾为例[J].灾害学, 2020, 35 (2): 210-216.
- GENG S L, ZHOU Q, LI M J, et al. Spatial-Temporal Differences in Disaster Perception Among New Media Users and the Influence Factors: A Case Study of the Shouguang Flood in Shandong Province[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35 (2): 210-216.
- [12] 王章郡, 周小曼, 方忠权.基于新冠疫情冲击的城市旅游流网络结构韧性评估: 以重庆中心城区为例[J].干旱区资源与环境, 2022, 36 (11): 148-157.
- WANG Z J, ZHOU X M, FANG Z Q. Evaluation on the Resilience of Urban Tourism Flow Network Structure Under the Impact of COVID-19 Pandemic: A Case of Chongqing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36 (11): 148-157.
- [13] 阮文奇, 李勇泉.自然灾害型危机事件对客源地旅游需求的影响及空间差异: 九寨沟地震后的时空异质性分析[J].经济地理, 2018, 38 (8): 214-223.
- RUAN W Q, LI Y Q. The Impact and Spatial Difference of Natural Disaster Crisis on Tourist Demand[J]. Economic Geography, 2018, 38 (8): 214-223.
- [14] 刘亦文, 刘惠.国际石油贸易网络动态演化及其驱动因素[J].资源科学, 2024, 46 (9): 1852-1866.
- LIU Y W, LIU H. Dynamics and Driving Factors of the International Oil Trade Network[J]. Resources Science, 2024, 46 (9): 1852-1866.
- [15] TAYLOR P J, HOYLER M, VERBRUGGEN R. External Urban Relational Process: Introducing Central Flow Theory to Complement Central Place Theory[J]. Urban Studies, 2010, 47(13): 2803-2818.
- [16] 王彦开, 赵渺希, 吉瑞, 等.珠三角巨型城市区域食物供应网络: 特征、韧性保障策略[J].自然资源学报, 2024, 39 (3): 564-581.
- WANG Y K, ZHAO M X, JI R, et al. Food Supply Networks in the Pearl River Delta Mega-City Region: Characteristics, Resilience and Security Strategies[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39 (3): 564-581.
- [17] 王腊银, 傅越, 赵东.重大灾害阻隔下区域核心工业企业供给网络投资优化和韧性提升研究[J].运筹与管理, 2023, 32 (7): 70-77.
- WANG L Y, FU Y, ZHAO D. Investment Optimization and Resilience Improvement of Regional Core Industrial Enterprises' Supply Network in Case of Severe Disasters[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32 (7): 70-77.
- [18] TÓTH G, ELEKES Z, WHITTLE A, et al. Technology Network Structure Conditions the Economic Resilience of Regions[J]. Economic Geography, 2022, 98 (4): 355-378.
- [19] SHI W T, MU X Y, YANG W L, et al. The Spatial Mobility Network and Influencing Factors of the Higher Education Population in China[J]. Science and Public Policy, 2024, 51 (3): 406-420.
- [20] BAI C Q, ZHOU L, XIA M L, et al. Analysis of the Spatial Association Network Structure of China's Transportation Carbon Emissions and Its Driving Factors[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 253: 109765.
- [21] 廖创场, 李晓明, 洪武扬, 等.交通流空间视角下粤港澳大湾区网络结构多维测度[J].地理研究, 2023, 42 (2): 550-562.
- LIAO C C, LI X M, HONG W Y, et al. Multi-dimensional Measurement of Network Structure of Guangdong - Hong Kong - Macao Greater Bay Area from the Perspective of Traffic Flows Space[J]. Geographical Research, 2023, 42 (2): 550-562.
- [22] 宓泽锋, 邱志鑫, 尚勇敢, 等.长三角区域创新集群的技术创新联系特征及影响探究: 以新材料产业为例[J].地理科学, 2022, 42 (9): 1522-1533.
- MI Z F, QIU Z X, SHANG Y M, et al. Technological Innovation Connection Characteristics and Influence of Regional Innovation Cluster in the Yangtze River Delta: A Case Study of New Material Industry[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42 (9): 1522-1533.
- [23] JOHN R S, MILLER J C, MUYLEAERT R L, et al. High Connectivity and Human Movement Limits the Impact of Travel Time on Infectious Disease Transmission[J]. Journal of the Royal Society, Interface, 2024, 21 (210): 20230425.
- [24] LU Q, DING B H, GU J P. Regional Economic Vulnerability Based on Investment and Financing Network Attacks[J]. Cities, 2024, 150: 105012.
- [25] 赵梓渝, 魏治, 王士君, 等.有向加权城市网络的转变中心性与控制力测度: 以中国春运人口流动网络为例[J].地理研究, 2017, 36 (4): 647-660.
- ZHAO Z Y, WEI Y, WANG S J, et al. Measurement of Directed Alternative Centricity and Power of Directed Weighted Urban Network: A Case of Population Flow Network of China During "Chunyun" Period[J]. Geographical Research, 2017, 36 (4): 647-660.
- [26] BERGANTINO A S, GARDELLI A, ROTARIS L. Assessing Transport Network Resilience: Empirical Insights from Real-World Data Studies[J]. Transport Reviews, 2024, 44 (4): 834-857.
- [27] 马海涛, 胡夏青.城市网络视角下的中国科技创新功能区划研究[J].地理学报, 2022, 77 (12): 3104-3124.
- MA H T, HU X Q. Regionalization of Scientific and Technological Innovation in China: From the Perspective of Urban Network[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77 (12): 3104-3124.
- [28] 黄建中, 许燕婷, 胡刚钰, 等.大都市圈网络外部性的借用规模分析: 以上海大都市圈为例[J].城市发展研究, 2024, 31 (3): 16-23.
- HUANG J Z, XU Y T, HU G Y, et al. Analysis of Borrowing Scale of Metropolitan Network Externalities: A Case Study of the Shanghai Metropolitan Area[J]. Urban Development Studies, 2024, 31 (3): 16-23.
- [29] 赵渺希, 王彦开, 胡雨珂, 等.广佛都市圈网络外部性的城镇借用规模绩效检验[J].地理研究, 2022, 41 (9): 2367-2384.
- ZHAO M X, WANG Y K, HU Y K, et al. Examining Performance of Urban Borrowed Size Based on the Towns' Network Externalities of Guangzhou - Foshan Metropolitan Areas[J]. Geographical Research, 2022, 41 (9): 2367-2384.
- [30] REN M H, ZHOU T, WANG C X. How Does Information Flow in the Urban Network Reshape Agglomeration Externalities? Considering Non-linear Effects, Proximity Mechanisms, and Industrial Heterogeneity[J]. Cities, 2024, 152: 105247.
- [31] 曹湛, 彭震伟.崛起的全球创新中心: 中国城市在全球城市科研合作网络中的演化特征[J].城市规划学刊, 2021 (5): 23-31.
- CAO Z, PENG Z W. Rising Global Innovative Centers: The Evolution of Chinese Cities in Global Interurban Scientific Collaboration Networks[J]. Urban Planning Forum, 2021 (5): 23-31.
- [32] 饶悦, 沈丽珍, 汪侠.基于大型科研基础设施共享的区域创新网络研究: 以山东省为例[J].地理研究, 2021, 40 (6): 1840-1856.
- RAO Y, SHEN L Z, WANG X. Research on Regional Innovation Network Based on Large-Scale Scientific Research Infrastructure Sharing: Take Shandong as an Example[J]. Geographical Research, 2021, 40 (6): 1840-1856.

