

城市网络韧性的概念与分析框架探析

魏冶¹, 修春亮^{2*}

(1. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; 2. 东北大学江河建筑学院, 沈阳 110169)

摘要: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。目前绝大多数城市网络研究都基于正面视角,对城市网络的负面效应、安全与可持续发展问题却鲜有提及。论文通过梳理城市网络与区域韧性的相关研究进展,探索性地提出一种基于演化韧性的城市网络韧性概念来探讨城市网络的“负面问题”。城市网络韧性可理解为城市网络系统借助于城市间社会、经济、工程与组织等各领域的协作和互补关系,能够预防、抵御、响应和适应外部急性冲击和慢性压力的影响并从中恢复或转换的能力。基于此概念,结合演化韧性与适应性循环理论,将城市网络视为一个动态演化的复杂适应系统,基于基础设施、组织、经济与社会等4个维度,兼顾适应性与适应能力,尝试性地提出基于韧性特征和韧性过程视角的城市网络韧性综合分析框架,并对城市网络韧性的分析方法、优化方法予以展望,对涉及的若干核心问题展开讨论。研究可为以安全发展为目标的城市规划、区域政策制定和区域组织建立提供科学依据,也可为各城市节点找准自身角色、有效参与区域治理提供有价值的参考。

关键词:城市网络;区域韧性;城市网络韧性;安全发展

城市地域系统作为人类活动最重要的载体,向来是城市地理学研究的核心对象。随着信息与通讯技术(ICTs)的快速发展与全球化进程的不断深入,更多证据表明世界的城市地域系统正在经历前所未有的变革——流动性加快、空间结构扁平化、城市间联系更为复杂多样,世界逐渐集成为一个多层次、多极化的网络空间,而城市则是这一网络空间的主要节点,人流、物流、资金流、技术流以及信息流等现代市场资源在这些节点之间流动与配置。城市网络理论与方法使得传统的城镇体系研究由属性走向关系、由等级走向网络、由封闭系统走向开放系统,进而有助于更好地理解地理邻近、规模相当、功能各异的城市为主体的大都市区化过程,越来越多的学者认识到其重要的应用价值^[1]。

在城市网络中,城市不再孤立存在,生产要素在城市网络中有序流动和优化配置,大大增加了区域的生产效率,但与此同时,危机要素也可沿城市

网络传递和蔓延,甚至产生放大效应,造成区域性影响。例如在“9·11”事件中,曼哈顿遭遇致命重击,使得美国纽约大都市区的电信等网络受到直接影响^[2],这一事件也引发了对节点冗余性与枢纽(hub)区位选择的再思考。再如2016年4月,日本熊本县发生强烈地震,受其影响,当地部分汽车零部件生产企业遭遇停产,由此引发的供应链中断造成全国性的汽车产量大幅度削减,此次事件不仅证实自然灾害所造成的影响可在城市间传导,亦暴露出“准时制生产”(Just in Time)系统的安全弊端^[3]。其他一些研究也证实网络确实可以带来灾害传递,例如, Ali 等^[4]以加拿大多伦多为案例,认为21世纪初SARS病毒的传播从某种意义上来说是全球城市网络出现的可预见性结果。与此同时,城市网络在应对灾害时并非被动受到侵扰,也会呈现一定的主动性,各城市间在应对外界危机时可互相协作,形成网络协同效应,即城市节点不再“孤军奋战”,而选

收稿日期:2019-06-27;修订日期:2019-10-22。

基金项目:国家自然科学基金项目(41971202)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41971202.]

第一作者简介:魏冶(1983—),男,吉林梨树人,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为城市与区域规划及GIS应用。

E-mail: weiy742@nenu.edu.cn

*通信作者简介:修春亮(1964—),男,吉林舒兰人,教授,博士生导师,研究领域为城市地理、经济地理、城市与区域规划。

E-mail: xiucl@nenu.edu.cn

引用格式: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 Ye, Xiu Chunliang. Study on the concept and analytical framework of city network resilience. Progress in Geography, 2020, 39(3): 488-502.]

DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.013

择“协同应对”,通过增强、减弱关键的节点和联系或改进网络拓扑结构来积极应对外部干扰和冲击。例如2020年中国对新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情的有效遏制,其中城市间公共卫生网络与医护人员网络的建立以及关键交通网络节点的重点管控显然起到了至关重要的作用。而在2005年美国“卡特里娜”飓风灾害事件中,州及地方政府间关系失调,一方面新奥尔良政府在灾害发生时没有主动及时向其他城市要求交通工具的帮助,与此同时一些城市(如格雷特纳)竟拒绝对灾民提供帮助,城市间未能建立行之有效的协同网络,从而造成灾难性后果^[5]。在信息化、全球化与区域化不断加强的时代,上述联动机制和协同效应早已普遍存在,2013年学者Helbing^[6]在《Nature》上发表论文,提出在高连接强度的全球网络支撑下一个高度相互依赖(interdependent)的全球系统正在产生,该系统在为人类带来更多便利与利益的同时,级联失效(cascading failure)等一些网络化风险(networked risks)也随之产生。Beck等^[7]则认为,对于一个城市区域而言,当面对危机和扰动时,极易诱发其他相关联的危机,局部功能的损坏可能会导致其他部分功能无法正常运转,因而城市区域发生的危机在紧密关联的网络中很可能产生放大效应,引发城市区域系统的震荡,诱发更严重的次生危机,是为联结安全(nexus security)问题。若正确建构城市区域的联结关系,城市亦可像有弹性和张力的蛛网一样,吸纳干扰和震动,保障城市环境安全和秩序稳定。

据此,城市网络研究不仅需要探索更多的城市关联途径来“开疆扩土”,也亟需基于安全性与可持续性的“居安思危”。在此背景下,如何掌握城市间危机传递的规律,如何优化度量和模拟城市与区域的“联结安全”问题,又如何展开城市协作来吸收和化解对城市网络系统的负面影响等一系列问题显得尤为重要。针对这些问题,本文试图通过归纳总结多领域开展的城市网络与区域韧性研究实践,来探索城市网络韧性的内涵与分析框架,希冀为城市网络的安全发展与可持续发展提供有价值的参考。

1 城市网络韧性的理论基础与内涵

1.1 城市网络

Camagni^[8]于1994年正式提出城市网络概念,认为城市网络是指一个由具有互补/垂直或协同/合

作这2种相互关系的专业化中心(城市)组成的水平的、非等级的系统。20余年来,国内外地理、规划及其他相关领域的学者对城市网络展开了多维度的理论与实证研究,城市网络的内涵不断扩展,积累了丰富的研究成果,最终促进了城市网络研究范式的形成^[9-10]。

在理论探索方面,Sassen^[11]的世界城市理论、Castells^[12]的流空间理论、Taylor^[13]的中心流理论与Neal^[14]的“网络基地”理论的提出,奠定了城市网络研究的早期理论基础。之后,随着城市网络概念逐渐被广泛认可和接受,学者们亦开始探讨城市网络核心理论问题,包括中心流理论的深化、城市网络存在的意义与本质以及城市网络的形成和演化机制等,这些研究促进了城市网络理论的演进和发展^[15-16]。

在实证研究方面,GaWC与POLYNET等国际研究团队开创先河,GaWC提出著名的互锁模型,开创性地提出以高级生产者服务业为手段进行城市网络的度量^[17],并藉此为世界城市排名。而POLYNET小组则将这一方法运用于欧洲城市网络和多中心的研究实践,并进行更广泛的区域尺度探索^[18]。随着城市网络研究在全世界范围内展开,并受益于大数据技术的推动,学者们不再囿于高级生产者服务业的分析框架,而是探索更多“流”指标来构建城市网络,并致力于使城市网络具象化,从而形成了基础设施途径^[19-22]、企业组织途径^[9,23-26]与社会文化途径^[27-29]等3种不同的城市网络建构途径。基于以上途径,基础设施网络、经济网络、社会网络、知识网络等城市网络的诸多维度得以识别和度量,使城市网络的图景更加逼近真实样貌。

尽管理论与实践方面大量的有益探索,使城市网络研究内容更加规范和丰富,但作为较新的理论范式,其理论体系远不够完善。例如,目前绝大多数研究都基于正面视角——描绘城市网络如何“引人入胜”和“大有作为”,却很少提及其负面效应、弱点和安全问题。然而无论是“计算机网络”“社交网络”还是“生态网络”,我们所熟知的网络都存在典型的安全问题和负面效应,城市网络作为一种网络形式,也并非特殊的存在,其安全性、可持续问题值得关注^[2]。

1.2 区域韧性

“韧性”(resilience),亦翻译为“弹性”,词源来自拉丁词汇“resilio”,原意是跳回(原来的状态)。1973年,生态学家霍林(Holling)首先将韧性概念作为一

