

城市网络韧性的理论缘起、概念辨析与分析框架

Urban Network Resilience: Theoretical Origins, Concept Discrimination and Analytical Framework

任婕 颜文涛 李子豪 黄钰婷

REN Jie, YAN Wentao, LI Zihao, HUANG Yuting

摘要：城市网络韧性是城市网络研究与区域韧性研究结合的产物。城市网络韧性概念的提出，拓展了区域韧性研究的视角和方法，是近年来兴起的热点话题。回顾城市网络韧性的理论缘起，笔者发现不同学者所述的城市网络韧性概念可以细分为“城市网络的本体韧性”和“城市网络支撑的韧性”两种类型。前者指代表征区域空间组织形态的城市网络本体结构应对扰动的能力，后者则指代区域中的城市利用城市网络支撑下的城际互补与协作关系应对扰动的能力。本文在解析城市网络韧性的概念、内涵和机理的基础上，从关键议题判定、测度方法选择和优化策略提出三个方面，探索性地建构了城市网络韧性研究的分析框架。本文可为城市网络韧性研究提供理论和方法参考，进而为面向风险治理的城市与区域空间组织优化提供科学依据。

Abstract: Urban network resilience is the product of integrating urban network research and regional resilience studies. The introduction of the concept of urban network resilience has broadened the perspective and methodology of regional resilience research, becoming a hot topic in recent years. Reviewing the theoretical origins of urban network resilience reveals that the concept, as discussed by different scholars, can be subdivided into two types: “resilience from urban networks” and “resilience of urban networks”. The former refers to the ability of cities within a region to respond to disturbances through intercity complementarity and cooperative relationships supported by urban networks, while the latter refers to the ability of the urban networks’ inherent structural organization, representing regional spatial organization, to respond to disturbances. Based on analyzing the concept, connotations, and mechanisms of urban network resilience, an exploratory analytical framework for urban network resilience research is constructed from three aspects: determining key issues, selecting measurement methods, and proposing optimization strategies. This paper provides an overall framework for urban network resilience research, thereby offering a scientific basis for optimizing urban and regional spatial organization from the perspective of risk governance.

关键词：城市网络韧性；城市网络；理论缘起；概念辨析；分析框架

Keywords: Urban Network Resilience; Urban Network; Theoretical Origin; Concept Discrimination; Analytical Framework

国家自然科学基金面上项目“沿海山地丘陵型城市洪灾韧性的表征测度、影响机制与规划调控研究”(52178048)；国家“十三五”重点研发计划课题“面向城市复杂系统与多种扰动的韧性城市理论体系”(2020YFB2103901)；国家留学基金委公派研究生项目(202206260214)

作者：任婕，同济大学建筑与城市规划学院，博士研究生

颜文涛（通信作者），博士，同济大学建筑与城市规划学院，教授，博士生导师；智慧城市感知与规划重大工程软件技术教育部工程研究中心，副主任；同济大学生态智慧与生态实践研究中心，副主任。yanwt@tongji.edu.cn

李子豪，同济大学建筑与城市规划学院，博士研究生

黄钰婷，同济大学建筑与城市规划学院，博士研究生

全球城市发展正面临前所未有的不确定性挑战。一方面，气候变化背景下，暴雨洪水、高温干旱等自然灾害频繁发生，严重威胁城市的安全和稳定^[1]；另一方面，受经济危机、突发疫情等影响，国际政治经济环境亦在持续演化^[2]。在此背景下，城市发展重心在注重“增长和效率”之外开始兼顾“安全和稳定”，城市和区域研究对城市韧性、区域韧性等议题的关注度不断升温^[3-5]。在经济全球化和区域一体化发展背景下，城市和区域进入了网络化发展的新阶段，推动了城市网络研究范式的产生^[6-7]。学者们依据基础设施、经济联系、要素流动等多元关系数据，对不同尺度的城市网络进行描绘^[8-9]，进而从网络视角对区域的空间格局特征、时空演化规律、生长动力机制、外部性和溢出效应等开展了研究^[10-13]。近年来，韧性与城市网络相关研究的融合趋势愈发明显，“城市网络韧性”逐渐成为城市规划学、地理学等领域研究的新方向^[14-16]。

城市网络和区域韧性等相关基础概念均源于西方学界，但我国学者在城市网络韧性研究领域展现了较高的研究热情和创新能力，在理论框架构建和实证分析方面均产出了诸多研究成果^[17-18]。然而，不同领域的学者对城市网络韧性内涵的理解存在差异，引发了一定程度的概念混淆，亟须进行概念辨析。同时，围绕城市网络韧性议题，有必要对已积累的研究成果进行

系统梳理和归纳,为未来相关研究的开展提供借鉴。基于此,本文通过介绍相关概念的理论缘起,从“城市网络的本体韧性”和“城市网络支撑的韧性”两个方面剖析城市网络韧性的概念内涵,进而构建城市网络韧性议题的分析框架,以期后续研究提供理论和方法参考。

1 城市网络韧性的理论缘起

1.1 城市网络研究概述

20 世纪后半叶以来的全球化浪潮中,城市逐渐成为驱动资本积累和承载生产要素的关键节点。伴随通信和交通技术的进步,城市的发展逐渐突破传统的政治与地理界限,形成了复杂、动态的全球城市网络。自 1960 年代起,彼得·霍尔(Peter Hall)、约翰·弗里德曼(John Friedmann)和萨斯基娅·萨森(Saskia Sassen)等学者先后对城市网络现象进行理论探索,奠定了城市网络研究的基础^[19,21]。20 世纪末,曼纽尔·卡斯特(Manuel Castells)提出了对城市网络研究具有里程碑意义的“流动空间”(space of flow)理论^[22]。同一时期,著名的全球化与世界城市研究网络(GaWC: Globalization and World Cities Research Network)开始采用企业总部分支、航空客流、跨国移民、创新合作等数据开展系列城市网络研究,对城市网络研究的方法论和数据选择产生了深远影响^[23,25]。

