

长江经济带城市群网络结构韧性之演化

——基于“流空间”视角的分析

冯怡 彭迪云 周美楠¹

【摘要】 在应用动态流数据构建金融联系网络、信息联系网络、交通联系网络、知识联系网络与综合联系网络基础上，以长江经济带城市群为研究对象，借助 UCINET 社会网络分析工具和 ArcGIS 可视化软件，测度并比较 2014—2019 年城市群网络结构韧性演化的特征差异、水平高低和形态类型。结果显示：长江经济带城市群功能网络联系呈现多样化特征；三大城市群具有一定的韧性能力，但总体与局部网络韧性演化水平具有异质性；形态模式呈现出“多中心”和“单中心”并存特征。因此，应扩大城市功能异质性，增强城市群网络节点韧性；畅通要素流通渠道，提升城市群网络连接韧性；优化空间组织形态布局，强化城市群网络子群韧性。

【关键词】 长江经济带 城市群 网络结构韧性 流空间

【中图分类号】 F790.3120 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1004-518X (2022) 08-0053-10

一、引言与文献综述

近年来，全球经济危机、极端天气事件、新冠肺炎疫情、局部地缘冲突等急性冲击不断考验着城市应急管理和风险防范能力；同时，空气污染、交通拥堵、住房紧张、生态破坏等“城市病”通过慢性积累效应、累计放大效应和自组织效应揭露了城市的脆弱性与敏感性。2021 年全国两会审议通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划纲要》明确提出，“要建设韧性城市”，城市韧性问题被社会各界广泛关注。长江经济带横跨我国东中西三大经济地带，分布着三大国家级城市群，是生态优先绿色发展的主战场、畅通国内国际双循环的主动脉、引领经济高质量发展的主力军，长江经济带发展关系到国家发展全局。城市群是城市人口与产业集聚地，也是区域问题频发地、灾害和风险交汇地。面对外界干扰，区域系统如何保持原有结构、基本特征和关键环节功能成为区域韧性研究的关键。^{[1][2]} 在新发展阶段、新发展理念与新发展格局的时代背景下，研究长江经济带城市群网络结构韧性的演化对解决城市安全问题、建设韧性城市、提高城市治理水平具有现实意义，也对推动区域协调发展与高质量发展、促进人类可持续发展、实现共同富裕具有战略意义。

国内外诸多学者分别围绕城市群网络结构与区域韧性开展了丰富的理论研究及量化分析。一方面，随着经济全球化和信息时代的到来，城市之间联系方式更为复杂多样，学者们尝试运用社会网络分析、复杂网络分析等不同测度方法^{[3][4]}，互锁模型、链锁网络模型、引力模型等不同计量模型^[5,6,7]，从经济、交通、信息、生态等不同角度^[8,9,10,11]构建出复杂的城市群网络系统。另一方面，学者们就如何提升区域韧性和如何分维度测量韧性的问题对区域韧性分别进行了定性与定量研究。具体来说，主要选择发达国家及地区、灾害易发区和韧性城市试点区作为研究区域范围^[12]，也有部分学者将区域韧性的研究层次细分到社区韧性^[13]，然后将区域韧性分解为基础设施、经济、社会、制度、生态、组织等维度^[14]，再运用熵值法、层次分析法、突变级数模型、恢复

¹**作者简介：**冯怡，南昌大学 经济管理学院博士生。（江西 南昌 330031）
彭迪云，南昌大学 经济管理学院教授、博士生导师。（江西 南昌 330031）
周美楠，南昌大学 经济管理学院硕士生。（江西 南昌 330031）

基金项目：教育部人文社会科学重点研究基地重大项目“基于整体性治理的中部地区一体化研究”（16JJD790022）；国家自然科学基金项目“区域一体化背景下资本+技术融合驱动产业转移、结构升级并引领经济高质量发展研究”（72163021）；江西省高校人文社会科学研究重点项目“从地理中部到政策中部——促进中部地区崛起的区域政策研究”（JJ0618）