种生态学研究框架^[30],后该框架被扩展到社会学、经济学、城市规划与地理学等学科领域,其概念内涵也得到进一步深化。

韧性^[31]与区域空间结合,便产生了区域韧性概念。韧性可看作是区域的一种属性,这种属性可以预期威胁及对其量度,通过采取先决行动减轻灾害影响,当威胁突发时可作出即时回应和快速恢复,并使区域进入一个新的平衡状态^[31]。与传统区域安全研究所关注的减少干扰不同,韧性思维强调接受外界挑战,做好吸收变化的准备,并发展新的策略去适应系统变化。在这一过程中,区域应不断提高学习能力(汲取经验)、自组织能力(自我修复)和转化能力(创造新系统)^[32-33]。Boschma^[34]提出区域韧性不仅仅包括“短期”的应对冲击的能力,也包括“长期”的摆脱锁定效应与发展新增长路径的能力,前者被总结为适应性(adaptation),而后者被解释为适应能力(adaptability)。韧性的概念与早期流行的“可持续发展”“脆弱性”等概念有所区别,可持续发展的表达比较笼统,而韧性的表达则更为具体;脆弱性更强调抵抗力、减缓、结果和系统,而韧性则更强调恢复能力、适应、过程、网络和组织^[35]。

基于认知论的不同,区域韧性可分为3类研究视角:第一,工程韧性视角,认为区域具有一个均衡状态,任何短暂的危机都会激发区域固有的自我修复能力使其恢复到原有的均衡状态,高韧性区域意味着抗干扰能力或自我修复能力强^[36-38];第二,生态韧性视角,认为区域具有多个均衡态,高韧性区域能在危机过后通过内部经济要素的重组优化自身结构,从而获得更加持续高速的发展;第三,演化韧性视角,演化韧性认为区域是一个复杂适应系统,它没有稳定的均衡态,高韧性区域能够不断调整自身社会经济和制度结构以适应长期外部环境变化并持续增长^[36]。工程韧性与生态韧性强调稳态,而演化韧性却容许其内部结构和组成部分随外界变化而不断调整^[39]。

为描述演化韧性,西方学者将生态学中的适应性循环(adaptive cycle)引入区域研究领域,该理论认为区域是一个复杂适应系统,其发展演化可被视为4个阶段组成的循环:开发(r)、保守(K)、释放(Ω)与更新(α),不同发展阶段展现出不同的潜力、连接度与韧性。围绕区域的适应性循环过程,众多理论推演与实证研究纷纷展开,尤其在区域经济韧性方面展现了出色的解释力。相比之下,演化韧性更适

于区域不断发展和演化的实质,因此被更多学者所接受,代表了西方最新的研究动态^[40]。但总结发现,基于适应性循环的区域韧性研究有两方面限制:一是来自时间尺度的挑战,即需要长期的历史观察来确定循环阶段,进而判断韧性高低,而较长尺度的观察给数据搜集困难,因此这类研究往往以梳理历史事件和观察单一指标来实现^[41];二是对韧性理解的局限性,即强调于长期的创新能力(适应能力),而忽略短期的恢复与应对能力(适应性)。前者的理想目标是“转变”,而后者的目标是“保持”,如果过度强调转变则会落入 $\Omega \rightarrow \alpha \rightarrow r$ 循环陷阱而阻碍发展^[42],因此拥有足够的适应性也是韧性的重要表现。

在实证研究方面,区域韧性研究所要解决的首要问题是韧性的测算。目前测算方法主要有2种:第一种是指标体系法,即围绕一揽子指标对韧性进行综合评定,典型的如著名的洛克菲勒基金会所提出的韧性分析框架与奥雅纳工程顾问(ARUP)所提出的韧性指标体系^[43],该方法在区域、城市与社区韧性领域占据主流;第二种方法为韧性代理法(resilience surrogates),即用系统核心变量的变化来间接表征韧性的变化,在危机发生时,这些变量响应敏感,变化易被观察到^[44]。例如Martin^[38]通过分析英国各地区9个产业部门就业人口构成的变化来研究英国各地区的经济韧性,该方法在区域经济韧性领域占据主流。综合来看,2种方法各有利弊。指标体系方法往往基于截面数据,强调现状特征,好处是操作性强、可面向不确定性问题,缺点是指标种类繁多,尚缺乏公认合理的指标体系^[45];而韧性代理方法往往基于时间序列数据,强调过程性,适合针对特定的冲击事件和韧性目标,缺点是需要长期的观测数据,并难以综合考虑多个维度。因此必要情况下可将2种方法结合运用。

总结已有文献,区域韧性研究尚存在以下主要问题:首先,在多数研究中,区域韧性往往作为区域经济韧性的代名词,仅关注经济发展,而社会等其他维度考虑不够。其次,受经济学研究范式影响,已有研究多着眼于公司等微观层面,对城市与城市间关联关注不够。还有,区域韧性常被作为区域的整体特性,对空间细节披露不足,致使一些空间政策很难实施,限制了区域韧性的实际应用价值。面对这些问题,地理学者应发挥学科的综合优势与空间优势,对经济、社会、生态等多维问题统筹考虑,

建立一个综合的区域韧性分析框架,强化城市在区域系统中主体地位的同时,将“格局—过程—机理—对策”的研究范式融入其中,形成地理学者对区域韧性问题的独特思考。

1.3 城市网络韧性

结合城市网络与区域韧性的内涵,城市网络韧性可定义为城市网络系统借助于城市间社会、经济、工程与组织等各领域的协作和互补关系,能够预防、抵御、响应和适应外部急性冲击和慢性压力的影响并从中恢复或转换的能力。从Camagni^[7]对城市网络概念的界定看,协作与互补是城市网络存在的内在动力,当城市具有相似的利益以达成某种共同目标或分享共同利益的时候就具备了“协同网络”的特征,当个体城市履行不同的经济职能并拥有互补性的基础设施、活动、居住和生活环境的时候,城市区域就具备了“互补网络”的特征^[46]。人流、物流、资金流、技术流与信息流等流动以基础设施为载体展现出城市间协作与互补的显性特征。当面对外界干扰时,要么城市网络系统的协作与互补促进了危机的传递和产生放大效应,要么协作与互补的模式或强度难以抵御外部的冲击,都是韧性较低的表现。预防、抵御、响应与适应是以调解节点自身、节点间关系以及网络整体结构和功能为途径而进行的危机应对策略,而“恢复”并不意味着一定恢复到原来的状态,也可通过吸收经验和改进自我而跃进到新的发展状态。社会、经济、工程与组织是区域韧性所关心的4大领域,也是城市网络所关心的4个重要领域。急性冲击与慢性压力则继承了生态韧性框架中快变量与慢变量的内涵,用以模拟外界干扰的不同形式,前者如地震、地质灾害、经济危机等突发事件,后者如能源枯竭、全球气候变化、人口老龄化等^[47]。

城市网络实质上是一种区域结构抽象模式,由于对模拟地域系统关系问题具有“先天性”优势,是理解信息化、全球化与区域化多重作用下城市地域空间变革的实用工具。而韧性则提供了一个综合的、“内外兼修”的分析框架来分析城市地域系统适应性和抗干扰能力。从思想根源上看,城市网络与韧性从产生到发展具有天然的密切联系。首先,无论城市网络,还是韧性,都是城市地域系统的特征表现,皆未脱离系统论范畴,只是认识角度不同,城市网络关注系统结构,而韧性关注系统特征。在网络科学中,网络结构与层次结构被认为是一种对偶

关系,而在适应性循环理论中,扰沌结构与层次结构也被视为一种对偶关系——2种对偶关系不约而同地揭示出以往静态的、层次的分析框架已经难以满足当前分析需求,进而城市网络与演化韧性2种理论才应运而生。另外,在霍林等^[30]对于适应性循环阶段的界定中,生态系统的“连接度”是重要指征,亦与网络思维不谋而合。由此从科学哲学与人类思维认识层面,城市网络研究与韧性研究的结合绝非偶然,而是相关理论发展到一定阶段的产物,是一种历史必然。城市网络韧性以系统论、风险理论、韧性理论、网络理论与流空间等理论为理论根基,以安全发展为目标,对城市网络结构特征、形成机制与核心问题进行重新思考,探讨以“流”和“互联互通互操作”为核心的城市网络结构、功能和系统如何表现出韧性特征,是一个颇具理论性、复杂性与针对性的科学问题。