目前,被既有研究广泛采纳的城市网络概念来自意大利学者罗伯特·卡马尼(Roberto Camagni):“城市网络是由具有互补或协作关系的专业化中心(城市)组成的水平的非等级的系统”^[26]。研究普遍认为,城市间的合作和互补关系有利于形成协同效应,是城市网络外部性产生的关键,亦是推动城市主动向外结网的根本动力^[27,28]。受全球化趋势的影响,早期的城市网络研究主要在全球尺度开展。随着城市群、都市圈等逐渐成为国家参与全球竞争的关键单元^[29],世界各国愈发重视区域城市网络建设,在此背景下,城市网络研究逐渐扩展到区域尺度,极大补充了传统聚焦等级关系的区域城市体系研究^[30,31]。相关研究常将城市网络视为特定区域内的网络化空间结构的指代,并基于此探讨如何通过构建和优化城市网络来促进区域一体化发展等核心议题^[32,33]。

1.2 区域韧性概念演化

“韧性”(resilience)一词源于拉丁语 resilio,最初用于描述物体受损后恢复到原始状态的能力^[28]。近年来,韧性概念被引入区域研究,用于理解区域面向各种扰动的应对机制,并取得了丰富的研究成果^[34,35]。区域韧性研究经历了从“均

衡”(equilibrium-based)到“演化”(evolutionary-based)的视角转变^[36]。均衡视角下,区域被视为具有一个或多个稳定状态的系统,借鉴工程韧性和生态韧性理论,区域韧性被定义为:经历扰动后,区域保持稳定或快速恢复到扰动前的发展状态的能力^[37,38]。演化视角则摒弃了对“均衡状态”的追求,将区域视为一个不断演化、具有复杂适应性的系统,区域韧性被定义为:在长期发展中,区域不断调整自身结构以适应外部环境变化,实现持续增长的能力^[39,40]。

总体而言,均衡视角强调经历冲击型扰动时,区域短期内表现出的抵抗力和恢复力;演化视角则更关注长期“慢性燃烧”(slow burn)^①中,区域表现出的适应力和转型力^[41]。在实际发展中,区域需要面对多种类型的内外部扰动,结合这两种视角有利于更全面地理解区域城市系统和扰动的作用机制,从而制定更有效的区域韧性提升策略。

1.3 城市网络韧性概念的提出

目前,有关城市网络韧性的研究已经展开,但尚未形成统一的概念界定。现有研究对城市网络韧性的定义主要有两种类型:其一是遭遇外界扰动时,城市网络自身抵御冲击、维持网络结构和联系功能的能力^[42];其二是城市网络系统借助城市间的互补协作关系,预防、抵御、响应和适应外部冲击和慢性压力影响,并从各类型风险扰动中恢复或转型的能力^[17,43]。

可见,城市网络韧性是城市网络研究与区域韧性研究融合的产物(图1)。相较于传统聚焦促进要素流动、整合区域资源的城市网络研究,城市网络韧性研究强调考虑扰动因素,有利于进一步探讨城市“安全联结”的问题^[44,45]。相比于传统的区域韧性研究,城市网络韧性研究引入了网络分析

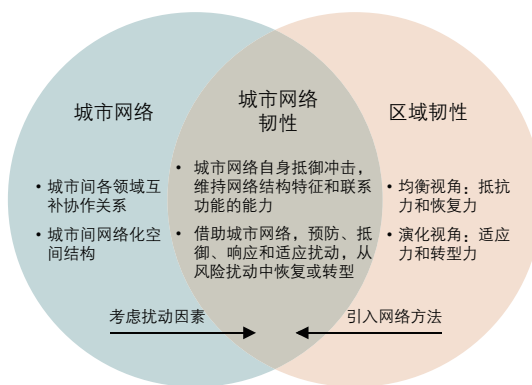


图1 城市网络韧性概念的来源与界定

① “慢性燃烧”是一个比喻性术语,用来描述一种持续、低强度但长期存在的压力或扰动状态。与突发的、高强度的扰动事件不同,慢性燃烧的问题可能不会立即引起广泛关注,但其长期的负面影响可以逐渐累积,对区域发展产生深远影响。

方法，不仅通过增加关系视角丰富了以属性视角为主的区域韧性研究^[46-48]，而且有利于引入社会网络、复杂网络等分析技术，推动区域韧性的深入研究^[49-50]。

2 城市网络韧性的概念辨析

2.1 两类城市网络韧性的概念内涵

由上文可知，既有研究中实际产生了两类城市网络韧性概念，其根源在于不同领域学者认知城市网络的视角不同：部分学者将城市网络视为网络化的城市区域空间结构，重点研究城市网络本体应对扰动的能力^[49,51]；另有学者将城市网络视为城市间社会、经济、文化等领域的互补协作关系，重点关注城市网络在城市应对扰动时发挥的作用^[43,52]。本文将前者概括为“城市网络的本体韧性”，将后者概括为“城市网络支撑的韧性”，并对其概念内涵进行对比（表1）。

城市网络的**本体韧性**所关注的韧性主体（扰动作用的对象）是城市网络本身，包括城市节点和节点间联系。与其他类型的网络一样，城市网络所代表的网络化的城市区域空间结构也会遭遇多种扰动影响，并在长期发展中持续演化。若城市网络能利用其内部结构特征（如冗余联系、多中心分布式结构等）在扰动作用时维持结构和功能的完整性，并在长期演化中利用网络整体的动态适应性和自组织能力不断适应新的环境条件，则被视为高韧性的表现。可见，城市网络的**本体韧性**本质上是网络化的城市区域空间结构的自身抗扰属性，是区域韧性在空间结构上的体现。其概念内涵可进一步明确为：城市网络（即网络化的城市区域空间结构）在遭遇各类扰动并经历变化时，通过网络整体的自组织与协调，表现出的抵抗、恢复、适应和转型的能力。

