

长江经济带都市圈公路网络韧性特征分异研究¹

化星琳^{1,2}、彭独^{1,2*}、张梦洁^{1,2}

(1. 华中科技大学建筑与城市规划学院, 湖北武汉 430074; 2. 湖北省城镇化工程技术研究中心, 湖北武汉 430074)

【摘要】: 都市圈交通网络是构建区域安全韧性发展格局的重要基石。以长江经济带中成都都市圈、武汉都市圈和南京都市圈为研究案例, 基于网络韧性评估框架, 以常态和突发攻击两种情景, 测度长江经济带典型都市圈公路网络韧性, 主要结论为: (1) 在常态情景下, 三都市圈的公路网络韧性的集聚性、传输性、层级性分异明显, 且网络的发育程度均有待提高。(2) 在突发情景下, 三都市圈在随机攻击和两种排序攻击下表现出明显的动态韧性分异, 并各具不同的优势, 成都都市圈综合表现相对最优, 面对介数排序攻击时具有明显优势; 南京都市圈综合表现位居其次, 在面对度值排序攻击时具有明显优势; 武汉都市圈综合表现居于最末, 只在面对随机攻击时具有明显优势。(3) 在突发情景下, 都市圈公路网络的鲁棒性和脆弱性呈现一定的相互拮抗作用, 在随机攻击下表现为鲁棒性强于脆弱性、在排序攻击下表现为脆弱性强于鲁棒性、且基于介数排序的攻击方式更易对网络造成结构性破坏。(4) 从网络拓扑结构的视角分析网络韧性分异机制, 并针对性提出都市圈公路网络韧性提升策略。

【关键词】: 公路网络; 韧性分异; 都市圈; 长江经济带; 复杂网络

【中图分类号】: TU982.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2023)10-2006-12

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202310002

随着新型城镇化的不断推进, 城市群、都市圈成为新型城镇化中的重要空间载体。通过网络 的联结实现了要素多向驱动与协同合作的发展模式(1,2)。交通作为跨区域社会经济联系中要素循环流动的物理通道, 是区域实体网络空间中最基本与重要的形式, 与城市乃至区域发展之间是一种相互牵拉的互动关系[3-5]。从现状看, 我国交通建设迅猛发展, 但区域交通网络仍存在时空可达性低、传输效率不高、路段衔接不畅等方面的韧性不足问题。十四五发展规划明确提出, 推动交通发展的质量和效率, 同时还要提升交通体系的综合韧性, 提高交通网络的安全水平。在韧性和安全的发展要求下, 有必要面向潜在的区域网络突发中断风险进行韧性评估并提出提升策略。

复杂网络是区域韧性的重要研究方法, 作用是刻画宏观层面的网络特征, 被广泛应用于国内外学者研究中。Reggiani(6)基于 Holling 1984 年的生态韧性理论, 提出了交通网络韧性的一般性框架, 并从弹性与脆弱性视角对交通运输安全提出了建议; Bruneau 等[7]构建了韧性测度模型, 通过灾害情景模拟的方式对社区生命线系统的韧性恢复力进行了测量, Wang(8)研究了伦敦和北京的街道网络形态, 并利用随机和蓄意攻击使道路中断来评估交通网络韧性。21 世纪初国内学者逐步开展对交通复杂网络的研究[9], 并主要从功能层面与实体层面展开, 一方面, 学者构建区域经济(10)、客运(11)、信息(12)、旅游流[13]等多样化的空间联系网络, 认知区域网络的空间特征(12,14,15); 另一方面, 学者关注实体基础设施网络, 从铁路(16,17)、航空、公路

¹ 收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-05-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3800103); 国家社会科学基金重点项目(21AZD048)

作者简介: 化星琳(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域规划与可持续发展. E-mail: hxl_hust@hust.edu.cn

● 通讯作者 E-mail: pengchong@hust.edu.cn

[18-20,28]等方面,利用中断模拟的方式对交通网络抵御风险的能力和特性进行推演。结合现有文献来看,交通网络韧性作为应对外部风险的功能特性,从以下两方面体现:一方面为鲁棒性(21-23),主要指网络的稳定性和弹性,表现为交通网络在遭受灾害或突发事件等扰动时,具备维持其基本功能的抵抗力,且在受破坏后能短时间内恢复正常运转;另一方面为脆弱性[17,4,29],表现为网络在受到目标攻击、节点失效、边断裂等因素时,会迅速崩溃并失去正常的功能和特性。

选取长江经济带范围内都市圈分析公路交通网络韧性特征,主要基于以下原因:首先,纵观既有研究,对区域的实体交通网络韧性测度较少(2.26-28),以公路网络这一重要交通网络为切入,为区域宏观尺度交通提供网络韧性特征的系统性认知。其次,对区域交通网络的韧性研究主要为常态化下的特征研究(2.15.6.29),在风险频发的背景下,流域各地区具有不同空间特征的都市圈应对突发风险有何优势,其韧性机制有何共性与差异性,这些问题均尚不明晰,从而无法提出针对性强的韧性提升策略。本文选取长江经济带的3个典型都市圈分属上、中、下游地区,研究常态与突发下的韧性特征,有利于通过地区间公路网络建设的空间链接,助推“以圈带群、以群托圈”的新发展格局,统筹共促长江流域的高质量发展。

1 理论与方法评估框架

1.1 复杂网络理论

复杂网络理论源自18世纪数学家 Euler 所创建的图论并成功解决哥尼斯堡七桥问题,而1959年后现代计算机科学家 Erdős 和 Rényi 进一步提出随机图理论,此后复杂网络理论作为刻画复杂系统的方法被广泛应用于生态学、社会学等学科。交通复杂网络实质是以 $G=(V,K)$ 构成的图论为基础将地理实际交通路网的拓扑关系转移结果,即交通网络 G 包含了所有由 V 顶点集合与 K 连边集合的拓扑关系对。