需要阐明的是,城市网络韧性研究不能仅仅借用韧性概念,仍进行传统的安全性主张,研究应有韧性之实;城市网络韧性脱胎于区域韧性,又有不同于区域韧性的关注点,与后者的“原子性”特征相比,城市网络更强调由网络和相互联系所体现的韧性特征,在度量方法与分析框架上都有所不同,因此有必要形成较为独立的的城市网络韧性研究范式。另外,多数关于城市和区域韧性的研究基于经济发展或防灾减灾角度,只有极少数从空间角度讨论这个问题。因此,城市网络韧性应当给予足够的空间考量,这也是城市网络韧性与区域经济学家所探讨的区域韧性问题的不同所在。

2 城市网络韧性的研究雏形

严格来说,城市网络是一种区域研究范式,城市网络韧性脱胎于区域韧性。尽管在世界范围内,城市网络韧性尚未被正式提出和广泛研究,但基础设施、经济、社会与组织等不同网络维度的韧性问题都有相当一部分专业领域的学者关注,这些专业化韧性的关注,形成了城市网络韧性研究的雏形。

2.1 经济网络韧性

学者们关于经济网络韧性的关注主要有2个方面:一是集中在产业网络领域,二是知识、技术网络与区域经济韧性方面。

经济全球化使得地方企业、产业和市场高度依

赖,构成一个复杂的产业网络。构成产业网络的核心元素是供应链(Supply Chain, SC),供应链是涉及将产品或服务提供给最终消费者的过程和活动的上游及下游企业组织所构成的网络^[48]。从概念与内涵上看,供应链是沟通起企业间联系的关键要素,并且随着全球化与区域化的不断深入,企业在全局范围内布局,供应链的空间范围也不囿于地方而向区域和全球延伸,从而形成供应链-城市互锁网络。由于供应链网络上的企业相互依赖,当其中任何一个企业出现问题,都有可能波及其他企业和整个供应链,导致供应链中断和失效^[49]。李卫江等总结了产业网络灾害经济损失评估方面的研究进展,认为局部关键节点、基础设施或道路网络一旦直接遭受损坏而失效,灾害影响将通过供应链前向或后向作用扩散到整个产业经济系统,从局部受灾地区扩散到更广泛的地域,引发系统性风险,并提出构建兼具效率与韧性的产业经济系统^[50-52]。目前提出产业网络灾害韧性概念的研究较少,大多数研究是从宏观区域的角度,利用产业部门间或区域间投入产出关联系数以及投入产出法(IO)、可计算一般均衡模型(CGE)等,评估灾害在产业系统中的扩散效应及其造成的区域间间接损失^[53-54]。但学者们意识到这种研究范式忽视了产业网络的物理结构、拓扑及地理特性,难以深入认识灾害风险从局部关键节点扩散到整个产业网络的过程和机理^[55-56]。因此,学者们开始从企业网络角度来进行灾害损失研究,并进行必要的韧性思考^[57-60]。

区域知识网络是近年来创新地理学者关注的重要问题。区域知识网络由节点(区域产业、公司)和联系(认知距离)构成,区域知识网络不仅与区域经济增长息息相关,同区域经济韧性也具有密切联系。例如 Crespo 等^[61]以“网络连接”理念来构筑区域韧性空间,总结出随机网络、中心边缘网络和韧性网络3种网络拓扑结构模式,并探讨知识网络如何对区域经济韧性产生影响;Lozano 等^[62]则利用定量模型来度量多样性是如何影响区域创新网络韧性的。构建知识网络的公认指标是技术关联度(technological relatedness),它能够定量测量区域知识网络节点(产业)之间的相互联系,从而构建出有向加权的知识网络。已有研究表明,适宜的技术关联对提高区域韧性具有显著的效果^[34,63]。技术关联度指标的定量化测度以及知识网络的韧性意义是该领域未来研究的重要问题。

2.2 基础设施网络韧性

基础设施网络既是沟通城市间联系的重要载体和通道,同时承担区域生命线的职能,因此,基础设施网络研究是城市网络韧性研究的重要维度。基础设施网络的实体特征较强、韧性特征偏向于工程韧性,易于仿真和模拟,积累的相关研究较多。例如 Reggiani^[64]提出了交通网络韧性的一般性框架,并讨论了随机网络与无标度网络的韧性特征,以及网络韧性的复杂性问题;Ip 等^[65]曾探讨公路网络韧性问题,认为城市作为一个节点,其韧性可利用网络中其他城市节点可靠性通路的加权平均数来衡量,而整个网络的韧性可以通过所有节点韧性的加权和来实现;O'Kelly^[2]研究轴辐式网络(hub-spoke network)韧性问题,将网络韧性划分为连接韧性、节点韧性与枢纽韧性等3个层面,并尝试用于区域信息网络与货运网络的研究实践;Schintler 等^[66]利用复杂网络的理论来分析美国华盛顿特区的电力传输网络的韧性问题;而Cohen 等^[67]曾基于渗透理论来研究互联网对随机影响的韧性特征。显而易见,基础设施网络更容易实现工程韧性的度量,当前已有案例所表达的韧性内涵也多停留在这一层面,未来应适当考虑利用生态韧性与演化韧性框架进行分析,将适应性循环、多稳态等工具引入基础设施网络韧性研究中来。另外,在基础设施网络韧性领域所探索的复杂网络韧性指标与强调关键表现指标(KPI)的重要性^[68],为城市网络其他维度的韧性分析提供了重要参考。

2.3 社会网络韧性

社会网络是社会行动者及其相互关系的集合。近年来,社会网络的韧性问题在灾害韧性领域受到较多关注。洛克菲勒基金会对智利8.8级地震的研究案例^[69]表明,强震过后,唯一能够运行的社会网络为公众提供了宝贵的信息来源,使得居民们能够保持相互交流,维护了社会的稳定性;Cavallaro 等^[70]在评估城市系统的生态韧性时,即在HSPN模型中融入了社交网络的维度,作为考察城市韧性的重要方面,作者将居住在每一个城市建筑的居民模拟为一个虚拟节点,再基于这些节点建立社交网络;Islam 等^[71]探讨了黏合关系(与家庭成员和亲戚)与桥接关系(邻居和朋友)对灾害韧性与灾后恢复之间的影响,认为二者在人类社会应对飓风和风暴潮等极端天气事件时起到关键性的作用。另外,还有学者研究在经济衰退和紧缩时期社会网络的韧性

对于单身母亲的生活影响^[72]。正如 Aldrich 等^[73]所述,在灾难情况下,社会网络可以提供信息、援助、财政资源和儿童保育以及情感和心理支持等多样化资源,个人或区域则可通过这些资源快速地恢复到原来的状态,换言之,社会网络对于城市与区域的资源匹配与构建恢复能力至关重要。然而,社会网络天然具有节点不确定、共同目标缺失与受外部舆论环境影响等问题,使得社会网络常常呈现出松散、去中心及非系统合作等特征,这些问题与特征的存在使其在面对外部强干扰时,难以形成协同效应与聚合力,造成韧性降低,因此维护较高的社会网络韧性不仅依靠其自组织能力,还需要足够的他组织力量。除此之外,社会网络被认为是社会创新与创业的重要载体,也为日益兴旺的小型商业和微商提供了成长的土壤,因此社会网络韧性与区域经济韧性也具有非常密切的联系^[74]。

2.4 组织网络韧性

区域组织网络是一种自下而上的、以治理共同的区域问题为目标,在彼此信任的基础上,建立的非等级的、水平的、多中心的组织网络。有些区域组织是以城市政府为主体,而有些组织则是以非政府组织成员(NGO)、私人部门、个体公民为主体,这些组织与区域内各城市节点构成空间互锁(interlocking),从而形成城市组织网络。区域的组织网络有时围绕某一专业而展开,例如在20世纪欧洲城市所成立的气候联盟、能源城市、气候保护城市和城市气候保护网络等^[75];有时则处于综合的目的,比如欧盟的成立。城市组织网络通过节点间信息和交流、制定基准和颁布证书、项目资助和项目合作、调解和协调、对外影响、相互依赖等发挥治理作用^[76-77]。以“城市网络治理”为关键词的相关研究往往表达的即是城市组织网络的内涵。低效或不利的网络组织模式,会影响到治理能力的发挥,进而影响到城市网络的韧性,特别是针对灾害事件建立起来的组织网络,例如制度碎片化和领导力缺失(双重“执行赤字”)使得全球气候治理陷入僵局^[78]。Kendra 等^[79]以美国“9·11”事件后纽约应急行动中心的重组情况为例研究了组织韧性,认为其构成一般包括冗余性、调动资源的能力、有效的沟通和自组织的能力。孟庆国等^[80]认为城市群内部各城市间可进行直接的信息沟通和互动博弈,城市之间可以实施合作策略,也可以实施背叛策略,“正负”关系的存在,更增加了区域城市组织网络结构的可能