城市网络**支撑的韧性**所关注的韧性主体是城市网络中的城市，城市网络结构本身是否受到扰动影响不是研究关注的重点。对于受扰动影响的城市，表征城市间的物理空间连接和互动协作关系的城市网络能帮助其获取外部资源（人、财、物、信息、技术等），从而更好地应对扰动影响^[53]。可见，城市网络**支撑的韧性**，本质上是城市接入不同层级和尺度的城市网络后获得的应对风险扰动的能力。对于城市网络而言，

这是一种外部性。其概念内涵可进一步明确为：城市在遭遇各类扰动时，利用城市网络（即与其他城市在各领域的互补协作关系）所获得的预防、抵御和适应扰动，以及从中恢复或转型的能力。

2.2 城市网络的**本体韧性**特征分析

综合两种区域韧性视角，城市网络的**本体韧性**特征可归纳为均衡视角下的抵抗力和恢复力，以及演化视角下的适应力和转型力（图2）。其中，抵抗力指扰动发生时城市网络抵御扰动破坏，维持城际连通和其他区域功能的能力；恢复力指扰动后城市网络快速恢复结构完整性和正常功能的能力；适应力指城市网络不断调整优化其结构和功能以适应各种不确定因素的能力；转型力指城市网络在面对根本性、系统性的挑战时，通过重塑自身结构和完善网络功能实现转型发展的能力。不同类型的城市网络在基本结构和功能特征上存在差异，会影响其遭遇扰动时的反应速度和演化规律。下文将分别阐述城际物质实体网络和组织关系网络两大类城市网络的**本体韧性**特征^[54-55]。

城际物质实体网络包括不同城市间的交通、通信、能源等基础设施网络和生态网络等，其核心功能是承载城市间的人流、物流、信息流、自然流等多元要素流动。物质实体网络的节点和联系均需要依托地理空间而存在，网络一旦形成会具有较强的空间锁定效应^[56]。这一类城市网络主要受到地震、洪水、森林火灾、恐怖袭击等作用于实体空间的自然或人为扰动的影响^[57-58]。这些扰动不仅会破坏物质实体网络的物理结构，还可能限制或中断其功能的发挥。但通常而言，只要采取适宜的修复措施就能在一定时间内恢复其结构和功能。综上，可将城际物质实体网络的**本体韧性**界定为：抵御扰动对物质实体网络的物理性破坏，维持其结构完整性并持续为城市间的要素流动提供有力支撑，在扰动后快速恢复并完善网络功能的能力^[50,59]。

表1 两种城市网络韧性概念内涵的对比

比较项	城市网络的**本体韧性**	城市网络**支撑的韧性**
韧性视角	空间结构视角，视城市网络为网络化的城市区域空间结构	功能关联视角，视城市网络为城市间的互补协作关系
韧性主体	城市网络本体，包括城市节点和节点间联系	城市网络中的城市
韧性本质	网络化的城市区域空间结构的自身抗扰属性	城市接入城市网络后获得的抵抗“外部性”

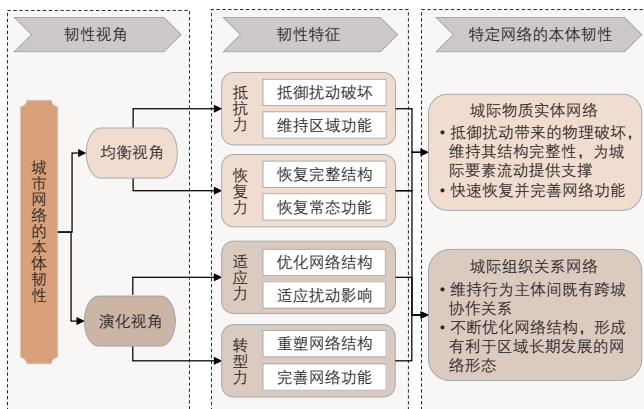


图2 城市网络的**本体韧性**概念与特征示意图

城际组织关系网络指不同城市行为主体（居民、企业、政府和非政府组织等）间因经济联系、合作交流、协同治理等所产生的功能关联网络^[60]，其核心功能是促进城市间的要素和能力的互补。组织关系网络节点的空间属性来自行为主体地理位置的聚合，联系则不依赖于地理空间，网络具有较强的灵活性和自组织性，处在持续的动态演化过程中。组织关系网络既会受到作用于实体空间的各类扰动的间接影响^[57,61]，也会受到经济危机、区域产业重构、市场主体迁移、疫情等无损于物质实体空间的扰动的直接影响^[62]。由于组织关系网络是对行为主体间关联关系的概化和抽象，各类扰动多数是通过改变城市中各类行为主体的空间布局、行为模式等来影响城际组织关系网络的结构特征^[63]。由于各类主体响应扰动需要一定时间，且其行为模式一旦形成会具有路径依赖特征，扰动对组织关系网络的影响存在滞后性，且可能产生难以恢复的长期甚至永久性影响^[64]。因此，城际组织关系网络的韧性可界定为：面对特定扰动或不断变化的自然、社会和经济环境时，维持跨城行为主体间既有协作关系，并不断优化网络结构，形成有利于区域长期发展的网络形态的能力。

2.3 城市网络支撑的韧性机理阐释

剖析不同扰动下城市网络与城市应对扰动过程的关系，对于理解城市网络支撑的韧性具有重要意义。总体而言，对于受扰动城市，城市网络兼具有利于应对扰动的正外部性和加剧扰动影响的负外部性，这些效应在应对冲击型扰动的短期阶段和长期发展过程中均有所体现（图3）。