[33] 刘心怡.粤港澳大湾区城市创新网络结构与分工研究[J]. 地理科学, 2020, 40 (6): 874-881.

LIU X Y. Structure and Division of Urban Innovation Network in the Guangdong – Hong Kong – Macao Greater Bay Area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40 (6): 874-881.

[34] 王胜鹏, 滕堂伟, 胡森林, 等.中国数字经济空间网络结构演化及其驱动因素[J].地理科学, 2024, 44 (5): 743-753.

WANG S P, TENG T W, HU S L, et al. Evolution and Driving Factors of Spatial Network Structure of Digital Economy in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44 (5): 743-753.

[35] 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.

SU H Y, LIU R H, WEN T. The Structure of Urban Tourism Information Network in the Guangdong – Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Tropical Geography, 2022, 42 (2): 220-235.

[36] 叶琴, 曾刚, 蒋海云.随机与蓄意攻击下长三角城市知识网络稳健性特征及其对创新绩效的影响[J].地理研究, 2024, 43 (5): 1088-1106.

YE Q, ZENG G, JIANG H Y. Robustness of Knowledge Networks in the Yangtze River Delta and Their Impact on Innovation Performance Under Random and Targeted Attacks[J]. Geographical Research, 2024, 43 (5): 1088-1106.

[37] TAYLOR P J, CATALANO G, WALKER D R F. Measurement of the World City Network[J]. Urban Studies, 2002, 39 (13): 2367-2376.