性,为韧性带来实质性影响。另外,针对一些高风险、可预期的区域性灾难,常设性城市组织网络的缺乏,显然更是低韧性的表现。目前来看,城市组织网络韧性的实证研究并不多,但其重点关注城市网络的决策层面,对城市网络综合韧性的影响是全局的、方向性的,因此绝不容忽视。

2.5 已有研究存在的不足

以上研究为城市网络韧性研究积累了丰富的理论和实证素材,但存在三方面基本问题:第一,研究对象网络构成单一,仅服务于某一专业问题(如供应链风险、交通网络安全等),疏于考虑城市网络问题的系统性、复杂性和多元性,使之难以获得综合的结论。例如产业网络韧性对基础设施网络韧性是具有依赖性的,生产节点交通联系受阻,会造成产业网络的供应链中断,因此综合韧性的考虑十分必要。第二,主要基于网络拓扑结构特征来研究网络韧性问题,对城市功能联系、时空协同、互补与博弈等城市网络核心问题欠于思考^[81-83]。第三,对韧性的理解多停留在工程韧性或生态韧性层面,强调短期的稳定性与恢复能力。3个问题的存在,标志着城市网络韧性研究仍处于初步探索阶段,尚未形成统一的研究范式,而城市网络韧性的综合概念还有待于进一步明确。

作为少有的综合化研究案例,彭翀等^[84]从经济、信息和交通联系3个层面来构筑城市网络,将网络的层级性、匹配性、传输性和聚集性归纳为影响网络结构韧性的重要因素,基于此框架对长江中游城市网络进行了结构韧性评估和制定优化策略,并提出城市网络结构韧性的概念:在面对外界干扰时,网络结构如何影响区域应对冲击并恢复、保持或改善原有系统特征和关键功能的能力即为网络结构韧性,并认为城市网络结构韧性本质上是区域韧性在空间上的典型形式。其研究较好地体现了城市网络的综合思维,但限于“流数据”的获取难度,尚存在网络维度考虑不全面和网络构建指标的代表性问题。另外,彭翀等^[84]所提出的是城市网络结构韧性而非城市网络韧性的概念,而本文认为,城市网络结构韧性仅是城市网络韧性的一个层面。同时韧性评估手段仍是基于网络拓扑结构的静态指标,使得韧性所倡导的“过程性”难以体现,这也是目前城市网络韧性研究所面临的共同难题。

综上,理想的城市网络韧性分析框架应当是多维的,涉及经济、社会、生态、组织与基础设施等诸

多方面;是综合的,要考虑不同网络维度之间的相互联系,需综合多维度韧性特征进行韧性判断。尽管网络拓扑结构十分重要,但它并非决定韧性的唯一要素,还应将其同危机类型和系统的结构与功能统筹考虑。另外,还应更多强调区域地理空间,使城市网络韧性的研究结论能够有助于制定“落地”的空间政策。同时,城市网络与社会网络、计算机网络、生物网络等其他网络相比,存在节点少、维度多、全连通与结构功能复杂等特点,因此,即便其他领域的韧性研究基础可以借鉴,但城市网络的韧性研究仍需要独特的思考。

3 城市网络韧性的分析框架

3.1 城市网络韧性的分析维度

城市网络综合而复杂,有多少类流数据,就会形成多少网络,要兼顾到所有网络维度并不现实,应选择与韧性息息相关的网络维度进行考量。关于区域韧性的维度,Bruneau等^[85]提出“TOSE”框架,认为韧性可分为技术韧性(technical)、组织韧性(organizational)、社会韧性(social)和经济韧性(economic)等4种类型。其中技术韧性关注于基础设施与生命线系统;组织韧性关注于当地政府机构的管治能力;社会韧性与经济韧性则重点强调社会与经济问题^[31]。Burton^[86]基于Bruneau等所提出的“4R”韧性特征,从社会韧性、经济韧性、制度韧性、基础设施韧性等4个维度来构建综合化的韧性指标体系。彭翀等则认为,区域韧性是对人类社会的综合度量,它集合了环境、社会、经济和政治系统及应对系统潜在危害扰动的防御能力^[31,87-88],主要体现在工程韧性、经济韧性、社会韧性与生态韧性4个领域中。结合城市网络的建构途径与以往研究对韧性维度的思考,城市网络韧性可从基础设施网络、经济网络、社会网络与组织网络等4个维度进行分析,分别对应于区域的基础设施安全(生命线安全)、经济安全、社会安全与空间组织行动能力,这些网络既与区域韧性息息相关,又是城市网络建构的重要维度,因此有益于展开城市网络韧性分析。基础设施网络,主要指基础设施,包括交通、供水、电力、电信与医疗等与城市生命线息息相关的网络,基础设施网络韧性的核心体现是设施的抗毁性和稳定性,同时也涵盖生命线工程的畅通和网络的应急反应能力;组织网络,主要指政府与非政府组织所形成的管治网络,尤指围绕区域协调

与应急目标所建立的组织网络,如公共卫生网络、区域防洪组织网络等,组织网络韧性的核心体现是政府和非政府组织网络的协调和引导能力;经济网络,主要指经济要素流所构建的网络,如企业组织网络、资金网络、技术网络、价值链网络等,经济网络韧性的核心体现是网络节点和连接的创新性、灵活性、多样性和适应能力;社会网络,即社会群体自发形成的网络,如精英网络、创客网络等,社会网络韧性的核心体现是面对外部胁迫时社会资源的集成能力和迅速的反馈能力。

3.2 城市网络的韧性特征——结构韧性与功能韧性

结构与功能是系统普遍存在的2种既相互区别又相互联系的基本属性,是系统中要素之间相互联系、相互作用所形成的整体性关系问题的2个方面。严格来讲,结构与功能基本决定了系统各项特征表现,包括韧性特征,因此关注于系统的结构与功能对于揭开其韧性机制,具有重要作用。着眼于结构与功能两方面,城市网络韧性特征可划分为结构韧性与功能韧性:① 结构韧性,主要指代网络拓扑结构所导致的韧性问题,尤其关注于网络节点之间的物理连接与逻辑连接,包括节点韧性、连接韧性、整体韧性等。节点韧性与连接韧性一方面强调节点和连接自身的抗毁性,另一方面强调节点与连接的冗余性、多样性与灵活性;整体韧性则主要强调网络的自组织与协调能力,包括某一网络维度自身的协调能力和各网络维度间的协调能力。② 功能韧性,主要指代城市网络的功能意义所蕴含的韧性问题,功能可包括节点功能、连接功能、子群功能与网络整体功能等。节点功能可理解为节点在网络中扮演的角色,这一角色是节点自身的禀赋所在,也可能是外力所赋有,包括生产者功能,组织者功能,门户功能,政治、经济、文化中心功能等,例如Rose等^[89]曾讨论门户节点即港口在区域经济网络韧性中的重要角色;连接功能是节点间相互作用产生的功能,例如廊道功能、主干功能等;子群功能可理解为一部分子网络所形成的功能,例如核心区与边缘区、主体功能区等;网络整体功能基本等同于城市网络维度,探讨某个维度或多个维度在城市网络整体中的作用,包括发展功能、支撑功能、保障功能等。功能的多样性、创新性与转化能力是城市网络功能韧性的核心内涵。结构韧性研究方面,学者们已有一些相关的研究积累,但在功能韧性方面,尚有待于进一步探索。