区域复杂交通网络分析的核心是交通拓扑网络的构建,网络的拓扑关系反映了交通实体网络的重要特性,例如拓扑结构、空间布局、连接方式等[8,2],进而构成交通网络的韧性系统。拓扑结构是指宏观上网络中所有节点连接的结构特征,反映了网络节点指标水平与网络演变规律;空间布局指网络中各节点和边的空间分布特征,反映了交通地理环境和城市空间形态;连接方式指网络中各节点和边之间的连接状态,反映了网络的组织形式与交通流动情况。因此,交通复杂网络是交通实体网络的复杂拓扑关系在地理空间上的映射结果。

1.2 韧性评估框架

基于复杂网络理论构建韧性评估框架(图1),(1)将道路实体网络转换为复杂网络模型,将地理空间数据在 ArcGIS 中进行拓扑关系的转译,获取路段之间的空间连接关系。(2)构建韧性指标体系,参考既有研究[2.13.19,24],分别从集聚性、传输性、层级性和连通性四个维度,同时考虑在都市圈这一宏观尺度下能有较为直观地对比交通网络韧性差异,选取相应的网络韧性指标。(3)探析常态与突发情景下都市圈韧性特征,在常态情景下通过节点的网络指标测算结果的空间映射,分析都市圈交通网络的空间布局、连接状况等特征分异。(4)在突发情景下,设置不同攻击次序导致道路中断的干扰方式,分析都市圈交通网络的动态韧性的特征分异,讨论韧性机制。最后根据韧性分异特征制定相关策略。



图 1 都市圈交通网络韧性评估研究框架

1.3 研究方法

1.3.1 网络分析

通过复杂网络分析工具对交通网络的韧性指标进行测算，并对网络的节点中心性格局进行可视化表达，主要选取以下指标：
 (1)聚集性——网络密度、网络聚集系数网络密度表示 N 个节点之间联系程度的集合，反映网络整体发育水平。在网络中， $N(N-1)/2$ 表示理论上最大可能的连边数， M 表示实际连边数量，网络密度 D 的计算公式为：

$$D = \frac{2M}{N(N-1)} \quad (1)$$

平均集聚系数表示网络中节点聚集程度的系数，集聚系数越高，表明高联系节点之间聚集倾向性高。网络聚集系数 C 的计算公式为：

$$C = \frac{2M}{k_i(k_i-1)} \quad (2)$$

式中： k_i 表示节点 i 的邻接节点数量。

(2)传输性——网络平均路径长度路径长度指两个节点之间最短路径的连边数量，平均路径长度为网络中所有节点路径距离的平均值。平均路径长度值越小，网络传输便捷性越高。平均路径长度 L 的计算公式为：

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i < j} d_{ij} \quad (3)$$

式中： d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的距离。

(3)层级性——度中心性、中介中心性

度中心性也被称为度值，度值越大则表明该节点与其他节点的联系越多。在对偶法构建的交通网络中，度值表征了一个

路段与相邻路段的连接紧密程度，连接数愈多，表明该路段道路等级 越高。度值的计算公式为：

$$C_i^d = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \quad (4)$$

式中： α_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的联系，一般用 1 表示两者之间有空间联系，0 表示两者之 间无联系。

中介中心性又称为介数，当节点位于其他节 点的多条最低路径上，则该节点具有较大的中介 中心性，代表了网络中某一 交通线路的枢纽地 位。介数的计算公式为：

$$C_i^b = \sum_{j \neq k \neq i} \frac{\varphi_{jk}(i)}{\varphi_{jk}}, \quad \forall j, k \in N \quad (5)$$

式中： $\varphi_{jk}(i)$ 为两点之间的最短路径数； φ_{jk} 为两点之间的最短路径总数。

(4)连通性——连通子图大小

连通子图描述为网络中存在连边的节点规 模，表征网络整体形态结构的连通状况[(21,2,28)], 又分为第一连通子图与第二连 通子图，前者为 网络中拥有最多节点的子图，后者为网络中断 后的分解的子图社团中节点总数第二的子图。随着节点在攻 击下陆续失效，第二大连通子图 大小不断增加，最大子图的状态发生骤然变 化，标志着网络进入迅速解离阶段，网络内部 节 点相继全面分崩离析。既有研究中将网络中 断模拟中第二连通子图的变化转折点定义为网络崩溃的阈值点，该值越高，网络韧 性水平越 好[21.22,28)。

1.3.2 中断模拟策略

本文通过相关参考文献[22,24,28],借鉴 中断模拟的计算机仿真方法，制定随机攻击和排 序攻击两种中断策略，分别对应现 实生活中的高 频、低损的广布型事件与低频、高损的突发型事 件对网络造成的影响，获取交通网络的韧性演化 过程，观测的 指标为网络连通子图大小。

(1)随机攻击

随机攻击也成为无排序攻击，在交通网络中 节点所面临的是概率相同、随机的无差别攻击， 反映的是常态不确定因素如 地震洪涝等高频、低 损的广布型事件下，节点“失效”对网络整体韧性 的影响。

(2)排序攻击

蓄意攻击也被称为排序攻击，选取度中心性 以及中介中心性反映路段在网络中重要地位的常 用指标，从指标的最大到最 小作为攻击次序，模 拟诸如路段封锁等低频、高损的突发型事件对网 络连通造成的影响。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域概况

长江经济带横跨我国长江上、中、下游3个地区，横跨高原和丘陵山地等多种地貌类型与亚热带等气候区，季风气候明显、自然灾害频发，同时长江经济带也是我国“两横三纵”城镇化格局的重要战略地区，区域的交通与经济联系十分重要。随着“黑天鹅”或“灰犀牛”事件屡屡对该区域的对外联系造成中断，例如2008年汶川地震造成成渝高速公路和南北交通干线等多条重要公路瘫痪、2022年中国的中部暴雨洪水造成武汉等地的大量道路封闭，这些事件都突显了长江地区公路交通的脆弱性和重要性，对于提升公路交通网络韧性具有迫切的现实需求。因此选取长江经济带作为研究区域，有利于提升该地区的公路交通网络韧性，同时有助于探索国内面向适灾性高质量发展的空间韧性理论与实践框架。