[38] NIE W P, CAI S M, ZHAO Z D, et al. Examining the Impact of Urban-Rural Spatial Structure on Mobility Networks: A Case Study of Taxis[J]. Cities, 2023, 141: 104512.

[39] HE D, CHEN Z X, PEI T, et al. Analysis of Structural Evolution and Its Influencing Factors of the High-Speed Railway Network in China's Three Urban Agglomerations[J]. Cities, 2023, 132: 104063.

[40] YANG Y T, JIA B, YAN X Y, et al. Structure and Dynamics of Urban Freight Truck Movements: A Complex Network Theory Perspective[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 158: 104442.

[41] YANG X D, LI H L, ZHANG J Y, et al. Urban Economic Resilience Within the Yangtze River Delta Urban Agglomeration: Exploring Spatially Correlated Network and

Spatial Heterogeneity[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 103: 105270.

[42] JIANG S Q, YANG L, CHENG G, et al. A Quantitative Framework for Network Resilience Evaluation Using Dynamic Bayesian Network[J]. Computer Communications, 2022, 194: 387-398.

[43] ERFAN DORAKI M, AVAMI A, BOROUSHAKI M, et al. Agent-Based Modeling for Sustainable Urban Passenger Vehicle Mobility: A Case of Tehran[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 135: 104380.

[44] YANG X, XUE Q C, DING M L, et al. Short-Term Prediction of Passenger Volume for Urban Rail Systems: A Deep Learning Approach Based on Smart-Card Data[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 231: 107920.

[45] WANG T, ZHANG X T, MA Y H, et al. Risk Contagion and Decision-Making Evolution of Carbon Market Enterprises: Comparisons with China, the United States, and the European Union[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 99: 107036.

[46] 路青, 宁静.基于企业数据的京津冀城市群网络结构解析: 区域性社会网络和超网络分析的应用[J].城市规划, 2024, 48 (9): 19-30.

LU Q, NING J. Network Structure Analysis of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on Enterprise Data: Application of Regional Social Network and Hypernetwork Analysis[J]. City Planning Review, 2024, 48 (9): 19-30.

[47] GAO J X, BULDYREV S V, STANLEY H E, et al. Networks Formed from Interdependent Networks[J]. Nature Physics, 2012, 8 (1): 40-48.

[48] MOSTAFIZI A, WANG H Z, COX D, et al. Agent-Based Tsunami Evacuation Modeling of Unplanned Network Disruptions for Evidence-Driven Resource Allocation and Retrofitting Strategies[J]. Natural Hazards, 2017, 88 (3): 1347-1372.

[49] GUO X Q, DU Q, LI Y, et al. Cascading Failure and Recovery of Metro – Bus Double-Layer Network Considering Recovery Propagation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 122: 103861.

[50] WANG Y Y, TIAN C W. Measure Vulnerability of Metro

Network Under Cascading Failure[J]. IEEE Access, 2020, 9: 683-692.

图表来源(Sources of Figures and Tables):

表 1 根据参考文献 [2][3][8]~[19] 整理绘制; 表 3 根据参考文献 [20][22][24]~[33] 整理绘制; 表 4 根据参考文献 [2][3][21][34]~[36][38]~[41] 整理绘制; 表 5 根据参考文献 [2][3][5][7][10][40][42]~[50] 整理绘制; 其余图表均由作者绘制。

(编辑 / 李清清)

作者简介:

杜文瑄 / 女 / 南京大学建筑与城市规划学院在读博士研究生 / 研究方向为城市经济韧性、城市网络韧性

翟国方 / 男 / 博士 / 南京大学建筑与城市规划学院教授 / 研究方向为国土空间规划、城市公共安全规划
通信作者邮箱: guofang_zhai@nju.edu.cn

鲁钰雯 / 女 / 博士 / 南京大学建筑与城市规划学院副研究员 / 研究方向为城市空间韧性、城市灾害风险评估

DU W X, ZHAI G F, LU Y W. Research Progress of Urban Network Resilience Assessment Based on Network Elements[J]. Landscape Architecture, 2025, 32(10): 21-31. DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20240026.

Research Progress of Urban Network Resilience Assessment Based on Network Elements

DU Wenxuan, ZHAI Guofang*, LU Yuwen

Abstract:

[Objective] With the advancement of information technology and regional integration, urban networks are more vulnerable to various disaster disturbances, posing serious challenges to population mobility, information transmission, industrial collaboration and innovative cooperation. Urban

network resilience is an important issue in regional resilience research. The term reflects the ability of urban network systems to develop, strengthen, resist, and recover quickly from disaster disturbances, through the collaboration of urban networks. The current research on urban network resilience primarily focuses on network structure and network function, seldom

considering systematic review of evaluation methods for urban network resilience. Therefore, this research comprehensively summarizes the evaluation methods for urban network resilience from the perspective of network elements.