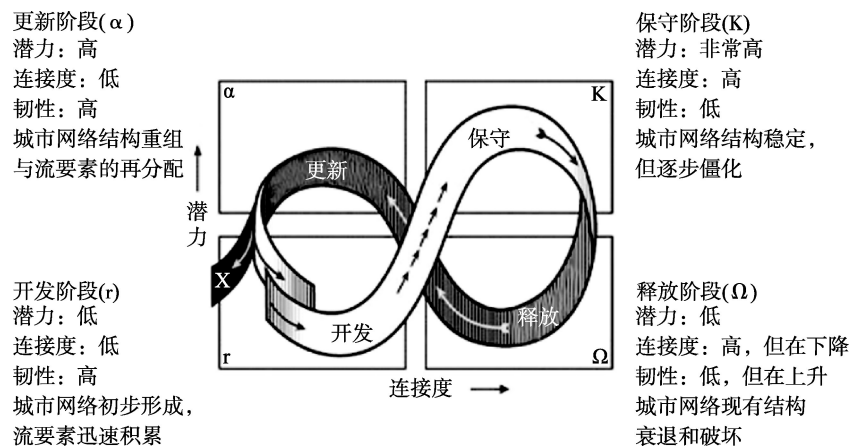
3.3 城市网络的韧性过程——适应性循环

结构与功能韧性基于某一时刻的系统特性来判断系统韧性,适于面向不确定性和韧性准备阶段,而是否真正具有韧性,需要一定的历史过程来判断。在监测系统的演化和演化韧性方面,适应性循环是一个被普遍认可的理论工具。适应性循环理论的核心是潜力(potential)、连接度(connectedness)与韧性(resilience)3个关键属性和开发(r)、保守(K)、释放(Ω)与更新(α)4个循环阶段,3个关键属性随着循环阶段的不同而发生变化^[90-91]。在城市网络系统中,潜力是指城市网络中的要素资源,尤其是可流动的要素资源,例如人口、资金、技术等;连接度是城市网络各维度内部的网络连接水平和各维度之间的连接水平;韧性是城市网络面对外部干扰和冲击时,展现出的吸收应对能力、适应能力和转换能力。如图1所示,在开发(r)阶段,新的城市网络架构初步形成,流要素开始不断积累,城市节点间的关系愈发紧密,由于选择的多样性和组织的灵活性,呈现较高的韧性。随着流要素的高度积累和网络结构的不断成熟,城市网络系统进入保守(K)阶段,此时的城市网络高效、相对稳定,但结构僵化,缺少对外界环境剧烈变化的适应能力和转化能力,因此具有较低的韧性。 $r \rightarrow K$ 往往是一个非常漫长的前向循环过程,城市网络系统也在千方百计地延长这一过程,致使我们在现实中所观察到的城市网络多处于这一过程中。释放(Ω)阶段是遭受外部冲击和压力后,城市网络现有结构和功能被严重破坏,潜力大幅度下降,网络连接能力大幅衰退,但由于打破已有僵化结构的束缚,为新生力量的产生提

供土壤,韧性低,但在上升。在更新(α)阶段,韧性强的城市网络通过创新来实现结构的重组,再次进入开发(r)阶段,进入下一次适应性循环;而韧性弱的城市网络则因适应和转换能力不足而被迫退出循环,导致城市网络的衰败。 $\Omega \rightarrow r$ 是一个相对快速的后向循环过程,往往伴随较大的危机而出现。

从实质来看,适应性循环是一种生命周期,而城市网络作为一种地域系统形式,也具有一定的生命周期特征。早期经典的增长极理论、核心边缘理论曾认为区域一般由互不关联、孤立发展,变成彼此联系、发展不平衡,又由极不平衡发展变为相互关联的平衡发展的区域系统,体现出一定的阶段演化规律,而其背后的机制是极化效应与扩散效应。实际城市网络所强调的流和相互作用与增长极、核心边缘理论所强调的极化与扩散有异曲同工之处,所不同的是城市网络重视每个节点的参与作用,而后者则重点强调所谓的核心,以网络视角来衡量,区域中辐射能力较强的增长极系统可解析为典型的异配性轴辐式城市网络。城市网络的演化也存在一个节点间孤立发展、到节点间逐渐建立联系,又到节点间密切稳定联系的过程,这一过程与增长极理论与核心边缘理论所描述的都是理想化的发展过程,皆未考虑外界破坏的因素,所讨论的演化阶段仅仅是适应性循环的 $r \rightarrow K$ 过程而已。

在 $r \rightarrow K$ 前向循环阶段,城市网络在不断自我完善,同时不断抵御和吸收外部干扰,该阶段的韧性更多地表现为适应性,而对于整个适应性循环过程而言,韧性更多地表现为适应能力。换句话说,适应性主要针对短周期、轻度的干扰,强调恢复和适



注:参考Pendall等^[36]、Simmie等^[41]与陈梦远^[40]绘制。

图1 城市网络的适应性循环模型

Fig.1 An adaptive cycle model of city network

应,而适应能力主要针对长周期的影响和剧烈冲击,强调路径和改变。作为城市网络韧性的2个重要表现,适应性与适应能力都不可或缺,短期的韧性监测与长期的韧性考察也同等重要。

3.4 城市网络韧性的分析方法

城市网络的构建是城市网络韧性研究的基础和关键。首先,由于城市网络具有节点少、维度多、全连通与结构功能复杂等特点,(有向)加权网络是模拟城市网络的理想模型,但研究实践中发现,主流网络分析软件在加权网络分析方面往往差强人意,因此,一些特定的方法和模型需要通过编程来实现。鉴于城市网络节点数量有限而相对固定,“加权”所带来的复杂性不难克服。其次,在具体进行网络构建时,应选择合适的建构途径,使得建构的网络兼具代表性、数据可获取性与韧性关联性,例如在实际研究中可基于GIS矢量数据构建基础设施网络,利用企业总部-分支机构数据、投入产出数据构建产业网络,利用论文合作、专利合作、专利转移数据等构建知识网络,基于人口流动大数据与信息流数据构建社会网络,基于联席会议等区域组织、区域性规划中的参与名单构建政府组织网络,基于志愿者协会、行业协会等构建非政府组织网络。显然网络的构建途径不限于此,对于特定的网络与特定的研究问题,也可设计具有针对性的网络。

城市网络韧性的度量方法包括韧性指标体系方法、韧性代理方法与定性研究方法,依研究问题不同而选择合适的方法。对于韧性特征的分析,重点强调城市网络系统的现状特征、面向问题的不确定性和度量其危机准备能力,利用指标体系方法较为适宜;对于韧性过程而言,重点强调城市网络的韧性机制,可从系统随时间演变中寻找韧性或非韧性的证据,利用韧性代理方法更为可行。除指标体系与韧性代理方法外,定性分析也是城市网络韧性研究的重要方法。

对于韧性特征之结构韧性,可结合网络拓扑结构指标来构建节点韧性指数、连接韧性指数与网络韧性指数等,也可采用加权网络图的点韧性度、边韧性度等指标来衡量节点与连接等局部结构对网络整体韧性的影响。对于韧性特征之功能韧性方面,可通过能值系数来表达节点、连接或子群等在某领域功能的强弱,将功能变量引入加权网络模型中,作为重要的自变量进行分析。另外,亦可借助于定性分析手段,探讨城市网络的功能对韧性的影

响,例如分析区域的自然和人文背景、城市间的历史联系等。

对于韧性过程,韧性代理方法是可行的监测手段,如上文所述,该方法已在区域韧性研究中发挥了重要作用。已有经验表明,使用该方法的关键是寻找合适的韧性代理变量。针对城市网络特点,除传统的GDP、就业率等区域核心变量外,亦探索使用人流量、货流量、信息流量与资金流量等显性流变量作为韧性代理,用于城市网络韧性的演化过程分析。未来韧性过程研究可分为2种:一种是后验性的,即应用历史数据来研究,分析某历史事件中城市网络的韧性表现,此类研究有助于深入理解城市网络的韧性机理;另一种是先验性的,即通过情景模拟来研究,假设危机情景、城市行为,进而判断城市网络的韧性,此类研究重点强调实践应用。无论先验还是后验,韧性过程的研究应该是城市网络韧性研究的重点和难点之一。

目前在基础设施网络领域较为流行的抗毁性研究,似乎兼顾了系统的结构韧性特征与演化过程,此类研究以剔除节点的方式来观察系统的整体指标如何遭受影响,以实现衡量韧性的目的。抗毁性研究虽然考虑到了外部冲击的方式和过程,但对于关注城市网络系统的自组织能力和主动反馈方面有所欠缺,致使当危机发生时,城市间如何配合、要素如何流动、维护韧性的关键等问题无从得知。随着人工智能技术的飞速发展,多智能体技术将成为解决这一问题的有效工具,多智能体系统是多个智能体组成的集合,每个智能体都具有自己的行为模式,各智能体之间可以通过相互通讯、合作、协调、互解、管理、调度和控制来影响整个系统的结构与功能,多智能体系统所具有的分布性、协调性、自组织能力和学习能力使之与城市网络系统完美契合,每一个城市都可以作为一个智能体来看待,而整个城市网络系统则可视为一个多智能体系统。多智能体可以同时模拟城市网络的危机传导和自组织行为,是体现韧性过程性特征的理想工具,多智能体在城市网络韧性研究中将会释放非常巨大的潜力。

当然,城市网络韧性的研究方法并不限于以上所述,随着研究的不断深入,方法也不断推陈出新,但无论应用何种方法,都应建立在深入理解城市网络内在运行机理与韧性表达机制的基础上。

3.5 城市网络韧性的优化

不同于生态韧性,演化韧性可通过干预(inter-

vention)手段减少、维持或增强。以韧性特征与韧性过程的分析为基础,面向适宜网络思维关注的“区域问题”与“问题区域”,提出具有科学性和可操作性的优化途径和策略,进而促进区域的安全发展,是城市网络韧性研究的初衷所在。在“区域问题”方面可重点关注区域生命线系统安全、区域生态安全、产业链安全、舆情安全、区域可持续发展等,在“问题区域”方面可重点关注区域尺度与城市群尺度,特别是一些人口密集、城市联系紧密且灾难多发的地区。主要研究内容可涵盖:提出城市网络韧性优化的目标、策略;应用机制设计理论构建城市网络韧性优化的分析框架;应用该分析框架对城市网络韧性优化进行机制设计,包括内生动力机制、外部增强机制和引导协调机制等;总结提出不同城市网络优化的韧性途径和政策建议,如增加与减少流动性等有效措施。