面对自然灾害、事故灾害、疫情等冲击型扰动对城市生产生活秩序的破坏，城市网络的正外部性表现为：城市间合作应灾的组织关系网络能为受灾城市带来救灾人员、应急物资、应灾经验等多方面的支持，帮助其平稳度过灾中阶段，

并在灾后快速恢复^[65-66]。例如：诸多研究指出，不同尺度的医疗合作网络的建立在抗击新冠疫情中发挥了重要作用^[67-68]。但与此同时，具有传染性的扰动因子（如病毒、危险品、舆情等）也可能以各类城际流动要素（人、物、信息）为载体在城市间快速传播^[69-70]，导致未直接受到扰动影响的城市遭受级联影响，放大扰动事件的影响范围^[71]。同样以新冠疫情为例，已有研究发现病毒传播与城市间的人口、货物流动表现出极高的相关性^[72]，而为防止病毒扩散所采取的封控措施则对区域和全球的供应系统造成了剧烈冲击。

面对长期发展中不断涌现的技术变革、产业更新以及其他不确定因素，城市网络的正外部性表现为：通过城市间的产业合作，合力创造新发展机会，推动区域产业协同和产业链的延伸；通过城市间的人才、知识和技术流动，产生创新溢出效应，带动中小城市发展，同时避免产业成熟地区发生技术锁定，推动区域长期稳定发展。已有研究实证了区域一体化发展，以及城市间经济、技术联系的增加，能够推动城市经济韧性提升^[41,47]。然而，城市网络对长期发展的负面影响也不容忽视，具体表现为：大城市的虹吸效应会使中小城市的资源大量流出，削弱其应对危机和挑战的能力；城市间为吸引投资、人才和资源而产生恶性竞争，也会损害区域整体的长期韧性，使其难以有效应对未来的经济和环境变化^[73]。

3 城市网络韧性的分析框架

城市网络韧性研究方兴未艾，但不同研究中述及的城市网络韧性概念存在差异，引发了概念混淆、误用等现象。本文初步构建了城市网络韧性研究的分析框架（图4），认为开展城市网络韧性研究时，不能简单套用具有韧性内涵的网络指标，而应结合城市网络类型及其韧性机理，剖析关键议题，选择测度方法，进而提出有针对性的优化策略。

3.1 核心议题剖析

当前，诸多学者在探讨具有鲜明内涵差异的城市网络韧性问题时，采用了相似的研究方法和特征指标。这一现象看似是方法层面的误用，实际上反映了理论层面的概念杂糅和内涵不清。本文辨析了两类城市网络韧性概念，后续研究可以此为基础，剖析城市网络韧性研究的核心议题，从而厘清城市网络韧性研究的关键内容。

从城市网络的韧性视角出发，研究的核心议题是“城市网络本体是否具有抵抗、适应、恢复和转型等韧性能力”。不同类型城市网络面临的典型扰动各不相同，扰动的作用机制也存在较大差异，需要结合典型扰动情境研判城市网络的韧性特征属性。若扰动对城市网络的影响是短期且可以恢复的，则可以从均衡视角出发，重点关注网络结