力指数法等方法^[12]进行韧性的测量，最后对提升城市韧性提出政策建议。

综上，虽然学界对于城市网络与区域韧性的研究已取得丰硕的成果，然而关于城市群网络结构韧性的研究还处于初步探索阶段。针对已有文献的不足，本研究将长江经济带城市群作为考察对象，应用表征经济流、大数据流、交通流、知识流的动态流数据分析城市群内各项功能关联网，测度并比较 2014—2019 年网络结构韧性演化的特征差异、水平高低与形态类型，进而从韧性的视角出发，为优化长江经济带城市群功能结构与空间结构提供政策建议，以期为增强区域韧性提供参考，为新发展阶段促进区域融合协同创造条件。

二、研究区域、方法与数据

(一)研究区域

长江经济带自东向西分布着三大国家级城市群，即长江三角洲城市群（简称“长三角城市群”）、长江中游城市群、成渝城市群。根据国务院批复的《成渝城市群发展规划》《长江中游城市群发展规划》《长江三角洲城市群发展规划》和中共中央、国务院印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》，基于数据的可获得性，本研究中长江经济带城市群涵盖长三角城市群 27 市¹、长江中游城市群 31 市²和成渝城市群 16 市³，共包括长江经济带 9 省(市)74 个地级及以上城市，所涉数据为各市的全域指标值，与规划区域并不完全一致。

(二)研究方法

1. 城市群功能网络构建

城市群网络化强调从中心性到节点性的转变^[15]和“流”的特征^[16]，节点城市在城市群网络中扮演着功能性角色并且处于连接各要素流动与配置的重要位置。介于城市间的联系本质上是城市间功能的联系，本研究采用金融联系网络、信息联系网络、交通联系网络、知识联系网络构建城市群功能网络（图 1），并且分别指向城市经济、社会、工程、创新的职能。此外，将归一化后的金融、信息、交通和知识联系网络赋予同一权重后加权求得。^[17]

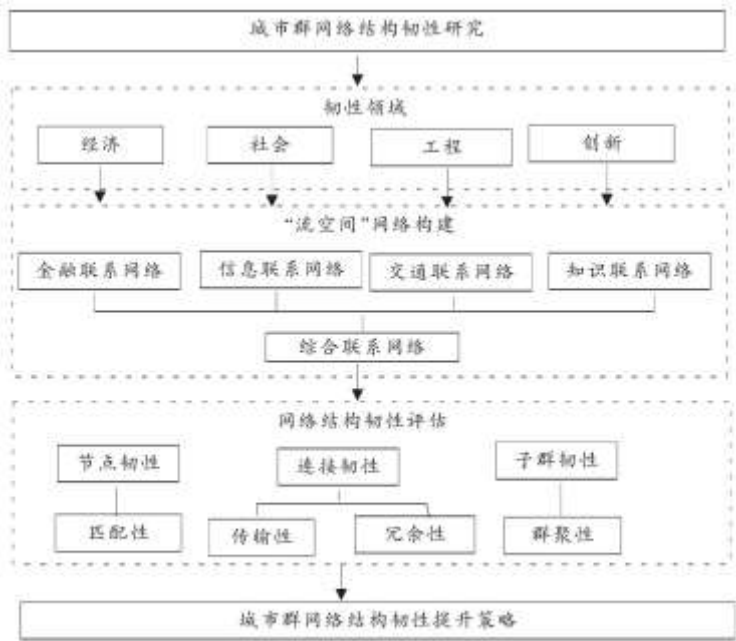


图 1 城市群网络结构韧性研究框架

2. 城市群网络相关性检验

采用二次指派程序 (QAP, Quadratic Assignment Procedure) 来进行相关性检验。即通过比较得出 2 个方阵中各值的相似性, 并计算出两个矩阵间的相关系数, 对系数进行非参数检验。QAP 方法属于一种随机化检验方法, 解决了其他标准的统计程序只能对相互独立的数值进行参数估计与统计检验的缺陷, 该方法能够对矩阵中不相互独立的数值进行参数估计与统计检验, 从而避免一般标准模型容易产生的多重共线性问题。^[18]

3. 城市群网络结构韧性评价模型

根据网络结构的组成要素, 可以将网络结构韧性划分为节点韧性、连接韧性与子群韧性。综合网络结构韧性的相关研究^{[19][20]}, 本文将匹配性、传输性、冗余性、群聚性归纳为城市群网络结构韧性的影响因素 (表 1)。