本文在长江经济带中选取武汉都市圈、成都都市圈、南京都市圈作为研究对象。根据2021年中国都市圈发展报告，成都都市圈与武汉都市圈属于发展型都市圈，南京都市圈属于成熟型都市圈，这3个都市圈分属西、中、东部地区，地域性特点明显、经济社会联系紧密、基础设施建设水平较高，交通网络具有一定的复杂性和多样性，且该3个都市圈规划均通过国家审批，具有示范意义。参考国家发改委通过的《南京都市圈发展规划》(发改规划[2021]174号)、《成都都市圈发展规划》(发改规划[2021]1661号)以及2018年武汉市总体规划中提出的《武汉都市圈规划》内容，得到3个都市圈的地理范围与分布如图2。



图2 长江经济带范围与研究都市圈位置分布图

2.2 数据来源与处理

公路具有联系城市、运输货物、连通地区、促进区域经济发展等职能，在城市交通体系中的地位不可替代。为了探讨都市圈交通网络空间韧性特征，本文依据公路道路建设等级，依次选取国道、省道、县道作为都市圈内部主要联系道路，这些道路连接了都市圈各行政中心城市与周边城镇，构成了区域交通路网骨架。基于全国地理信息资源目录服务系统(webmap.cn)平台，选择2020年作为主要现状公路，同时使用2017年公路数据进行了精度更高的进一步补充，这两个年份的数据结合有利于更完整地描述都市圈道路网络空间特征。

具体的，首先，选取对偶法[28,30]作为网络的拓扑表达建立公路网络模型，将道路交叉口视为网络节点，交叉口之间的路段视为节点的连边，构建点和边的拓扑关系。然后利用ArcGIS平台，去除都市圈内的孤路，进而通过空间连接得到都市圈公路网络拓扑关系，最终得到3个都市圈的公路网络概况如表1。基于韧性评估指标体系，借助社会网络分析工具Gephi和Python计算机仿真技术，对常态情景和随机攻击情境下的都市圈公路网络韧性进行测度。

表 1 武汉都市圈、成都都市圈、南京都市圈公路网络概况

指标	成都都市圈	武汉都市圈	南京都市圈
都市圈面积	44 539.25 km ²	27 760.27 km ²	36 421.67 km ²
节点数	19 869	14 034	16 701
连边数	43 030	31 337	37 600

3 常态情景下网络韧性分异

3.1 网络集聚性

以连接率即连边数和节点数之比来初步衡量网络的建设的发育水平，连接率从高到低依次为武汉都市圈(2.333)、南京都市圈(2.251)、成都都市圈(2.166),而进一步结合网络密度，分别为南京都市圈(0.523)、武汉都市圈(0.462)、成都都市圈(0.354)。表明南京都市圈和武汉都市圈的公路网络连接水平较好，南京都市圈公路线路密集、城市联系频繁；武汉都市圈连接水平整体较好，同时由于武汉作为中部地区交通枢纽，为推进都市圈对外联系提供了良好载体；成都都市圈整体连接水平表现稍弱，其公路交通建设仍在起步完善阶段。

利用平均聚集系数观测网络的空间紧凑性。三都市圈的聚集系数均低于 0.5,网络聚集程度不高。成都都市圈聚集系数最高(0.463),表明成都都市圈内联系紧密的节点间形成了簇群，但非紧密圈层的地区节点联系不足；南京都市圈(0.438)和武汉都市圈(0.431)位居其次、水平相当，表明这两个都市圈内部联系紧密的节点在区域中分布相对较为均衡、集聚性较弱。高聚集系数表示道路连接更紧密，信息和流量更容易在局部范围内传输和交换，从而保证网络韧性，长江地区上中下游的地势自西向东下降，上游地区地势高险，更适宜簇群式发展公路网络，进而簇群之间形成联系，中游与下游地区地势相对较为平坦，且水运发达，与公路体系分均抗衡，相比之下较另外两都市圈，公路韧性在成都都市圈内的地位更高。

3.2 网络传输性

平均路径长度反映网络的联系便捷性。三都市圈的平均路径长度排序依次为南京都市圈(63)、成都都市圈(61)、武汉都市圈(52)。平均路径长度表示都市圈中节点到达任意另一节点所经历的交通路段数量。武汉都市圈平均路径长度最小，公路传输在路段节点之间中转次数为 52 次，网络联系便捷度较高，有利于都市圈内应对突发灾害时能以较高的效率传送应急物资；成都都市圈与南京都市圈平均路径长度相对较大，物资扩散成本相对较高，当发生灾害或事故时，网络响应慢，网络韧性下降。

总体上看，3 个都市圈网络的发育各具典型特征。成都都市圈网络连接水平较弱且网络紧凑程度高，网络发育尚在成熟初期；武汉都市圈网络连接水平较好，网络分布均衡，联系便捷性较高，发育较为成熟；南京都市圈网络连接水平和紧凑程度均相对较高，为 3 个都市圈中发育最好的都市圈。