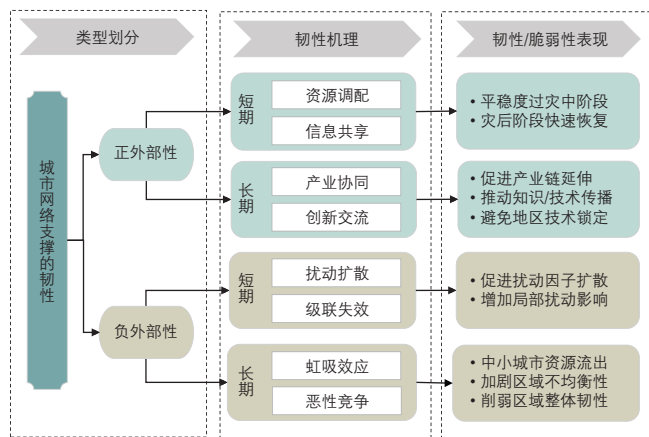


图3 城市网络支撑的韧性机理解释图

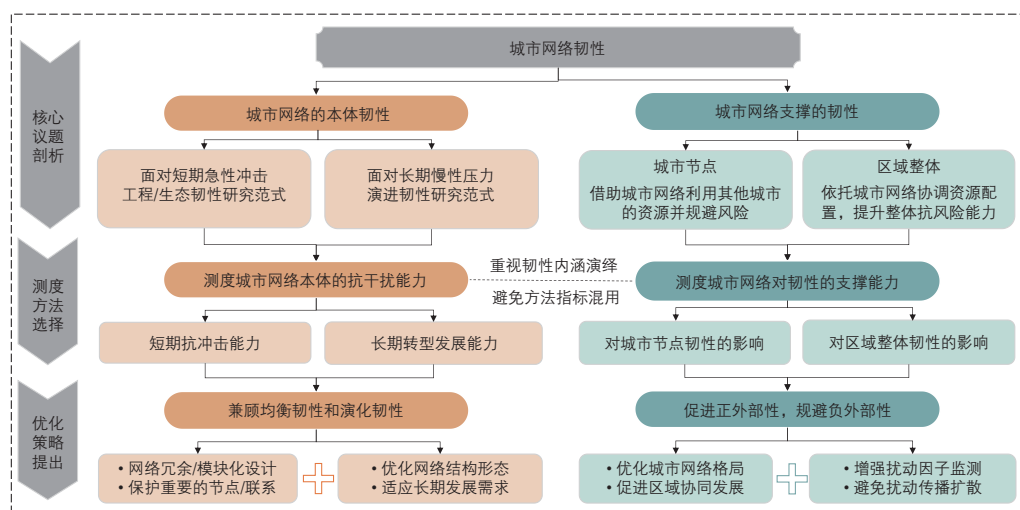


图4 城市网络韧性研究的分析框架图

构的抗毁能力；相反，若扰动对城市网络的影响是长期且难以恢复的，则更适合采用演化韧性的分析框架，研究在扰动的长期影响下，城际联系的消亡、维持和生长情况。

从城市网络支撑的韧性视角出发，研究的核心议题是“在城市和区域应对扰动的过程中，城市网络会产生的影响”。城市网络涉及多个维度，在剖析韧性议题时，需要重视各类城市网络对城市和区域韧性的差异化影响途径，并充分考虑潜在的正、负面双重影响。此外，由于城市网络支撑的韧性在城市节点和区域整体两个层面均有所体现，还需要进一步明确提升韧性的核心是围绕网络中的部分城市还是整个区域。个体城市层面，研究的重点是如何高效利用其他城市的资源来提升自身应对扰动的能力并规避来自外部的风险；区域整体层面，则需要兼顾各城市的韧性水平，通过区域资源的协同配置提升整体的抗风险能力。

3.2 测度方法选择

韧性测度是城市网络韧性研究的热点内容^[74-75]。伴随网络科学的发展，已形成了许多有关网络拓扑结构特征与韧性之间的关系共识性认知，因此众多研究使用代理指标法测度城市网络韧性。通常认为，与冗余度、模块化程度相关的指标，反映了网络吸收扰动影响、维持功能稳定的能力^[76-79]；层级性、匹配性、集聚性、传输性、中心性等相关指标则分别从网络整体层面和城市个体层面反映了城市网络促进城市间资源要素流动的能力^[16,18,42,80]。结合两类城市网络韧性的概念内涵可知，前一类网络特征指标反映了城市网络的主体韧性，后一类指标则反映了城市网络支撑的韧性。然而，采用代理指标法进行的测度研究往往要基于研究者对城市网络韧性以及上述分析指标的理解和演绎，具有一定的主观色彩。

因此，为了更加客观地测度两类城市网络韧性，需要结合其概念内涵选择和设计测度方法。

对城市网络的主体韧性进行测度的关键，在于识别和量化城市网络能在多大程度上应对多种扰动影响。目前，相关研究借鉴网络韧性研究的经典范式^[81-83]，通过观察节点/联系失效、随机故障、刻意攻击等中断模拟场景下网络结构的变化，从短期抗冲击能力的角度对城市网络的主体韧性进行了测度分析^[75]。然而，这些研究往往聚焦于城市网络的拓扑结构特征，忽视了其地理空间属性。未来需要综合考虑城市网络与地理空间的依赖关系，结合对典型扰动因子的时空分布规律的认识，力求在更为接近现实的场景下测度城市网络的韧性水平^[17]。此外，考虑到城市网络的动态性、开放性特征，还应从长期转型发展能力的角度出发，通过分析网络中旧联系的消亡和新联系的生成，补充和完善演化视角的城市网络主体韧性测度。

对城市网络支撑的韧性进行测度的关键，在于识别和量化城市网络对城市节点和区域整体韧性水平的支撑能力，可借用城市网络外部性研究中常用的相关性和计量回归分析方法^[73,84]。其中，相关性分析方法可判定城市网络特征指标是否会对城市/区域韧性产生影响及影响方向，计量回归方法则可进一步评估城市网络对城市/区域韧性的影响程度。目前相关研究已经展开，例如：迪奥达托和韦特林斯（Diodato & Weterings）研究了区域通勤连通性与就业韧性的关系^[85]；巴兰等（Balland et al.）研究了城市技术网络灵活度与城市技术韧性的关系^[86]；覃成林和刘丽玲研究了城市间企业关联网络与经济韧性的关系^[87]。可以发现，这类研究中建构的城市网络类型和测度的韧性均属于同一领域。因此，测度城市网络支撑的韧性之前，首先要从理论层面认知特定类型城市网络

与该领域韧性的相关性或因果关系，进而使用合理的方法识别和测度韧性。

3.3 优化策略提出

提出精准、有效、可实施的韧性优化策略是城市网络韧性研究的根本目标。两种城市网络韧性概念提供了两种以城市和区域韧性提升为目标的城市网络优化策略。从城市网络的本体韧性视角看，优化策略的关键是强化网络的稳定性，使得其在面临冲击扰动时能保持稳定的结构和功能，并通过不断优化自身结构以适应区域/城市的长期发展需求。既有研究多关注城市网络结构稳定性的提升，无论是网络整体层面的“增加冗余节点和连接”^[88]、“推动区域形成多中心、扁平化空间格局”^[89]等策略，还是网络组建层面的“加强核心节点/联系保护”^[79]等策略，其核心要义都是维持网络结构稳定，实质上仍未脱离均衡论的思维范式。未来要充分重视城市网络演进韧性的研究，通过研究典型扰动对城市网络长期演化过程的影响机制，探索优化城市网络结构以适应长期发展需要的韧性提升策略。

从城市网络支撑的韧性视角看，优化策略的关键是充分利用城市网络促进区域协同应对扰动的正外部性，并尽可能减少其带来的扰动蔓延和级联失效的负面影响。城市网络连通性的提升有利于网络正外部性的发挥，未来需要重视城市网络格局的优化，促进区域资源的高效流通和城际功能协同，尤其需要重视网络中发展水平较差的城市，使其能更好地借助区域资源实现自身发展。与此同时，也要充分关注城市网络的潜在负外部性，加强对网络风险因子的常态化防控。虽然在新冠疫情的影响下出现了一定的逆全球化趋势，但总体而言，经济全球化和区域一体化仍然是未来的发展趋势，城市间互联互通程度势必会进一步提升。“脱钩”“熔断”等方式属于短期内的紧急应对措施，在实践中需要谨慎使用。从长期来看，应充分认知潜在扰动因子在城市网络中的扩散传播途径，在此基础上做好充足的应急准备，并加强对扰动因子的监控，推动实现更加及时、精准、高效的风险扰动防控与管理。