在优化分析中,先进的优化手段不可或缺。根据韧性过程分析所获得的韧性水平、韧性阈值和敏感性危机等评估结果,结合韧性结构分析所获得的节点韧性、关键节点、关键联系等信息,通过改变网络结构、重新配置区域资源,以及实施外部调控措施(产业政策、空间政策等)等方法对城市网络韧性进行优化。为克服优化问题的运算复杂度、减少人为主观性干扰、实现优化过程的自动化,可采用机器学习方法(如人工神经网络)进行网络空间优化分析,基于指示变量(韧性代理)和综合韧性水平设定目标函数,通过机器学习不断改变网络结构参数和资源配置参数来逼近目标函数,最后得到相对优化的解决方案。

3.6 城市网络韧性的综合框架

综合以上内容,初步形成城市网络韧性的综合分析框架(图2)。作为一个开放的自组织系统,城市网络的结构与功能是决定城市网络韧性的内在因素,良好的结构与功能有助于城市网络系统面对各类不确定的危机干扰,并能在合适的时机实现路径转换,城市网络韧性特征研究有助于把握韧性城市网络的一般特征,关注于危机准备和防御。韧性过程关注于城市网络系统遭遇外界危机胁迫时的韧性表现和行为,以城市网络结构与功能的变化、韧性指标代理的变化为表征,韧性过程研究是解开城市网络韧性机制问题的钥匙,也是城市网络韧性优化的重要依据。在方法运用上,韧性特征分析主要应用韧性指标体系方法,韧性过程主要应用韧性代

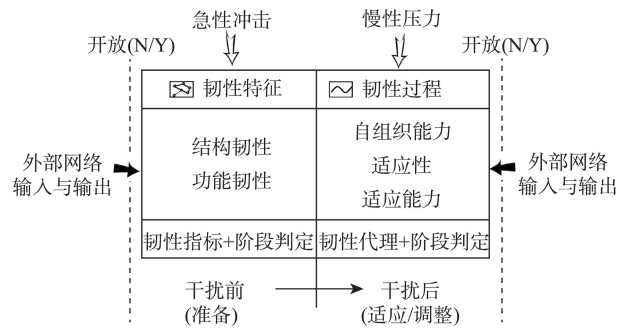


图2 城市网络韧性综合分析框架

Fig.2 Analytical framework of city network resilience

理方法,在作具体的韧性水平判断时,无论是韧性特征分析还是韧性过程分析,适应性循环的阶段判定都将作为重要依据。对于某些城市网络而言,内在要素起决定性作用,为简化模型和寻找关键问题,可适当忽略外部网络对本网络的影响。而对于另一些区域而言,外在因素起重要作用,这时需要考虑这些外部因素(如外商直接投资、国家政策),以体现系统的开放性特征。对于急性冲击和慢性压力而言,寻找典型的冲击与压力、探索其对城市网络的作用机理是研究应关注的重点。

4 结语与讨论

4.1 结语

本文对城市网络韧性相关研究领域的文献进行回顾总结,初步阐述了城市网络韧性的概念,结合当前的城市网络与区域韧性研究范式,探索性提出了适应于区域尺度的城市网络韧性分析框架。该框架有助于准确掌握城市间危机传递的规律,了解区域作为一个城市网络系统如何展开应对危机的准备和自我恢复,提出精准的优化干预措施来最小化外界干扰对城市网络系统的负面影响。这一分析框架可广泛应用于区域空间规划、城市防灾减灾系统建设与区域可持续发展等诸多实践领域,具有广阔的应用前景。更可为以安全发展为目标的城市网络韧性研究提供科学依据,也可为各城市节点找准自身角色、如何参与区域共同治理提供直接参考。

4.2 讨论

(1) 不存在绝对韧性的城市网络

外部风险的不确定性是韧性研究不可避免的难题,即便我们千方百计穷举所有可能出现的冲击和压力,它们却总能“推陈出新”,人类对疾病的抗

争即是鲜明一例。同时,完美而无漏洞的系统在任何领域都不存在,包括城市网络系统,我们只能尽最大的努力,让系统更加完善和灵活,以应对外部影响。另外,在韧性方面也存在悖论,在面对不同的外界影响时,同一种系统的结构和功能可能呈现完全相反的韧性特征,最有可能的结果是“两害相权取其轻”,无法同时避免多种风险。因此,从这个意义上来说,不存在绝对韧性的城市网络,只能采取手段使其更加“韧性”。

(2) 无干扰也是一种干扰

急性冲击和慢性压力是影响城市网络安全的外部动因,在某种意义上可解释为因外部环境变量的变化而产生胁迫作用。我们通常理解的冲击和压力往往都是显性的,伴随着事件的发生、环境变量的突变和渐变,但环境不变实际上也可看作是一种干扰。环境适时适度的改变对系统增强韧性是有益的,有助于系统不断微调自身结构,并形成免疫能力;而环境长期保持不变,会导致城市网络对某种环境的过度适应,由于缺少外界刺激,难以形成危机免疫能力,造成韧性的下降。因此,韧性的城市网络系统应主动适应外界干扰,而非试图创造无干扰条件,这对于区域如果应用宏观调控工具等问题具有指示意义。

(3) 城市网络韧性研究应更多融入地理思维

城市网络作为一种新的区域范式,在诞生之初(世界城市网络)便承袭了“无空间之空间、无时间之时间”的流空间思想,挑战了以往基于中心地理论所构建的城市研究理论体系。但城市节点和基础设施维度的地理嵌入性,使得城市网络实际上具有流空间与场所空间的双重空间特征。虽然复杂网络分析、社会网络分析等方法为城市网络研究提供了方便的研究工具,但这些方法不能解释所有问题,地理空间要素仍发挥重要的作用,因此地理邻近效应、空间滞后性与地理衰减等因素应纳入韧性评价模型中。另外,地理学传统的实地调研、质性分析和比较分析方法也应是研究城市网络韧性问题的必要手段。

(4) 安全发展始终是区域或城市网络发展的客观前提

如上文所述,以往所构建的区域发展模型往往是理想化的,并未考虑外界环境变化对区域发展的干扰问题。但城市的产生、消失与兴衰表明,世界的城市与区域系统处在一个不断循环发展的过程中,只有在相对安全的环境中,城市与区域的人口、

财富等要素才不断累积,否则系统将走向倒退甚至崩溃。城市网络作为区域研究的一个新范式,未来需要关注的问题很多,但这些问题都必须以城市网络的安全发展为前提,只有保障城市网络的安全,才能谋求更持续的发展。

参考文献(References)

- [1] 杨永春,冷炳荣,谭一泓,等.世界城市网络研究理论与方法及其对城市体系研究的启示[J].地理研究,2011,30(6):1009-1020. [Yang Yongchun, Leng Bingrong, Tan Yiming, et al. Review on world city studies and their implications in urban systems. Geographical Research, 2011, 30(6): 1009-1020.]
- [2] O'Kelly M E. Network hub structure and resilience [J]. Networks & Spatial Economics, 2015, 15(2): 235-251.
- [3] Klimova N, Akimova A. Supply chain security: tools, trends, and techniques: Toyota and Honda cases [R]. Gothenburg, Sweden: Jönköping University, 2011.
- [4] Ali S H, Keil R. Global cities and the spread of infectious disease: The case of severe acute respiratory syndrome (SARS) in Toronto, Canada [J]. Urban Studies, 2006, 43(3): 2083-2090.
- [5] 周宝砚. 美国政府公共危机管理的得与失: 以“卡特里娜”飓风和“丽塔”飓风灾害事件处理为例 [J]. 中国应急救援, 2009(5): 39-42. [Zhou Baoyan. Gains and losses of public crisis management in the United States Government: A case study of Hurricane Katrina and Rita. China Emergency Rescue, 2009(5): 39-42.]
- [6] Helbing D. Globally networked risks and how to respond [J]. Nature, 2013, 497: 51-59.
- [7] Beck M B, Walker R V. Nexus security: Governance, innovation and the resilient city [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 640-657.
- [8] Camagni R. City networks: An analysis of the Lombardy Region in terms of communication flows [M]// Cuadrado J, Nijkamp P, Salva P. Moving Frontiers: Economic restructuring, regional development and emerging networks. Aldershot, UK: Avebury, 1994: 127-150.
- [9] Camagni R, Capello R. The city network paradigm: Theory and empirical evidence [C]// Capello R, Nijkamp P. Urban dynamics and growth: Advances in Urban Economics. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2004, 266: 495-529.
- [10] 吴康,方创琳,赵渺希.中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征[J].地理研究,2015,34(4):711-728. [Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoxi. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks. Geographical Research, 2015, 34(4): 711-728.]
- [11] Sassen S. The global city: New York, London, Tokyo