3.3 网络层级性

从度值空间分布上看，3 个都市圈的公路网络呈现出典型的空间层级，且呈现出单中心向网络化发展的形态差异(图 3、图

4)。网络节点度值分布范围为 0~8,将度值 0~3 定义为低度值节点, 4~5 定义为中度值节点, 6~8 定义为高度值节点。成都都市圈地形多为山地和丘陵, 相比其他两个都市圈, 成都都市圈的高度值公路数量占比少、分布紧凑, 而低度值节点占比高、分布分散, 路网组织形式以“鱼骨状”为主, 以成都为中心向周边放射状延伸, 形成等级分明的主次连接关系。武汉都市圈地处江汉平原, 中度值节点占比为三都市圈中最高, 但由于都市圈内水系复杂, 除长江干流外还分布众多支流、湖泊, 使得高度值路段呈散点状、降低紧凑度, 中度值节点分布局部较为破碎, 整体路网组织为“方格网”型。南京都市圈其高度值路段较多, 为 3 个都市圈中高度值占比最高的都市圈, 由于三角洲地势较为连绵、平坦, 公路网络呈现出组团化趋势且组团间连接紧密, 呈“网络状”的空间形态, 但作为唯一跨省区域的都市圈, 北部省际毗邻地区的交通联系弱于南部省内交通联系。

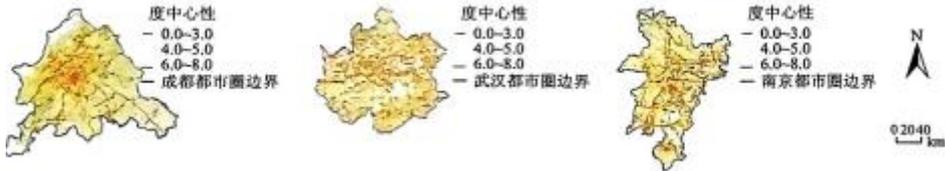


图 3 成都、武汉、南京都市圈公路网络度值空间分布图

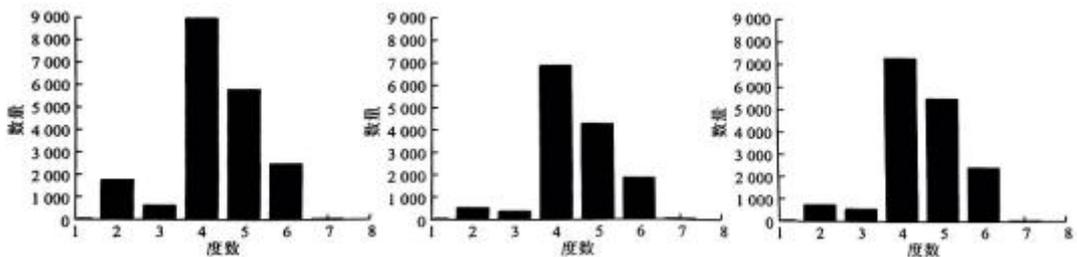


图 4 成都、武汉、南京都市圈公路网络度分布直方图

中介节点指某个路段在交通网络中具备较高的通过性与换乘性, 这类路段组成的交通道路视为区域交通廊道。结合 ArcGIS 中的自然断点和手动断点法进行分级, 共分为四级(图 5)。整体上 3 个都市圈均呈现金字塔规律, 即极少数重要道路在维持网络的稳定性中发挥着关键作用。具体的, 成都都市圈的高中介中心性道路组成较为完整的区域交通廊道形态, 均以成都为中心, 以成乐高速、北京-昆明高速、重庆-成都高速等为主, 向南北与东西向发射; 武汉都市圈的高中介中心性公路段较为破碎, 其中部分路段分布于跨江通道周边, 但相互之间不构成较为完整的干道形态, 表明武汉都市圈没有很好依托跨江与多湖的特点构建起重要的交通运输体系; 南京都市圈的高中介中心性道路贯穿南京城区, 并以南京-芜湖高速、长春-深圳高速、南京绕城高速等向南北方向延伸, 但在南部多湖地区与东部丘陵地区存在一定阻断。武汉都市圈与南京都市圈的区域交通廊道完整性均受到山水格局影响, 降低了连贯性, 交通网络韧性下降。



图 5 成都、武汉、南京都市圈公路网络中介中心性空间分布图

4 突发情景下网络韧性分异

4.1 随机攻击下的连通性变化

随机攻击情景下 3 个都市圈的交通网络韧性水平差异较小(图 4a1~c1)。从网络崩溃的阈值点上看,三都市圈的阈值大小由高到低排名分别为武汉都市圈(36%)、成都都市圈(34%)、南京都市圈(32%),表明三都市圈在面对随机攻击时,武汉都市圈表现出的韧性最优,成都都市圈次之居第二,南京都市圈居第三。就武汉都市圈而言,连通子图的大小变化在 0~0.35 之间下降速率稳定,曲线较为平滑,阈值点后发生突降,表明方格路网在整个过程中吸收扰动能力较占优势。对于成都都市圈而言,在 0~0.23 的区间中指标下降速度缓慢,与武汉都市圈相当,随后下降速率增快,在 0.34 处突变明显,表明单中心放射状路网在后期稳定性不足。对于南京都市圈,该指标在 0.26 与 0.32 处发生了两次明显波动,表明南京都市圈的网络状路网相比另外两都市圈,其存在明显薄弱环节,随机脆弱性更高。

4.2 排序攻击下的连通性变化

在排序攻击的情境下,3 个都市圈的动态韧性表现出明显的分异(图 6a2~c2),3 个都市圈的韧性演变速率存在梯度差距,同时网络首次崩溃与完全失效所经历的时长也差异较大。在基于度值排序攻击、基于介数排序攻击两种排序攻击下,三都市圈的网络阈值差距较大,也表明了 3 个都市圈的网络在不同情景下各具韧性特点。

(1)成都都市圈在介数排序攻击下最具优势,网络稳定性较强。随着从度值排序攻击转向介数排序攻击,成都都市圈的韧性阈值从 41%降至 21%。以随机攻击模式为基准,成都都市圈综合各个情景下的网络首次崩溃与网络完全失效的时长为所有都市圈中最长,并在介数攻击下体现出较好的韧性优势,为 3 个都市圈中唯一在介数排序攻击下稳定性最高的都市圈,网络首次面临崩溃的阈值点为 21%,远高于武汉都市圈 3%和南京都市圈 8%,并保持了平稳运转一段时间后骤降与网络瓦解(图 6a3)。