4 结语

城市网络韧性是城市网络研究与韧性研究的交叉领域，不同领域的学者对城市网络的理解不同，所强调的城市网络韧性的概念内涵差异较大。本研究结合相关概念的理论溯源，将城市网络韧性归纳为“城市网络的本体韧性”和“城市网络支撑的韧性”两大类，并从韧性主体、韧性视角、韧性本质和韧性内涵等方面，对两种城市网络韧性概念进行辨析；在此基础上，尝试从韧性议题剖析、测度方法选择和优化策

略提出三个方面，初步构建了两类城市网络韧性的分析框架，以期在城市网络韧性研究和实践工作提供助益。

虽然本文着重辨析了两类城市网络韧性的差异，但亦认识到两类城市网络韧性之间存在相互关联和相互影响。一方面，当区域中的城市遭遇扰动影响时，城市网络结构往往也会受到影响，因此城市网络本体的抗扰能力是其在扰动过程中发挥正外部性的前提。另一方面，城市网络支撑的韧性在一定程度上代表了城市间良好的协作机制，能强化城市网络抵抗干扰、恢复正常、适应变化以及转型发展的能力，是城市网络本体韧性的重要来源。因此，未来也要进一步探索两种类型城市网络韧性之间的关系，进而提出面向韧性提升的综合性城市网络优化策略。

此外，在城市和区域中，多种类型的城市网络间也存在着复杂的互动影响关系。因此，在针对性地解析特定类型城市网络韧性的内涵、特征和优化策略的同时，还应充分剖析不同类型、不同尺度的城市网络之间的关联关系，并在此基础上构建多层次、多维度的城市网络模型，进而在城市网络韧性研究中将不同尺度和不同维度城市网络间的协同影响关系纳入考量。总之，城市网络韧性研究需要更加深入地分析城市网络间的内在作用机制，更加全面地揭示扰动对区域空间的影响机理，从而为风险治理视角下城市与区域空间组织的优化提供科学依据。UPI

注：文中图表均为作者绘制。

衷心感谢匿名审稿专家对本文提出的修改意见！

参考文献

- [1] KOKS E E, ROZENBERG J, ZORN C, et al. A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets[J]. *Nature communications*, 2019, 10(1): 2677.
- [2] ALKHATIB M, EL BARACHI M, ALEAHMAD A, et al. A sentiment reporting framework for major city events: case study on the China-United States trade war[J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 264: 121426.
- [3] BOSCHMA R. Towards an evolutionary perspective on regional resilience[J]. *Regional studies*, 2015, 49(5): 733-751.
- [4] RIBEIRO P J G, GONÇALVES L A P J. Urban resilience: a conceptual framework[J]. *Sustainable cities and society*, 2019, 50: 101625.
- [5] 颜文涛, 任婕, 张尚武, 等. 上海韧性城市规划研究: 关键议题、总体框架和规划策略[J]. *城市规划学刊*, 2022(3): 30-39.
- [6] BURGER M J, MEIJERS E J. Agglomerations and the rise of urban network externalities[J]. *Papers in regional science*, 2016, 95(1): 5-15.
- [7] 冷炳荣, 杨永春, 谭一泓. 城市网络研究: 由等级到网络[J]. *国际城市规划*, 2014(1): 1-7.
- [8] 潘峰华, 方成, 李仙德. 中国城市网络研究评述与展望[J]. *地理科学*, 2019, 39(7): 1093-1101.
- [9] 王焱, 钮心毅, 宋小冬. “流空间”视角下区域空间结构研究进展[J]. *国际城市规划*, 2017, 32(6): 27-33. DOI: 10.22217/upi.2017.012.
- [10] MAO B, GU J, LU Q. A pipeline for urban knowledge spillover: based on