表 1 网络结构韧性评价指标

结构韧性	韧性指标	具体变量	指标内涵与空间意义	变量属性
节点韧性	匹配性	度关联	内部节点功能的同配性与异配性	负向
连接韧性	传输性	平均路径长度	内部及其与周边联系的通达度和传输效率	负向
	冗余性	平均独立路径数量	空间要素的备份, 确保受干扰后主要功能不受影响	正向
子群韧性	群聚性	平均聚类系数	空间组织结构的密集程度	正向

匹配性一度关联。匹配性代表了城市群网络中节点城市功能的相关性与多样性, 通常用度关联进行分析。度关联 (degree correlation) 测度的是度值相近的节点城市是否倾向于相互连接, 若节点城市选择度值相近的城市抱团发展, 则城市群网络具有同配性 (度关联指数为正数); 反之, 则具有异配性 (度关联指数为负数)。同配程度越高, 可能会因为其联系的固化与结构的封闭而降低创新活动的渗透性, 面对外界干扰时不利于适应性与转换能力的发展; 异配程度越高, 越能反映其异质性、灵活性、多样性与开放性, 其韧性能力越强。

首先, 计算与节点城市 i 直接连接的所有相邻节点城市 j 的度平均值:

$$\overline{W}_i = \frac{1}{W_j} \sum_{i \neq j \in G} W_i \quad (1)$$

然后, 对 W_i 与 $\overline{W}$ 的线性关系进行曲线估计:

$$\overline{W}_i = B + \beta W_i \quad (2)$$

式中： W_i 为城市 i 的度， W_j 为城市 i 的邻居节点 j 的度， $\overline{W}_i$ 为城市 i 的邻居节点 j 的度平均值， G 为城市所有邻居节点的集合； B 是常数； β 是度关联系数。若 $\beta > 0$ ，网络具有同配性；反之，网络具有异配性。

传输性—平均路径长度。传输性的强弱主要与最短路径长度有关，最短路径长度越短，意味着网络中要素的流动性越强，实现要素交换的效率越高，有利于城市群的协调与合作，以协同应对外界的冲击，增强抵御能力。平均路径长度 (average path length) 是通过计算所有城市间最短路径长度的平均值来测算网络的传输效率，其公式为：

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

式中： L 为城市群网络平均最短路径长度； d_{ij} 为城市 i 到城市 j 的所有最短路径长度； N 是网络中所有节点城市的数目之和。

冗余性—平均独立路径数量。冗余性描绘的是网络传输路径的容错能力，即网络中存在多种传输路径，确保受干扰后主要功能不受影响。平均独立路径数量 (average number of independent passageways) 是所有节点城市间存在的独立于常用路径之外的其他支路的数量的平均值，用于衡量城市群的冗余性，其值越大，表示冗余性越好，城市群的韧性就越高，其公式为：

$$V = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} n_{ij} \quad (4)$$

式中： V 为城市群平均独立路径数量； n_{ij} 为节点城市 i 与节点城市 j 之间的独立路径数量； N 是网络中所有节点城市的数目之和。

群聚性—平均聚类系数。群聚性刻画的是城市群网络的密集程度，群居程度越高表明网络越密集、城市群的联系越紧密，反之则越稀疏。城市群整体聚集程度较高，有利于小集团成员间信任氛围的产生和机会主义的减少，有助于提升面对危机时协调合作与共同应对的能力。平均聚类系数 (average clustering coefficient) 是通过计算所有单个节点城市聚类系数的平均值来测量城市群的整体群聚程度，公式为：

$$\overline{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2e_i}{W_i(W_i-1)} \quad (5)$$

式中， $\overline{C}$ 为城市群网络的平均聚类系数； W_i 为节点城市 i 的度； e_i 为节点城市 i 的邻居城市间实际产生的边数； N 为网络中城市节点的总个数。

城市群网络结构韧性水平判定。通过对网络结构韧性的韧性指标赋予同一权重后加和，综合测度各城市群的韧性水平，并横向比较各网络韧性水平的差异。

(三)数据来源

本文所需的数据主要为 2014 年和 2019 年的银行网点的分布、百度搜索指数、交通客运量和货运量、论文合作信息，分别来源于百度搜索指数网站 (<http://index.baidu.com/>)、中国银行保险监督管理委员会官网 (<http://xkz.cbirc.gov.cn/>)、《中国城市统计年鉴》、盛名列车时刻表以及 WOS 科研数据库平台 (<http://www.webofscience.com/>)。