(2)南京都市圈在度值排序攻击下更具优势,网络韧性有待提升。从度值排序攻击转向介数排序攻击时,南京都市圈的韧性阈值从 42%降至 8%。在度值的排序攻击下,南京都市圈具备更好的韧性优势,网络性能较为稳定,持续运转时间长。而在介数攻击下,都市圈网络最大连通子图先是经历了剧烈变化,然后以一个较为缓慢的变化速率持续至网络的最终完全失效状态,尤其是失效过程中网络的第二连通子图的水平均保持高于另外两个都市圈(图 6c3)。

(3)武汉都市圈在两种攻击下网络变化剧烈,整体韧性不足。在度值排序与介数排序攻击下,武汉都市圈的韧性阈值分别为 25%与 3%,该阈值大小明显低于另外两个都市圈。在度值排序攻击下,武汉都市圈最大连通子图的大小骤降,导致网络较早地进入了解离状态,而在介数排序攻击下,最大连通子图大小在攻击伊始时便发生了现剧烈变化,网络第二连通子图也迅速达到了最大值,其余的网络子图在较短时间内相继解离。无论度值排序还是介数排序的情景下,武汉都市圈均表现出较弱的网络稳定性和较高的脆弱性(图 6b3)。

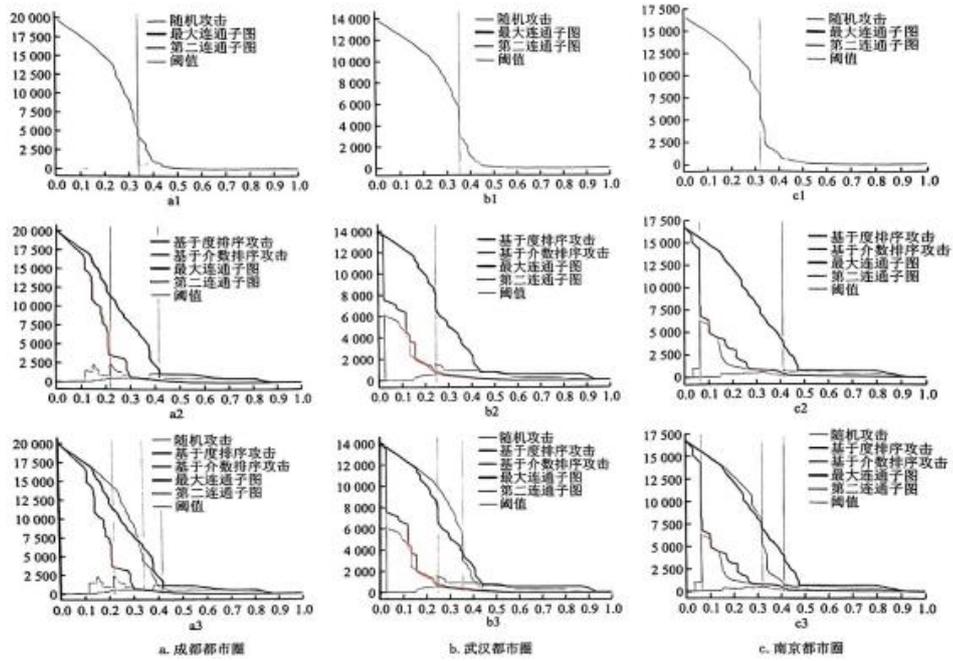


图6 中断模拟下都市圈公路网络连通子图变化曲线

5 网络韧性差异机制与提升策略探讨

5.1 韧性分异机制

随机攻击与排序攻击分别代表了都市圈网络中的“黑天鹅”与“灰犀牛”两种典型的交通突发事件中断风险，解析这两者之间的演变规律与韧性模式对风险防治具有重要意义。生态韧性理论认为系统是持续变化的过程，系统的韧性体现为系统在不改变自身结构前提下能吸收扰动的量级水平(31)。因此本文引入“吸引域”概念，“吸引域”指的是网络崩溃的阈值点横坐标范围内网络性能的变化曲线所围合的面积，“吸引域”面积越大，阈值点的范围愈大，网络性能下降速度越缓慢[16]。吸引域 A 随着随机攻击 $f(x)$ 和排序攻击 $g(x)$ 之间的韧性性能差异而发生大小变化，并呈现出一定的规律，总结为 4 种模式(图 7)，对研究都市圈在随机攻击与排序攻击下韧性演变模式进行总结对比，进一步观测网络韧性机制。

在基于度值排序的排序攻击下，成都都市圈与武汉都市圈均为 a 情况，表明该情况下鲁棒性较高，对应的脆弱性相对不明显；而南京都市圈为 b 情况，表明该情况下南京都市圈鲁棒性优势明显，甚至优于随机攻击，相对应的脆弱性较低；在基于介数排序的排序攻击下，成都都市圈为 c 情况，而武汉都市圈和南京都市圈为 d 情况，表明相比成都都市圈，武汉都市圈在基于介数排序攻击下表现出更强的脆弱性，鲁棒性较为不足。综合来看，都市圈公路交通网络的鲁棒性和脆弱性呈现一定的相互拮抗关系(表 2)。