[Methods] Based on the bibliometric method, this research analyzes the previous research on urban network resilience, revealing the research hotspots and evolution trends in this field. By following the workflow of network types – network characteristics – evaluation methods, the research constructs an evaluation framework of urban network resilience based on network elements.

[Results] More and more scholars pay attention to the evaluation methods for urban network resilience. Firstly, the characteristics of multiple urban networks and their disaster application scenarios are quite different. The transportation network focuses on the mobility of population flow and accessibility of infrastructure. The information network considers the promptness and diversity of disaster risk information transmission. The economic network focuses on the self-sufficiency and scale of capital supply. The innovation network emphasizes the asymmetry and mediation of knowledge cooperation. Natural disasters, public health events and accidents often restrict population mobility. In this research, the transportation network is selected for resilience evaluation. Economic and innovation networks are selected to reflect the stability of industrial cooperation and technological exchange in the face of long-term disasters, such as the economic crisis, the COVID-19 epidemic, and socio-economic pressures. The information network is selected for exploring the risk perception of urban residents to various disaster disturbances. Secondly, the evaluation methods for urban network resilience based on four network elements have different advantages. The evaluation method for urban network resilience based on network node can identify the key nodes with positive influence or negative disaster transmission ability in urban networks. The evaluation method for urban network resilience based on network connection can assess the connection strength and dependency relationships between different nodes. The evaluation method for urban network resilience based on network structure can explore the urban networks with different morphological characteristics and topological structures. The evaluation method for urban network resilience based on network function can realize the function assessment by simulating multiple disaster disturbance scenarios. Thirdly, this research proposes an evaluation framework for urban network resilience based on network elements, aiming to achieve a breakthrough in network resilience evaluation from “single network evaluation” to “multiple network evaluation”. This evaluation framework involves three stages. In the first stage, when selecting the type of urban network, the intensity of disaster disturbances on urban network is considered. The urban networks include transportation networks, information networks, economic networks and innovation networks. In the second stage, the influence path of disaster disturbances on urban network characteristics is considered, and appropriate urban network characteristics are selected. In the third stage, the evaluation methods focus on four network elements, including network node, network connection, network structure and network function. When choosing the evaluation methods for urban network resilience, the types, attributes and characteristics of urban networks are considered. However, the research on urban network resilience faces limitations. 1) Little attention has been paid to the disaster propagation ability of network nodes, and the diffusion mechanism of disaster disturbances needs to be further analyzed. 2) The complex effects of connection type, connection direction and topological feature on spatial effects need to be explored. 3) Social network analysis is the main evaluation method for network structure. A scientific and unified evaluation framework has not yet formed. 4) The simulation results of network function cannot sufficiently represent the

disaster disturbances in the real world.

[Conclusion] There exists a large amount of research on urban network resilience to resist single disaster disturbance. The research fields include urban planning, geography, disaster science, etc.. Some research directions need to be deepened. 1) Evaluation method based on network node. Network propagation model, agent-based model and other model methods need to be emphasized in future research, in order to simulate the dynamic diffusion process of information, virus, and population. The important nodes in urban network that have both resource control function and disaster adaptation ability should be identified. 2) Evaluation method based on network connection. The evaluation method of spatial effect of network connection should be improved by combining the centrality, agglomeration, transmission and other topological indicators. 3) Evaluation method based on network structure. It is necessary to integrate macro-scale and micro-scale evaluation methods, so as to effectively compare the evaluation results at different scales. 4) Evaluation method based on network function. Deep learning methods such as recurrent neural network model and long short-term memory network model should be adopted. It is necessary to establish a network function simulation model under multi-disaster scenarios to improve the accuracy of research results.

Keywords: regional planning; complex network; urban network resilience; resilience assessment; research progress

Authors:

DU Wenxuan is a Ph.D. candidate in the School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University. Her research focuses on urban economic resilience, and urban network resilience.

ZHAI Guofang, Ph.D., is a professor in the School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University. His research focuses on territorial spatial planning, and urban public security planning.

Corresponding author Email: guofang_zhai@nju.edu.cn

LU Yuwen, Ph.D., is an associate research fellow in the School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University. Her research focuses on urban spatial resilience, and urban disaster risk assessment.