三、长江经济带城市群网络结构韧性演化的实证分析

(一)城市群多重功能网络演化特征

首先，城市群多重功能网络的空间布局。通过对 2014—2019 年长江经济带城市群功能网络中心性与联系等级空间分布图 4 进行分析可知：在时间异质性方面，相较于 2014 年，2019 年长江经济带城市群多重功能网络的联系强度有了明显提升，而中心性没有发生显著变化；在空间异质性方面，长江经济带城市群功能网络联系强度呈现出长三角城市群>成渝城市群>长江中游城市群的特征，同时长三角城市群的中心性等级明显高于长江中游城市群和成渝城市群。长三角城市群内部，城市之间的联系紧密，形成了以上海市、杭州市、苏州市、南京市、合肥市等城市为度中心和中介中心 5 的多中心城市群，分布图呈以上海为中心的放射状；长江中游城市群内部，武汉市、长沙市和南昌市的中心性与联系等级远高于其他城市，分布图呈“三足鼎立”态势；成渝城市群内部，重庆市和成都市在中心性与联系等级上占据着明显的优势，分布图呈“哑铃”状。

其次，多重功能网络的相关性分析。通过 QAP 相关性分析（表 2）可以发现，金融网络、信息网络、交通网络、知识网络的相关性系数多数大于 0.3 ($P<0.01$)，且 2019 年较 2014 年数值普遍更高，表明长江经济带多重功能网络具有较强的相关性并且其相关度越来越显著。从整体上看，长江经济带多重功能网络相关性最强的是 2014 年和 2019 年成渝城市群金融网络与信息网络 (0.758, 0.788)，相关性最弱的是 2014 年和 2019 年长江中游城市群金融网络与交通网络 (0.202, 0.32)。从各城市群来看，长三角城市群和长江中游城市群均是知识网络与信息网络的相关性系数最高，金融网络与交通网络的相关性系数最低；成渝城市群金融网络与信息网络的相关性系数最高，交通网络与知识网络相关性系数最低。由此可见，虽然长江经济带城市群多重功能网络的相关性在水平上与趋势上具有相似性，但城市群群际与群内存在较大的差异性，势必会对城市群网络结构韧性演化的差异产生影响，因此需要进一步探究。

表 2 2014—2019 年长江经济带城市群多重功能网络相关性系数

城市群及其功能网络		金融网络		信息网络		交通网络		知识网络	
		2014 年	2019 年	2014 年	2019 年	2014 年	2019 年	2014 年	2019 年
长三角城市群	金融网络	—		0.476***	0.508***	0.317***	0.375***	0.37***	0.512***
	信息网络	0.476***	0.508***	—		0.565***	0.545***	0.659***	0.751***
	交通网络	0.317***	0.375***	0.565***	0.545***	—		0.528***	0.584***
	知识网络	0.37***	0.512***	0.659***	0.751***	0.528***	0.584***	—	
长江中游城市群	金融网络	—		0.376***	0.448***	0.202**	0.32***	0.469***	0.567***
	信息网络	0.376***	0.448***	—		0.414***	0.48***	0.683***	0.694***

	交通网络	0.202**	0.32***	0.414***	0.48***	—		0.488***	0.451***
	知识网络	0.469***	0.567***	0.683***	0.694***	0.488***	0.451***	—	
成渝城市群	金融网络	—		0.758**	0.788***	0.539***	0.568***	0.539**	0.626***
	信息网络	0.758**	0.788***	—		0.522***	0.48***	0.745***	0.701***
	交通网络	0.539***	0.568***	0.522***	0.48***	—		0.259***	0.355**
	知识网络	0.539**	0.626***	0.745***	0.701***	0.259***	0.355**	—	