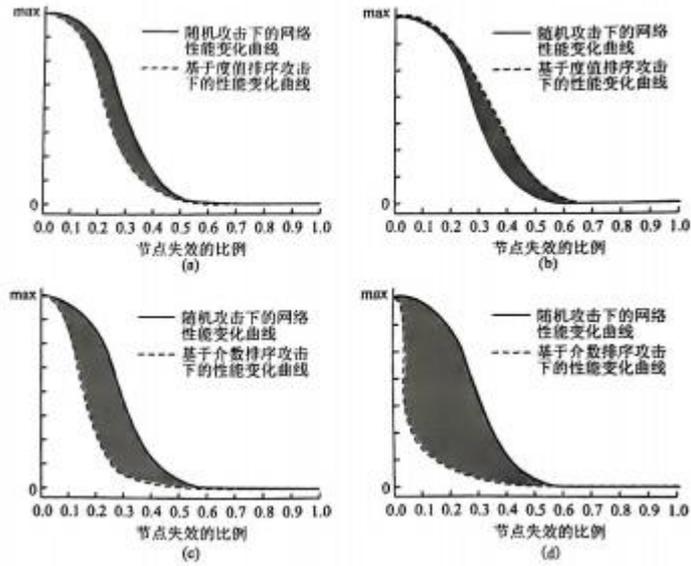


图 7 随机攻击与两种排序攻击对比下的公路网络性能及吸引域变化图

表 2 成都、武汉、南京都市圈公路网络动态韧性特征

攻击方式	特性	成都 都市圈	武汉 都市圈	南京 都市圈
随机攻击	鲁棒性 脆弱性	较高 较低	高 低	较高 较低
基于度值排序攻击	鲁棒性 脆弱性	较高 不明显	较高 不明显	高 低
基于介数排序攻击	鲁棒性 脆弱性	较高 较低	低 高	低 高

结合实际情况分析网络拓扑结构对网络韧性的分异机制(表 3)。首先,对于度中心性而言,中度值的道路提升了网络韧性的整体稳定性。南京都市圈其高度值路段占比较高,这些道路在道路中断时尤其是排序攻击下,提供了稳定性与冗余性,说明建设拓扑连接紧密的城市路网可作为韧性交通的主要方向,其目的是在空间上形成层次分明、有机组合的空间形态。其次,对于介中心性而言,高介数的重要道路是网络韧性的重要支撑。成都都市圈的高介数道路占比高于其他两个都市圈,区域公路廊道道路结构完整、整体性较好,对于整体网络韧性的维稳作用明显,在外界扰动时即使部分路段中断,区域对外联系廊道的整体性不形成结构性破坏。但对于武汉都市圈,其高度值和高介数重要道路在空间分配上不均衡,在网络中断中尤其是排序攻击中,易在短时间使区域通道遭到严重破坏;另一方面,次高介数网络在剩余网络中具有冗余性与弹性,在地理环境不足的情况下,武汉都市圈的次高介数道路在极高介数的道路失效后发挥了缓冲作用。此外,基于 3 个都市圈自然地形的网络常态韧性的影响对比,同时显示出复杂山水格局对区域网络连通造成阻碍,易使网络破碎。

5.2 韧性提升策略

在都市圈层面应对和防范一系列可能造成道路中断的系统风险时,公路交通网络的韧性提升策略可进一步从以下方面进行考虑:一方面是面对高频、低损的广布型事件,交通网络韧性主要发挥的作用为对外部风险持续的吸收力和适应力,在都市圈中,公路网络空间与拓扑结构上鲜明的层级性构成了网络良好运转的重要基础;另一方面是面对低频、高损的突发性事件,网络韧性的作用主要体现为抵抗力与恢复力,网络中层级性较高的具有结构完整、整体性较好的重要道路,在网络中

断中发挥了重要的维稳作用，并提供了十分有效的冗余性。

具体而言，根据长江经济带3个都市圈公路交通网络建设状况和网络韧性特征，提出以下差异化建议：

成都都市圈重点提高重要道路节点度值和空间连通性。成都都市圈位于长江上游山地地区，都市圈仍在发展与完善阶段，建议进一步完善公路集群，尤其是完善都市圈外围圈层的公路网络联系，协调推进都市圈整体的交通路网建设。在空间层面上，提高都市圈外围地区交通网络密度，以较为成熟的组团为基础，进一步建设区域交通廊道，促进单中心向多中心网络的提升发展，发挥交通网络的集聚性优势，提升交通网络的整体冗余度。

武汉都市圈重点提高路网空间组织与层级分布的有机性。武汉都市圈的公路网络韧性受到地理环境的明显约束，未来建议加强区域交通体系建设，增强交通路网空间结构的完整性。首先丰富路网空间组织形式，优化单一方格网道路布局，并在保护环境前提下通过打通断头路、地下隧道等方式疏通环湖、跨江等重要生态区的周边交通。其次提升辅助道路的数量，提升骨干路网的韧性，充分发挥高等级道路对于交通系统扰动的吸收量级。

南京都市圈重点提高不同层级道路之间的传递和疏导作用。南京都市圈交通网络较为成熟，部分地形区域韧性不足，建议在现有交通网络维护的基础上，提升南部湖区与东部山区等地区的公路连通水平；其次加强对高介数道路节点的保护，并进一步延伸区域交通廊道的空间结构，提升核心城市周边如副中心城市的交通网络规划建设，并加强区域交通协作，提升临界地区的交通联系，提升网络化布局下的适灾可靠性。

表 3 成都、武汉、南京都市圈公路网络度值与介数结构分布

都市圈		成都都市圈		武汉都市圈		南京都市圈	
主要指标	等级	数量	占比(%)	数量	占比(%)	数量	占比(%)
度值/度中心性	1-3	5726	6.7	4266	6.8	3211	4.3
	4-5	65029	75.6	46818	74.7	56952	75.7
	6~8	15305	17.8	11590	18.5	15037	20.0
介数/中介中心性	1000000~25000000	2967	4.7	29	0.1	1892	3.5
	4000000~10000000	3094	4.9	4698	9.7	2892	5.3
	800000-4000000	14838	23.7	8985	18.6	11595	21.3
	0~800000	41636	66.6	34644	71.6	37992	69.9

6 研究结论和讨论

6.1 主要结论

本文借助复杂网络理论对长江经济带3个典型都市圈进行公路网络韧性研究，采取对偶法构建交通网络的拓扑关系，并选取一系列相关网络指标，对都市圈公路网络韧性特征及机制进行分析，主要得到以下结论：