- the internal linkage of cross-regional multilocation enterprises[J]. Cities, 2023, 143: 104585.
- [11] DAI L, DERUDDER B, CAO Z, et al. Examining the evolving structures of intercity knowledge networks: the case of scientific collaboration in China[J]. International journal of urban sciences, 2023, 27(3): 371-389.
- [12] YAO L, LI J. Intercity innovation collaboration and the role of high-speed rail connections: evidence from Chinese co-patent data[J]. Regional studies, 2022, 56(11): 1845-1857.
- [13] 钮心毅, 王焱, 刘嘉伟, 等. 基于跨城功能联系的上海都市圈空间结构研究[J]. 城市规划学刊, 2018(5): 80-87.
- [14] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and urban planning, 2016, 147: 38-49.
- [15] WANG C, CHEN Z, YU B, et al. Impacts of COVID-19 on urban networks: evidence from a novel approach of flow measurement based on nighttime light data[J]. Computers environment and urban systems, 2024, 107: 102056.
- [16] KARAKOC D B, KONAR M, PUMA M J, et al. Structural chokepoints determine the resilience of agri-food supply chains in the United States[J]. Nature food, 2023, 4(7): 607-615.
- [17] 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.
- [18] 彭聃, 顾朝林, 林樱子. 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.
- [19] HALL P. The world cities[M]. London: Hienemann, 1966.
- [20] FRIEDMANN J. The world city hypothesis[J]. Development and change, 1986, 17(1): 69-83.
- [21] SASSEN S. The global city: New York, London, Tokyo[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1991.
- [22] CASTELLS M. The informational city: information technology, economic restructuring, and the urban-regional process[M]. Oxford, USA: Blackwell Oxford, 1989.
- [23] 徐刚, 王德, 晏龙旭. 国外世界城市网络实证研究的进展、挑战与展望[J/OL]. 国际城市规划, 2022[2024-01-25]. <https://doi.org/10.19830/j.upi.2022.255>.
- [24] TAYLOR P J, CATALANO G, WALKER D R F. Measurement of the world city network[J]. Urban studies, 2002, 39(13): 2367-2376.
- [25] 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.
- [26] CAMAGNI R P, SALONE C. Network urban structures in Northern Italy: elements for a theoretical framework[J]. Urban studies, 1993, 30(6): 1053-1064.
- [27] 程玉鸿, 苏小敏. 城市网络外部性研究述评[J]. 地理科学进展, 2021, 40(4): 713-720.
- [28] 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.
- [29] 马学广, 李贵才. 西方城市网络研究进展和应用实践[J]. 国际城市规划, 2012, 27(4): 65-70.
- [30] MEIJERS E. Polycentric urban regions and the quest for synergy: is a network of cities more than the sum of the parts[J]. Urban studies, 2005, 42(4): 765-781.
- [31] 李涛, 程遥, 张伊娜, 等. 城市网络研究的理论、方法与实践[J]. 城市规划学刊, 2017(6): 43-49.
- [32] 毕鹏翔, 唐子来, 李紫玥. 创新一体化进程中的长三角城市网络演化——基于技术转移的视角[J]. 城市规划学刊, 2022(1): 35-43.
- [33] 王秋玉, 曾刚, 苏灿, 等. 经济地理学视角下长三角区域一体化研究进展[J]. 经济地理, 2023, 42(2): 52-63.
- [34] PENG C, YUAN M, GU C, et al. A review of the theory and practice of regional resilience[J]. Sustainable cities and society, 2017, 29: 86-96.
- [35] BRISTOW G, HEALY A. Regional resilience: an agency perspective[M] // BRISTOW G, HEALY A, eds. Handbook on regional economic resilience. Cheltenham, UK & Northampton, M.A., USA: Edward Elgar Publishing, 2020: 36-53.
- [36] 陈梦远. 国际区域经济韧性研究进展——基于演化论的理论分析框架介绍[J]. 地理科学进展, 2017, 36(11): 1435-1444.
- [37] PENDALL R, FOSTER K A, COWELL M. Resilience and regions: building understanding of the metaphor[J]. Cambridge journal of regions, economy and society, 2010, 3(1): 71-84.
- [38] ROSE A, LIAO S. Modeling regional economic resilience to disasters: a computable general equilibrium analysis of water service disruptions[J]. Journal of regional science, 2005, 45(1): 75-112.
- [39] MARTIN R, SUNLEY P, GARDINER B, et al. How regions react to recessions: resilience and the role of economic structure[J]. Regional studies, 2016, 50(4): 561-585.
- [40] CHRISTOPHERSON S, MICHIE J, TYLER P. Regional resilience: theoretical and empirical perspectives[J]. Cambridge journal of regions, economy and society, 2010, 3(1): 3-10.
- [41] FENG Y, LEE C C, PENG D. Does regional integration improve economic resilience? evidence from urban agglomerations in China[J]. Sustainable cities and society, 2023, 88: 104273.
- [42] 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.
- [43] WANG X, XU S, WANG D. Analysis of regional resilience network from the perspective of relational and dynamic equilibrium[J]. Journal of cleaner production, 2023, 425: 138859.
- [44] 吴迪, 关雷, 王诺, 等. “丝路”海运网络的脆弱性及风险控制研究[J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1133-1148.
- [45] 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): 17.
- [46] SEDITA S R, DE NONI I, PILOTTI L. Out of the crisis: an empirical investigation of place-specific determinants of economic resilience[J]. European planning studies, 2017, 25(2): 155-180.
- [47] 刘逸, 纪捷韩, 张晓琳, 等. 战略耦合对区域经济韧性的影响研究——以广东省为例[J]. 地理研究, 2021, 40(12): 3382-3398.
- [48] 胡晓辉, 董柯. 战略耦合演化视角下的区域经济韧性分析框架[J]. 地理研究, 2021, 40(12): 3272-3286.
- [49] SHAN X, XINRAN W, HUADU T, et al. Spatio-temporal evolution of population mobility differentiation patterns in a pandemic context: based on a network perspective[J]. Geomatics, natural hazards and risk, 2023, 14(1): 2240945.
- [50] WANG W, YANG S, STANLEY H E, et al. Local floods induce large-scale abrupt failures of road networks[J]. Nature communications, 2019, 10(1): 2114.
- [51] VAN GINKEL K C, DOTTORI F, ALFIERI L, et al. Flood risk assessment of the European road network[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2021, 21(3): 1011-1027.
- [52] WANG H, GE Q. Spatial association network of economic resilience and its influencing factors: evidence from 31 Chinese provinces[J]. Humanities and social sciences communications, 2023, 10(1): 1-14.
- [53] MEEROW S, HANNIBAL B, WOODRUFF S C, et al. Urban flood resilience networks: exploring the relationship between governance networks, networks of plans, and spatial flood resilience policies in four coastal cities[J/OL]. Annals of the American Association of Geographers, 2024[2024-01-25]. <https://doi.org/10.1080/24694452.2023.2284299>.
- [54] 马学广, 李贵才. 世界城市网络研究方法论[J]. 地理科学进展, 2012, 31(2): 255-263.
- [55] MALECKI E J. Hard and soft networks for urban competitiveness[J]. Urban studies, 2002, 39(5/6): 929-945.
- [56] SHARIFI A. Resilient urban forms: a review of literature on streets and street networks[J]. Building and environment, 2019, 147: 171-187.
- [57] VAN GINKEL K C H, KOKS E E, DE GROEN F, et al. Will river floods