注：***、**分别表示通过 0.01、0.05 的显著性水平检验。

(二)城市群网络结构韧性演化特征

匹配性。整体来看，长江经济带城市群多重功能网络中，2014 年长三角城市群交通网络的度关联指数为正 ($\beta > 0$)，其余网络的度关联指数均为负数 ($\beta < 0$)，表明除了 2014 年长三角交通网络具有同配性，其他网络结构均具有异配性特征。从群际的差异上分析，长三角城市群的网路度关联指数普遍低于长江中游城市群与成渝城市群，表明长江中游城市群与成渝城市群的节点城市在与自身发展水平相当的城市保持良好互动的同时，也可以做到与中、小城市间的交流与合作，因而网络整体呈现更高的扁平化趋势，结构韧性也相对较高。从城市群演变特征上看，城市群多重网络结构的异配性从 2014 年到 2019 年大多处于削弱的趋势，表明网络结构韧性不断弱化。从群内的演变特征来看，长三角城市群多重功能网络的异配性特征由 2014 年的知识网络>信息网络>金融网络>交通网络演变为 2019 年的信息网络>知识网络>金融网络>交通网络，表明知识网络、信息网络的路径连接形式比金融网络与交通网络更为多元化，网络结构更为开放。具体而言，2014 年的交通网络存在较为突出的同质“抱团”现象，核心节点的寡头结构与外围结构间的桥接能力较弱，到 2019 年其结构转变为异质性，网络结构韧性逐渐提高。2014—2019 年长江中游城市群多重功能网络的异配性特征的排序没有发生变化，但交通网络的异质性特征削弱得最为明显，不利于创新活动要素的渗入和整体网络结构韧性的提升。成渝城市群多重功能网络的异配性特征从 2014 年的信息网络>知识网络>金融网络>交通网络演变为 2019 年的知识网络>金融网络>信息网络>交通网络，其中信息网络结构韧性的降幅最为明显。

传输性。整体上看，长江经济带城市群多重功能网络的平均路径长度范围由 2014 年的 1.462~2.424 缩小为 2019 年的 1.453~2.293，流的传递在节点城市中不超过 3 个节点，网络传输效率整体较高。从多重功能网络上，长江经济带城市群金融网络的路径最短，流传递的成本最小，其在区域的可达性与扩散性最强。路径最长的网络在城市群中有所区别，其中，长三角城市群和成渝城市群交通网络的路径最长，长江中游城市群信息网络的路径最长，其要素流通、信息交流与技术合作的传输效率均不如金融网络。从城市群间的差异上看，长江中游城市群网络的传输效率要低于长三角城市群与成渝城市群，不利于城市群的互补联系与互动交流。通过前文对城市群网络的空间布局可以看出其主要原因，长江中游城市群的城市层级性不如长三角城市群显著，群内联系等级较长三角城市群和成渝城市群低，中心城市武汉、长沙、南昌不如长三角上海、南京、杭州、苏州和成渝城市群成都、重庆的联系紧密，并且辐射能力较弱，网络化状态还未显现。

冗余性。整体来看，长江经济带城市群网络结构的平均独立路径数量排序为：长三角城市群>成渝城市群>长江中游城市群，表明长三角城市群传输路径的容错能力最强，其受干扰后功能正常运转的稳定性最高。从功能网络的角度分析，长三角城市群金融网络平均独立路径数量(9.721, 9.963)和信息网络的平均独立路径数量(4.311, 5.444)远大于交通网络与知识网络，也远大于

长江中游城市群与成渝城市群的金融网络和信息网络，说明长江中游城市群和成渝城市群的金融网络与信息网络相较于长三角城市群十分脆弱，交通网络与知识网络的冗余性具有较大的提升空间。从演化特征上分析，2014—2019 年长江经济带城市群网络的备用路径逐渐增多，路径多样性不断提升，有利于网络韧性的加强。

群聚性。整体上看，长江经济带平均聚类系数的数值在网络维度与城市群层面存在较大差异性。具体来看，长三角城市群金融网络、信息网络和知识网络，长江中游城市群金融网络，成渝城市群金融网络的平均聚类系数均大于 0.8，表明其网络的聚类效应较显著，孤立节点较少。从演变特征上看，长三角城市群与成渝城市群群聚性的演化特征具有相似性，2014—2019 年均均是金融网络>信息网络>知识网络>交通网络，长江中游城市群由 2014 年的金融网络>交通网络>信息网络>知识网络演变为 2019 年的金融网络>知识网络>信息网络>交通网络，其中知识网络变化得最为明显，由 2014 年的 0.362 提升为 2019 年的 0.744。城市群网络聚集程度的提高有利于小集团成员间信任氛围的产生和机会主义的减少，在面对危机时，更利于集中力量，共同应对挑战与风险。