(1)在常态情景下，三都市圈的交通网络韧性的集聚性、传输性、层级性分异明显，交通网络的发育程度均有待提高。成都都市圈地形山地丘陵众多，公路网络处于成熟初期、联系便捷度稍弱，但重要道路组成的区域廊道形态完整，空体系层级分明；武汉都市圈地处江汉平原，公路网络发育较为成熟、便捷度较高，呈网格式布局，但受长江与众多湖泊水系影响，重要道路呈破碎式分布；南京都市圈公路网络的连接紧密、发育较为成熟，呈现多中心网络化趋势，但省际毗邻地区联系弱于省内，且局部地区重要道路受地形与水系阻断。

(2)在突发情景下，三都市圈各具不同的韧性优势。成都都市圈在随机、度值攻击和介数攻击3种情境下韧性阈值分别为

41%、34%、21%，其面对介数排序攻击优势大于面对随机攻击与度值排序攻击；武汉都市圈3种情景下韧性阈值分别为36%、25%、3%，其在面对随机攻击时优势大于面对度值与介数两种排序攻击；南京都市圈3种情景下韧性阈值为42%、32%、8%，其在面对度值排序攻击时优势明显大于面对随机攻击与介数排序攻击。综合来看，成都都市圈的交通网络韧性相对最优，其次为南京都市圈，最后为武汉都市圈。

(3)通过对比随机与排序攻击下交通网络的吸引域变化，进一步揭示交通网络动态韧性机制。总结韧性演变机制，可看出都市圈交通网络的鲁棒性和脆弱性呈现一定的相互拮抗作用。交通网络在随机攻击下表现为鲁棒性强于脆弱性，在排序攻击下则相反为脆弱性强于鲁棒性，且在排序攻击中，基于介数排序攻击对网络造成的破坏程度远大于基于度值排序攻击和随机攻击造成的破坏。

(4)从网络拓扑结构的视角分析了都市圈交通网络的韧性分异机制，并针对性提出都市圈公路网络韧性提升策略。首先高介数的重要道路是网络韧性的重要支撑，因此建议成都都市圈重点维护这些道路，并促进外围地区建设区域廊道，从而进一步加强区域整体韧性。其次高介数道路在网络中断中起重要缓冲作用，因此建议武汉都市圈优化路网组织、丰富交通空间层级，提升网络整体韧性。最后3个都市圈的自然地形环境对比显示出复杂山水格局会对区域网络连通造成阻碍，易使网络破碎，因此如南京都市圈与武汉都市圈需要加强山地、丘陵、环湖、跨江等地区的交通体系建设。

6.2 讨论

都市圈交通网络韧性是交通系统与社会自然经济系统的交互作用结果，公路交通只是都市圈交通体系的其中一部分，未来研究需要进一步探索如何构建更为系统的交通网络；研究针对交通这一实体网络的韧性评价指标缺乏一定特殊性考量，仍需进一步加强研究；同时，当前都市圈尺度的区域实体网络韧性研究尚处于起步阶段，在许多方面还有很多值得探索之处，例如如何在区域空间结构中应用计算机仿真模拟技术，构建综合交通网络与进一步的地理空间映射，从而更好揭示区域空间韧性特征。这对于国土空间规划背景下建设韧性高效的都市圈城市群有着重大意义，是该领域较具价值的前沿方向。

参考文献：

[1]符海月,王妍,张炜婷,等.中原城市群交通网络通达性演化及优化研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(3):557-567.

FU H Y, WANG Y, ZHANG Y T, et al. Research on accessibility evolution and optimization of traffic network in central Plains urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(3): 557-567.

[2]黄言,宗会明,杜瑜,等.交通网络建设与成渝城市群一体化发展——基于交通设施网络和需求网络的分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(10):2156-2166.

HUANG Y, ZONG H M, DU Y, et al. Transport network construction and integrated development of chengdu-chongqing urban agglomeration: A study based on transport infrastructure network and transport demand network [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(10): 2156-2166.

[3]王磊,翟博文.长江经济带交通基础设施对经济增长的影响[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):6-12.

WANG L, ZHANG B W. Influence of traffic infrastructures on regional economic growth in the Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(1): 6-12.

[4] 姚士谋, 管驰明, 房国坤. 高速公路建设与城镇发展的相互关系研究初探—以苏南地区高速路段为例[J]. 经济地理, 2001, 21(3): 300-305.

YAO S M, GUAN C M, FANG G K. A probe into the interaction between the express highway and the development of cities • In case of the part of south of Jiangsu Province [J]. Economic Geography, 2001, 21(3): 300-305.

[5] 刘承良, 余瑞林, 熊剑平, 等. 武汉都市圈路网空间通达性分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1488-1498.

LIU C L, YU R L, XIONG J P, et al. Spatial accessibility of road network in Wuhan metropolitan area [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1488-1498.

[6] REGGIANI A. Network resilience for transport security: Some methodological considerations [J]. Transport Policy, 2013, 28: 63-68.

[7] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI RT, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.

[8] WANG J. Resilience of self-organised and top-down planned cities: A case study on London and Beijing street networks [J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0141736.

[9] 莫辉辉, 王姣娥, 金凤君. 交通运输网络的复杂性研究[J]. 地理科学进展, 2008, 27(6): 112-120.

MO H H, WANG J E, JIN F J. Complexity perspectives on transportation network [J]. Progress in Geography, 2008, 27(6): 112-120.

[10] 王逸舟, 王海军, 张彬, 等. 基于多维要素流视域的城市群网络结构及影响因素分析—以武汉城市圈为例[J]. 经济地理, 2021, 41(6): 68-76.

WANG Y Z, WANG H J, ZHANG B, et al. Analysis on the network structure of urban agglomeration and its influencing factors based on the perspective of multi-dimensional feature (low: Taking Wuhan urban agglomeration as an example [J]. Economic Geography, 2021, 41(6): 68-76.