- “tip” European road networks? a robustness assessment[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2022, 108: 103332.
- [58] CHEN H, YAN W, LI Z, et al. Spatial patterns of associations among ecosystem services across different spatial scales in metropolitan areas: a case study of Shanghai, China[J]. Ecological indicators, 2022, 136: 108682.
- [59] 颜文涛, 李子豪. 风险扰动视角下城市空间结构的韧性机理研究——理论框架与实证方法[J]. 国际城市规划, 2023, 38(4): 1-10. DOI: 10.19830/j.upi.2023.269.
- [60] MÄKINEN H. On the emergence and structure of a new regional network[J]. Human systems management, 2001, 20(3): 249-256.
- [61] LI Z, YAN W. Changes in the flow of public services: an integrated framework for urban resilience measurement using hybrid networks[J]. Landscape and urban planning, 2024, 244: 104996.
- [62] KIM Y L, JUN B. Inside out: human mobility big data show how COVID-19 changed the urban network structure in the Seoul metropolitan area[J]. Cambridge journal of regions economy and society, 2022, 15(3): 537-550.
- [63] HUSSAIN M W, MIRZA T, HASSAN M M. Impact of COVID-19 pandemic on the human behavior[J]. International journal of education and management engineering, 2020, 10(8): 35-61.
- [64] VAN WEE B, WITLOX F. COVID-19 and its long-term effects on activity participation and travel behaviour: a multiperspective view[J]. Journal of transport geography, 2021, 95: 103144.
- [65] SUN Y, LIU T, YE T, et al. Coordination and cooperation are essential: a call for a global network to enhance integrated human health risk resilience based on China's COVID-19 pandemic coping practice[J]. International journal of disaster risk science, 2021, 12(4): 593-599.
- [66] CHAMPLIN C, SIRENKO M, COMES T. Measuring social resilience in cities: an exploratory spatio-temporal analysis of activity routines in urban spaces during COVID-19[J]. Cities, 2023, 135: 104220.
- [67] SHENG H, DAI X, HE C. Gone with the epidemic? The spatial effects of the COVID-19 on global investment network[J]. Applied geography (Sevenoaks, England), 2023, 156: 102978.
- [68] BAI X, NAGENDRA H, SHI P, et al. Cities: build networks and share plans to emerge stronger from COVID-19[J]. Nature, 2020, 584(7822): 517-520.
- [69] 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.
- [70] COVEN J, GUPTA A, YAO I. JUE Insight: Urban flight seeded the COVID-19 pandemic across the United States[J]. Journal of urban economics, 2023, 133: 103489.
- [71] KLIMOVA N, AKIMOVA A. Supply chain security. tools, trends, and techniques: Toyota and Honda cases[R]. Gothenburg, Sweden: Jönköping University, 2011.
- [72] 钮心毅, 岳雨峰, 刘思涵. 大规模城际人员流动的负向效应与城市群的安全[J]. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2181-2192.
- [73] HUANG Y, HONG T, MA T. Urban network externalities, agglomeration economies and urban economic growth[J]. Cities, 2020, 107: 102882.
- [74] CRESPO J, 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.
- [75] BOMBELLI A, SANTOS B F, TAVASSZY L. Analysis of the air cargo transport network using a complex network theory perspective[J]. Transportation research part e: logistics and transportation review, 2020, 138: 101959.
- [76] ZHANG Y, SONG R, ZHANG K, et al. The characteristics and modes of urban network evolution in the Yangtze River Delta in China from 1990 to 2017[J]. IEEE access, 2021, 9: 5531-5544.
- [77] MARIN V, MOLINERO C, ARCAUTE E. Uncovering structural diversity in commuting networks: global and local entropy[J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 1684.
- [78] ZHANG X, HUANG Y. What factors affect the structural resilience of urban networks during COVID-19 epidemic? a comparative analysis in China[J]. International journal of sustainable development & world ecology, 2022, 29(8): 858-874.
- [79] 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.
- [80] CHE L, XU J, CHEN H, et al. Evaluation of the spatial effect of network resilience in the Yangtze River Delta: an integrated framework for regional collaboration and governance under disruption[J]. Land, 2022, 11(8): 1359.
- [81] 任婕. 上海五大新城的道路网络特征解析与韧性测度[J]. 城市规划, 2022, 46(9): 82-92.
- [82] 颜文涛, 卢江林, 李子豪, 等. 城市街道网络的韧性测度与空间解析——五大全球城市比较研究[J]. 国际城市规划, 2021, 36(5): 1-12. DOI: 10.19830/j.upi.2020.317.
- [83] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.
- [84] 周灿, 曾刚. 中国城市创新网络结构与创新能力研究[J]. 地理研究, 2017, 36(7): 1297-1308.
- [85] DIODATO D, WETERINGS A B R. The resilience of regional labour markets to economic shocks: exploring the role of interactions among firms and workers[J]. Journal of economic geography, 2015, 15(4): 723-742.
- [86] BALLAND P A, RIGBY D, BOSCHMA R. The technological resilience of US cities[J]. Cambridge journal of regions, economy and society, 2015, 8(2): 167-184.
- [87] 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.
- [88] XU X, CHEN A, XU G, et al. Enhancing network resilience by adding redundancy to road networks[J]. Transportation research part e: logistics and transportation review, 2021, 154: 102448.
- [89] WANG C, CHEN Z, YU B, et al. Impacts of COVID-19 on urban networks: evidence from a novel approach of flow measurement based on nighttime light data[J]. Computers environment and urban systems, 2024, 107: 102056.

(本文编辑: 王枫)



本文更多增强内容扫码进入