(三)城市群网络结构韧性演化水平

从图 2 可以看出，2014—2019 年长江经济带城市群网络结构韧性水平整体有所提升，但长三角城市群网络结构韧性水平一直显著高于长江中游城市群与成渝城市群。具体来看，2014—2019 年长三角城市群金融网络的韧性水平最高(2.915, 2.975)，交通网络结构韧性水平一直较低(1.064, 1.119)，知识网络结构韧性水平上升幅度较大(0.977, 1.628)。长江中游城市群和成渝城市群多重功能网络结构韧性的差距较小，处于相互追赶的趋势，成渝城市群综合网络结构韧性略大于长江中游城市群。其中，2014—2019 年成渝城市群网络结构韧性水平的排序为：金融网络>信息网络>交通网络>知识网络，长江中游城市群网络结构韧性水平的排序为：信息网络>金融网络>知识网络>交通网络。由此可见，长江经济带城市群金融网络与信息网络的韧性水平高于知识网络与交通网络。

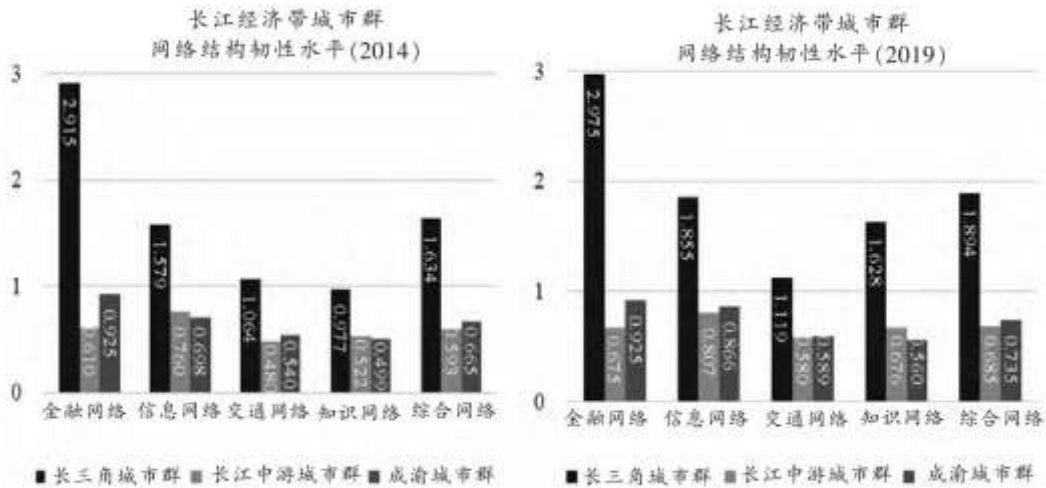


图 2 2014—2019 年长江经济带城市群网络结构韧性演化水平

(四)城市群网络结构韧性形态类型

长三角城市群整体网络密度、联系强度、网络发育程度较高，呈现出沪宁合杭甬发展带和以上海为核心且苏州、杭州、南京、合肥为多中心网络化形态特征。2014—2019 年网络结构联结趋于紧密，核心区的辐射范围逐渐向四周扩张，以无锡、南通、镇江、常州、温州、宁波、嘉兴、绍兴为节点城市的次核心群组形成苏锡常都市圈和宁波都市圈的主要城市，但合肥未对网络边缘

节点城市形成有效辐射，造成合肥都市圈的核心区与边缘区相对割裂。因此，长三角城市群整体的形态模式可归纳为“多核心—次核心群组—边缘城市”。

长江中游城市群自上而下的等级明确的中心地理论模式十分明显，整体形成了以武汉、长沙、南昌为核心的城市群星型结构，其中南昌与武汉和长沙在交通网络中的联系断裂。城市群内武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群的单中心格局较为明显，呈现出垂直型中心地分布模式。具体来说，2014—2019 年武汉都市圈逐渐形成了宜昌、荆州、襄阳、黄冈的次核心城市，呈现出“单一核心—次核心城市—边缘城市”的形态特征；环长株潭城市群也形成了以岳阳、益阳、湘潭、株洲为主的次核心城市，但其次核心的规模、范围与数量小于武汉城市圈；环鄱阳湖城市群除信息网络外，其他网络存在网络构建和韧性发展的空白，主要是“单一核心”的孤立结构模式。