- [M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1991.
- [12] Castells M. The informational city: Information technology, economic restructuring and the urban-regional progress [M]. Oxford, USA: Blackwell, 1989.
- [13] 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.
- [14] Neal Z. Differentiating centrality and power in the world city network [J]. *Urban Studies*, 2011, 48(13): 2733-2748.
- [15] Pflieger G, Rozenblat C. Urban networks and network theory: The city as the connector of multiple networks [J]. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2723-2735.
- [16] Batty M. The new science of cities [M]. Massachusetts, USA: MIT Press, 2013.
- [17] Taylor P J, Catalano G, Walker D R F. Measurement of the world city network [J]. *Urban Studies*, 2002, 39(13): 2367-2376.
- [18] Hall P, Pain K. The polycentric metropolis: Learning from mega-city regions in Europe [M]. London, UK: Earthscan, 2006.
- [19] Neal Z. Evolution of the business air travel network in the US from 1993 to 2011: A descriptive analysis using AIRNET [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2013, 9: 5-11.
- [20] Derudder B, Witlox F. An appraisal of the use of airline data in assessing the world city network: A research note on data [J]. *Urban Studies*, 2005, 42(13): 2371-2388.
- [21] 王姣娥, 景悦. 中国城市网络等级结构特征及组织模式: 基于铁路和航空流的比较 [J]. *地理学报*, 2017, 72(8): 1508-1519. [Wang Jiaoe, Jing Yue. Comparison of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1508-1519.]
- [22] 陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式 [J]. *地理学报*, 2017, 72(2): 224-241. [Chen Wei, Liu Wei Dong, Ke Wenqian, et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks based on the highway passenger flows. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 224-241.]
- [23] 马海涛, 方创琳. 基于企业微观视角的城市区域生产网络空间组织研究: 以粤东城镇群服装生产为例 [J]. *地理科学*, 2011, 31(10): 1172-1180. [Ma Haitao, Fang Chuanglin. Spatial organization of production networks in city-region based on enterprises relationship: A case of apparel production in urban agglomeration of eastern Guangdong Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(10): 1172-1180.]
- [24] Wall R S, Knaap G A V D. Sectoral differentiation and network structure within contemporary worldwide corporate networks [J]. *Economic Geography*, 2011, 87(3): 267-308.
- [25] 赵渺希, 刘铮. 基于生产性服务业的中国城市网络研究 [J]. *城市规划*, 2012, 36(9): 23-28, 38. [Zhao Miaoxi, Liu Zheng. Research on China's city network based on production service industry. *City Planning Review*, 2012, 36(9): 23-28, 38.]
- [26] 李仙德. 基于上市公司网络的长三角城市网络空间结构研究 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(12): 1587-1600. [Li Xiande. Spatial structure of the Yangtze River Delta urban network based on the pattern of listed companies network. *Progress in Geography*, 2014, 33(12): 1587-1600.]
- [27] Taylor P J. New political geographies: Global civil society and global governance through world city networks [J]. *Political Geography*, 2005, 24(6): 703-730.
- [28] 甄峰, 王波, 陈映雪. 基于网络社会空间的中国城市网络特征: 以新浪微博为例 [J]. *地理学报*, 2012, 67(8): 1031-1043. [Zhen Feng, Wang Bo, Chen Yingxue. China's city network characteristics based on social network space: An empirical analysis of Sina micro-blog. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1031-1043.]
- [29] 魏冶, 修春亮, 刘志敏, 等. 春运人口流动透视的转型期中国城市网络结构 [J]. *地理科学*, 2016, 36(11): 1654-1660. [Wei Ye, Xiu Chunliang, Liu Zhimin, et al. Spatial pattern of city network in transitional China based on the population flows in "chunyun" period. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(11): 1654-1660.]
- [30] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1973, 4(4): 1-23.
- [31] 彭翀, 袁敏航, 顾朝林, 等. 区域弹性的理论与实践研究进展 [J]. *城市规划学刊*, 2015(1): 84-92. [Peng Chong, Yuan Minhang, Gu Chaolin, et al. Research progress on the theory and practice of regional resilience. *Urban Planning Forum*, 2015(1): 84-92.]
- [32] Eraydin A, Taşan-Kok T. Resilience thinking in urban planning [M]. New York, USA: Springer, 2012.
- [33] 黄晓军, 黄馨. 弹性城市及其规划框架初探 [J]. *城市规划*, 2015, 39(2): 50-56. [Huang Xiaojun, Huang Xin. Resilient city and its planning framework. *City Planning Review*, 2015, 39(2): 50-56.]
- [34] Boschma R. Towards an evolutionary perspective on regional resilience [J]. *Regional Studies*, 2015, 49(5): 733-751.
- [35] 西亚姆巴巴拉·伯纳德·曼耶纳, 张益章, 刘海龙. 韧性

- 概念的重新审视 [J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 13-21. [Siambabala B M, Zhang Yizhang, Liu Hailong. The concept of resilience revisited. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 13-21.]
- [36] Pendall R, Foster K A, Cowell M. Resilience and regions: Building understanding of the metaphor [J]. *Cambridge Journal of Regions Economy & Society*, 2010, 3(1): 71-84.
- [37] Fingleton B, Garretsen H, Martin R. Recessional shocks and regional employment: Evidence on the resilience of U.K. regions [J]. *Journal of Regional Science*, 2012, 52(1): 109-133.
- [38] Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks [J]. *Journal of Economic Geography*, 2012, 12(12): 1-32.
- [39] Martin R, Sunley P. On the notion of regional economic resilience: Conceptualization and explanation [J]. *Journal of Economic Geography*, 2014, 15(1): 1-42.
- [40] 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. [Chen Mengyuan. An international literature review of regional economic resilience: Theories and practices based on the evolutionary perspective. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1435-1444.]
- [41] Simmie J, Martin R. The economic resilience of regions: Towards an evolutionary approach [J]. *Cambridge Journal of Regions Economy & Society*, 2010, 3(1): 27-43.
- [42] Carreiro M M, Zipperer W C. Co-adapting societal and ecological interactions following large disturbances in urban park woodlands [J]. *Austral Ecology*, 2011, 36(8): 904-915.
- [43] McInroy N, Longlands S. Productive local economies: Creating resilient place [M]. Manchester, UK: Centre for Local Economic Strategies, 2010.
- [44] Bennett E M, Cumming G S, Peterson G D. A systems model approach to determining resilience surrogates for case studies [J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 945-957.
- [45] 孙久文, 孙翔宇. 区域经济韧性研究进展和在中国应用的探索 [J]. 经济地理, 2017, 37(10): 1-9. [Sun Jiuwen, Sunxiangyu. Research progress of regional economic resilience and exploration of its application in China. *Economic Geography*, 2017, 37(10): 1-9.]
- [46] Meijers E, Hoekstra J, Aguado R. The basque city network: An empirical analysis and policy recommendations [R]. Paper Presented at EUNIP International Conference, San Sebastian, Spain, 2008: 10-12.
- [47] Resilience Alliance. Assessing resilience in social-ecological systems: A workbook for scientists [M]. Resilience Alliance, 2007: 1-53.
- [48] Christopher M L. Logistics and supply chain management [M]. London, UK: Pitman Publishing, 1992.
- [49] 周艳菊, 邱莞华, 王宗润. 供应链风险管理研究进展的综述与分析 [J]. 系统工程, 2006, 24(3): 1-7. [Zhou Yanju, Qiu Wanhua, Wang Zongrun. A review on supply chain risk management. *Systems Engineering*, 2006, 24(3): 1-7.]
- [50] 李卫江, 温家洪, 李仙德. 产业网络灾害经济损失评估研究进展 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(3): 330-341. [Li Weijiang, Wen Jiahong, Li Xiande. Progress of research on economic loss assessment of disasters in industrial networks. *Progress in Geography*, 2018, 37(3): 330-341.]
- [51] Rose A, Lim D. Business interruption losses from natural hazards: Conceptual and methodological issues in the case of the NCorthridge earthquake [J]. *Environmental Hazards*, 2002, 4(1): 1-14.
- [52] Wagner S M, Bode C. An empirical investigation into supply chain vulnerability [J]. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2006, 12(6): 301-312.
- [53] Wu J D, Li N, Hallegatte S, et al. Regional indirect economic impact evaluation of the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(1): 161-172.
- [54] Okuyama Y, Santos J R. Disaster impact and input-output analysis [J]. *Economic Systems Research*, 2014, 26(1): 1-12.
- [55] Meyer V, Becker N, Markantonis V, et al. Review article: Assessing the costs of natural hazards-state of the art and knowledge gaps [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(5): 1351-1373.
- [56] Haraguchi M, Lall U. Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 14(3): 256-272.
- [57] 闫妍. 弹性供应网络系统的防御策略和应急方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009. [Yan Yan. Research on prevention strategies and response methods for the resilient supply chain network. Shenyang, China: Northeastern University, 2009.]
- [58] Kim Y, Chen Y S, Linderman K. Supply network disruption and resilience: A network structural perspective [J]. *Journal of Operations Management*, 2015, 33(1): 43-59.
- [59] Garvey M D, Carnovale S, Yeniyurt S. An analytical framework for supply network risk propagation: A Bayesian network approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(2): 618-627.
- [60] 李卫江, 蒋湧, 温家洪, 等. 地震灾害情景下产业空间网络风险评估: 以日本丰田汽车为例 [J]. 地理学报,