[11] 陈名, 陈洪全, 蒋海兵, 等. 长江三角洲地区铁路客运联系网络结构演变特征[J]. 经济地理, 2020, 40(12): 63~71.

CHEN M, CHEN H Q, JIANG H B, et al. Network evolution of passenger railway connection in Yangtze River [J]. Economic Geography, 2020, 40(12): 63-71.

[12] 彭那, 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 C, LIN Y Z, GU C L. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River [J]. Geographical Research, 2018, 37(6): 1193-1207.

[13] 方叶林, 苏雪晴, 黄震方, 等. 中国东部沿海五大城市群旅游流网络的结构特征及其韧性评估—基于演化韧性的视角[J].

经济地理, 2022, 42(2): 203-211.

FANG Y L, SU X Q, HUANG Z F, et al. Structural characteristics and resilience evaluation of tourism flow networks in five major urban agglomerations in coastal China: From the perspective of evolutionary resilience [J]. Economic Geography, 2022, 42(2) : 203-211.

[14] 程雪兰, 方叶林, 苏雪晴, 等.中国东部沿海 5 大城市群旅游流网络结构空间分布特征研究[J].地理科学进展, 2021, 40(6): 948-957.

CHENG X L, FANG Y L, SU X Q, et al. Spatial distribution characteristics of network structure of tourism flow in five major urban agglomerations of coastal China [J]. Progress in Geography, 2021, 40(6): 948-957.

[15] 侯兰功, 孙继平.复杂网络视角下的成渝城市群网络结构韧性演变[J].世界地理研究, 2022, 31(3): 561-571.

HOU L G, SUN J P. Evaluation of network structure resilience of Chengdu-Chongqing urban agglomeration from the perspective of complex networks [J]. World Regional Studies, 2022, 31 (3): 561-571.

[16] 邓良凯, 石亚灵, 张弘, 等.城市群城际铁路站点空间网络研究[J].城市发展研究, 2017, 24(8): 64-70, 99.

DENG L K, SHI Y L, ZHANG H, et al. Research on spatial network of intercity railway station in urban agglomeration [J]. Urban Development Studies, 2017, 24(8) : 64-70, 99.

[17] 张光远, 张帆, 刘泳博.成渝地区城际铁路网络特性与脆弱性分析[J].铁道运输与经济, 2021, 43(7): 36-42.

ZHANG G Y, ZHANG F, LIU Y B. Characteristics and vulnerabilities of intercity railway network in chengdu-chongqing region [J]. Railway Transport and Economy, 2021 , 43 (7) : 36-42.

[18] 刘庆法, 陈红, 周继彪, 等.基于复杂网络理论的高速公路网抗毁性研究[J].公路, 2014, 59(6): 214-219.

LHJ Q F, CHEN H, ZHOU J B, et al. Research on invulnerability of expressway network based on complex network theory [J]. Highway, 2014, 59(6): 214-219.

[19] 彭拼, 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.

PENG C, CHEN S Y, WANG B Q. Analyzing city network * s structural resilience under disruption scenarios: A case study of passenger transport network in the middle reaches of Yangtze River [J]. Economic Geography, 2019, 39(8) : 68-76.

[20] 俄晓峰, 谢军, 伍景琼.考虑不同侵扰场景的高速公路韧性评估方法[J].中国安全生产科学技术, 2019, 15(1) : 12-19.

JI X F, XIE J, WU J Q. Assessment method of expressway resilience considering different intrusion scenes [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1) ; 12—19.

[21] MASUCCI A P, MOLINERO C. Robustness and closeness centrality for self-organized and planned cities [J] . The European Physical Journal B, 2016, 89(2) : 53.

[22] 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, 137.

YAN W T, LU J L, LI Z H, et al. Implications of measuring resilience of urban street networks: Comparative study of five global cities [J]. Urban Planning International, 2021, 36(5): 1-12, 137.

[23] 刘志谦, 宋瑞, 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 194-200.

LIU Z Q, SONG R. Reliability analysis of Guangzhou rail transit with complex network theory [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5): 194-200.

[24] 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.

[25] 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.

REN J. Research on road network characteristics and resilience measurement of five new towns in Shanghai [J]. City Planning Review, 2022, 46(9) : 82-92.

[26] 李成兵, 魏磊, 李奉孝, 等. 基于攻击策略的城市群复合交通网络脆弱性研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(3): 101-109.

LI C B, WEI L, LI F X, et al. Study on vulnerability of city agglomeration compound traffic network based on attack strategy [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(3) : 101-109.

[27] 李成兵, 郝羽成, 王文颖. 城市群复合交通网络可靠性研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(3): 565-571, 580.

LI C B, HAO Y C, WANG W Y. Research on city agglomeration compound traffic reliability [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 565-571, 580.

[28] 黄勇, 魏猛, 万丹, 等. 西南山地多灾区域道路网络可靠性规律分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 526-535.

HUANG Y, WEI M, WAN D, et al. Analysis of reliability of road network in mountainous disaster-prone areas in southwest China [J]. Journal of Tongji University (Natural Science) 9 2020, 48(4): 526-535.

[29] 郭卫东, 钟业再, 冯兴华, 等. 长江中游城市群县域公路交通网络中心性及其影响因素[J]. 经济地理, 2019, 39(4): 34-42.

GUO W D, ZHONG Y X, FENG X H, et al. County-level highway network centrality of urban agglomerations and its influencing

factors in the middle reaches of the

[30] 邓亚娟, 物云峰, 马荣国. 基于复杂网络理论的公路网络结构特征[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 98-104.

DENG Y J, YANG Y F, MA R G. Highway network structure characteristics based on complex network theory [J] • China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1) : 98-104.

[31] ROLLING C S. Engineering Resilience versus Ecological Resilience[M] " Engineering Within Ecological Constraints. National Academies Press, 1996.