成渝城市群内成都和重庆两大核心城市具有较强的联系，呈现以成都、重庆双核带多点的网络结构。2014—2019 年除了交通网络，其余网络逐渐形成了以绵阳、南充、泸州为节点城市的次核心群组，紧密连接成都与重庆，构成“双核心—次核心群组—边缘城市”的形态类型。交通网络的“双核双带”特征较为明显，北以绵阳、德阳、资阳、成都、眉山贯穿成都平原经济区，南以南充、广安、遂宁、重庆、内江、泸州连接川东北、川南经济区。

四、结论与政策建议

（一）研究结论

本研究基于“流空间”视角，运用流数据构建了金融联系网络、信息联系网络、交通联系网络、知识联系网络和综合联系网络，通过社会网络分析方法，从节点韧性、连接韧性与子群韧性三个维度对长江经济带三大城市群网络结构韧性演化的特征、水平与形态进行测度、描述和对比分析，得到三点结论。一是长江经济带城市群功能网络具有一定的韧性能力，且网络结构韧性演化特征具有多样性。二是长江经济带城市群网络结构韧性水平不断提升，但不同维度的韧性演化水平具有差异性。三是长江经济带城市群网络结构韧性的形态模式呈现出总体异质化与局部错位化的特征。长三角城市群整体网络密度、联系强度、网络发育程度较高，构成“多核心—次核心群组—边缘城市”的形态类型，呈现沪宁合杭甬发展带和以上海为核心且苏州、杭州、南京、合肥为多中心网络化形态特征；长江中游城市群整体形成了以武汉、长沙、南昌为核心的城市群星型结构，城市群内武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群的单中心格局较为明显，呈现出垂直型中心地分布模式；成渝城市群内成都—重庆两大核心城市具有较强的联系，呈现以成都、重庆双核带多点的网络结构，构成“双核心—次核心群组—边缘城市”的形态类型。

（二）政策建议

第一，扩大城市功能异质性，增强城市群网络节点韧性。首先，完善国家中心城市上海的金融、贸易、航运与创新功能，有序疏解一般制造等非大都市核心功能，以提升上海的综合经济实力与国际竞争力；其次，南京、杭州、苏州、无锡、常州、宁波、合肥等城市要加强同上海的联系，立足自身的文化魅力、城市品质、人才优势、经济特色，提升先进制造和现代服务等功能，构建具有全球影响力的城市群；再次，扩大武汉、长沙、南昌、成都、重庆等国家中心城市与区域中心城市的辐射能力，将劳动密集型和资本密集型产业有序转移到周边中小城市；最后，边缘城市基于资源禀赋比较优势，培育文化教育、生态旅游、康养医养等特色化功能，建设文旅融合的宜居城市。

第二，畅通要素流通渠道，提升城市群网络连接韧性。首先，统筹规建路、水、电、气、油、信息等基础设施，进一步完善工程网络与社会网络韧性建设。以基础设施互联互通为支撑，打通长江经济带内循环的渠道，实现人流、物流、资金流、信息流、知识流等要素的自由流通与高效配置，促进城市群的产业合作、资源互补、劳务对接、人才交流，在区域要素市场一体化中推进“国内大循环”。其次，以联合建立韧性建筑群落为保障，发展上中下游产业链集群化、服务业供应链系统化，以提升经济网络韧性。最后，以韧性城市研究中心与智库平台为依托，实现教育、文化、技术等优质“软资源”共享，通过增进知识与技术交流