- 2016, 71(8): 1384-1399. [Li Weijiang, Jiang Yong, Wen Jiahong, et al. Risk assessment of industrial geographical network in the scenario of seismic disaster: A case study of Toyota in Japan. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1384-1399.]
- [61] 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*, 2012, 14(1): 199-219.
- [62] Lozano S, Arenas A. A model to test how diversity affects resilience in regional innovation networks [J/OL]. *Journal of Artificial Societies & Social Simulation*, 2007, 10(4): 8. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/10/4/8.html>.
- [63] Broekel T, Boschma R. Knowledge networks in the Dutch aviation industry: The proximity paradox [J]. *Journal of Economic Geography*, 2012, 12(2): 409-433.
- [64] Reggiani A. Network resilience for transport security: some methodological considerations [J]. *Transport Policy*, 2013, 28(2): 63-68.
- [65] Ip W H, Wang D. Resilience and friability of transportation networks: Evaluation, analysis and optimization [J]. *IEEE*, 2011, 5(2): 189-198.
- [66] Schintler L A, Gorman S, Kulkarni R, et al. Moving from protection to resiliency: A path to securing critical infrastructure [M]// Murray A T, Grubestic T H. *Critical infrastructure*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007: 291-307.
- [67] Cohen R, Erez K, Benavraham D, et al. Resilience of the Internet to random breakdowns [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(21): 4626-4628.
- [68] Dalziell E P, McManus S T. Resilience, vulnerability, and adaptive capacity: Implications for system performance [R]. *International Forum for Engineering Decision Making (IFED)*. Stoos, Switzerland, 2004: 6-8.
- [69] The Rockefeller Foundation, ARUP. City resilience framework [EB/OL]. http://Publications.Arup.Com/Publications/C/City_Resilience_Framework.aspx. 2015.
- [70] Cavallaro M, Asprone D, Latora V, et al. Assessment of urban ecosystem resilience through hybrid social-physical complex networks [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2014, 29(8): 608-625.
- [71] Islam R, Walkerden G. How bonding and bridging networks contribute to disaster resilience and recovery on the Bangladeshi coast [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 10: 281-291.
- [72] Canton J. *Social networks, resilience and public policy: The role that support networks play for lone mothers in times of recession and austerity* [D]. Bath, UK: University of Bath, 2015.
- [73] Aldrich D P. *Building resilience: Social capital in post-disaster recovery* [M]. Chicago, USA: University of Chicago Press, 2012.
- [74] 许成磊, 赵雅曼, 赵娅. 面向社会网络的团队间创业协同关系结构与效应研究 [J]. *科技进步与对策*, 2018, 35(17): 20-28. [Xu Chenglei, Zhao Yaman, Zhao Ya. Research on structure and effect of collaborative relationships between social network oriented entrepreneurial teams. *Science & Technology Progress and Policy*, 2018, 35(17): 20-28.]
- [75] 巩潇泫. 欧盟气候治理中的跨国城市网络 [J]. *国际研究参考*, 2015(1): 10-15. [Gong Xiaoxuan. Transnational city network in the EU climate governance. *International Data Information*, 2015(1): 10-15.]
- [76] Kern K, Bulkeley H. Cities, Europeanization and multi-level governance: Governing climate change through transnational municipal networks [J]. *Journal of Common Market Studies*, 2009, 47(2): 309-332.
- [77] 李昕蕾, 宋天阳. 跨国城市网络的实验主义治理研究: 以欧洲跨国城市网络中的气候治理为例 [J]. *欧洲研究*, 2014, 32(6): 129-148, 159. [Li Xinlei, Song Tianyang. Experimentalist governance on transnational municipal networks: A case study on the climate governance on European transnational municipal networks. *Chinese Journal of European Studies*, 2014, 32(6): 129-148, 159.]
- [78] 于宏源, 王文涛. 制度碎片和领导力缺失: 全球环境治理双赤字研究 [J]. *国际政治研究*, 2013, 34(3): 38-51, 7-8. [Yu Hongyuan, Wang Wentao. Institutional fragmentation and inadequate leadership: The twin deficits of global environmental governance and its implications. *International Politics Quarterly*, 2013, 34(3): 38-51, 7-8.]
- [79] Kendra J M, Wachtendorf T. Elements of resilience after the World Trade Center disaster: Reconstituting New York City's Emergency Operations Centre [J]. *Disasters*, 2003, 27(1): 37-53.
- [80] 孟庆国, 罗杭. 基于多智能体的城市群政府合作建模与仿真: 嵌入并反馈于一个异构性社会网络 [J]. *管理科学学报*, 2017, 20(3): 183-207. [Meng Qingguo, Luo Hang. Modeling and simulation of multi-cities' MAS: Embedded in and feedbacking on government collaboration based on heterogeneous social networks. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(3): 183-207.]
- [81] Mäkinen H. On the emergence and structure of a new regional network [J]. *Human Systems Management*, 2001, 20(3): 249-256.
- [82] 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.
- [83] 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. [Ma Xueguang, Li Guicai. Progress and application practice in western city network studies. *Urban Planning International*, 2012, 27(4): 65-70.]
- [84] 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 Chong, Lin Yingzi, Gu Chaolin. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1193-1207.]
- [85] Bruneau M, Chang S, Eguchi R, et al. A framework to quantitatively assess and enhance seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(4): 733-752.
- [86] Burton C G. A validation of metrics for community resilience to natural hazards and disasters using the recovery from hurricane Katrina as a case study [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2015, 105(1): 67-86.
- [87] Maguire B, Hagan P. Disasters and communities: Understanding social resilience [J]. *Australian Journal of Emergency Management*, 2007, 22(2): 16-20.
- [88] 钟琪, 戚巍. 基于态势管理的区域弹性评估模型 [J]. *经济管理*, 2010, 32(8): 32-37. [Zhong Qi, Qi Wei. Regional resilience evaluation model research based on the situation management. *Business Management Journal*, 2010, 32(8): 32-37.]
- [89] Rose A, Wei D. Estimating the economic consequences of a port shutdown: The special role of resilience [J]. *Economic Systems Research*, 2013, 25(2): 212-232.
- [90] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.
- [91] Gunderson L H, Holling C S. *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems* [M]. Washington D C, USA: Island Press, 2002.

Study on the concept and analytical framework of city network resilience

WEI Ye¹, XIU Chunliang^{2*}

(1. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. School of Jangho Architecture, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

Abstract: As a new organizational form and research paradigm of urban spatial system, city network has been widely concerned in recent years. However, most of the studies on city networks were based on a positive perspective, while the negative effects, security, and sustainable development of city networks were rarely addressed. By reviewing the literature of city network and regional resilience, this article tentatively proposed a concept and an analytical framework of city network resilience based on evolutionary resilience theory to explore the "negative problems" of city networks. In brief, city network resilience could be comprehended as the ability of city network systems to prevent, resist, respond to, and adapt to the impact of external acute shocks and chronic pressures and recover from them or switch into another development path by means of the cooperation and complementarity of social, economic, organizational, and engineering fields among cities. Based on this concept, combining evolutionary resilience and adaptive cycle theory, a city network was regarded as a complex adaptive system with dynamic changes. Based on the social network, economic network, organizational network, and infrastructure network, considering both adaptation and adaptability, a framework of urban network resilience analysis from the perspective of resilience characteristics and resilience processes was proposed. Furthermore, the analysis and optimization methods of urban network resilience were prospected, and some core issues involved were discussed. The research aimed to provide a scientific basis for regional planning, regional policy formulation, and regional organization establishment with the goal of achieving safe development, and provide valuable references for each city node to identify its role in a region and participate in regional governance.

Keywords: city network; regional resilience; city network resilience; safe development