提升创新网络韧性。

第三,优化空间组织形态布局,强化城市群网络子群韧性。首先,正确处理集中与分散的关系、紧凑与分散的关系,基于适度集中、适度紧凑、适度分散的原则,优化多中心网络的城市群空间格局。其次,合理分散布局楼栋、社区、街道、市区、城市群的安全救援通道、应急集中点与救援物资补给站,充分利用全域感知、物联网、云计算、人工智能、机器学习等技术手段,完善与跟进突发事件应急预案和防震减灾措施,做到事前预控决策,事中精准应对,事后高效救援,全面提高城市群应对风险的响应能力、应变能力、抗压能力、恢复能力。最后,处理好生态空间与生产、生活空间的关系,构建城市生物多样性保护区与生态走廊,实现人类与山水林田湖草冰沙的和谐共生。

参考文献:

[1]HEINZLEF,C.,ET AL.Operating Urban Resilience Strategies to Face Climate Change and Associated Risks:Some Advances From Theory to Application in Canada and France.Cities,2020,(104).

[2]SHOMON,S.Resilience Resistance:The Challenges and Implications of Urban Resilience Implementation.Cities,2020,(103).

[3]王圣云,宋雅宁,温湖炜,李晶.双向联系视域下长江经济带城市群网络结构——基于时间距离和社会网络分析方法[J].经济地理,2019,(2).

[4]张宇,曹卫东,梁双波,任亚文.中国春运城际出行网络结构特征与城市角色识别——基于多元交通客流的测度[J].地理研究,2021,(9).

[5]李艳,孙阳,姚士谋.基于财富中国500强企业的中国城市群城市网络联系分析[J].地理研究,2020,(7).

[6]熊瑶,黄丽.粤港澳大湾区城市网络的时空演化——基于企业组织关系视角[J].世界地理研究,2019,(5).

[7]劳昕,沈体雁,杨洋,张远.长江中游城市群经济联系测度研究基于引力模型的社会网络分析[J].城市发展研究,2016,(7).

[8]相雪梅.省内城市间经济关联结构研究——基于引力模型中 K_{ij} 的修正[J].技术经济,2020,(10).

[9]叶磊,段学军,欧向军.基于交通信息流的江苏省流空间网络结构研究[J].地理科学,2015,(10).

[10]虞洋,宋周莺,史坤博.基于百度指数的中国省域间信息联系网络格局及其动力机制[J].经济地理,2019,(9).

[11]刘晓阳,魏铭,曾坚,张森.闽三角城市群生态网络分析与构建[J].资源科学,2021,(2).

[12]孙亚南,尤晓彤.城市韧性的水平测度及其时空演化规律——以江苏省为例[J].南京社会科学,2021,(7).

[13]周利敏.韧性城市:风险治理及指标建构——兼论国际案例[J].北京行政学院学报,2016,(2).

[14]张明斗,冯晓青.中国城市韧性度综合评价[J].城市问题,2018,(10).

[15]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).

[16]TAYLOR P.J.Specification of the World City Network.Geographical Analysis,2001, (2).

[17]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, (6).

[18]谢永顺, 王成金, 韩增林, 刘书舟. 哈大城市带网络结构韧性演化研究[J]. 地理科学进展, 2020, (10).

[19]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, (6).

[20]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, (8).

注释:

1 长江三角洲区域范围包括上海市、江苏省、浙江省与安徽省组成的 3 省 1 市, 长江三角洲的核心区是指由上海、南京、苏州、无锡、常州、镇江、扬州、泰州、南通、杭州、宁波、湖州、嘉兴、绍兴、舟山、台州 16 个城市组成的区域。

2 长江中游城市群是以武汉、长沙、南昌为中心城市, 以武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体形成的特大型城市群。

3 成渝城市群规划范围涉及川、渝 1 省 1 市 16 个地级及以上城市, 包括四川省 12 个市的行政区全域及绵阳、达州、雅安 3 个市的部分区域, 重庆市的 27 个区(县)全域及开县(现开州区)和云阳县的部分地区。

4 限于篇幅, 没有列出 2014-2019 年长江经济带城市群功能网络中心性与联系等级空间分布图, 如有需要可向作者索取。

5 度中心性反映的是城市在城市群网络中“角色”的重要性与影响力, 其值越大表明城市调动该网络信息、知识、资金、人才等资源的能力越强。中介中心性反映的是城市在城市群网络中“位置”的关键性与控制能力, 中介中心性值大的城市一般是桥接城市或者门户城市。