

长江中游城市群铁路流网络演化特征

——基于博弈交叠社区模型的分析¹

郑文升^{1, 3} 熊亚骏¹ 王晓芳^{*1, 2}

(1. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 中国湖北 武汉 430079;

2. 中国旅游研究院武汉分院, 中国湖北 武汉 430079;

3. 华中师范大学 湖北高质量发展研究院, 中国湖北 武汉 430079)

【摘要】：随着铁路交通的快速发展，其对区域空间格局的影响和塑造日益显著。文章以长江中游城市群为研究区域，使用2013—2019年铁路客运车次数据刻画区域铁路流网络，运用博弈交叠社区发现模型，从网络格局演化、交叠社区结构演化以及交叠空间演化方面对铁路流网络进行分析，同时分析了COVID-19疫情可能对铁路流网络造成的影响，主要结论如下：①长江中游城市群铁路客运经历了由普铁主导到高铁主导的转变，整体格局具有显著的空间异质性特征，铁路流网络关联形态表现出明显的层级特征与网络特性共存的现象，更多体现的是核心—外围的组合关系以及跨省域的网络空间关系。②使用基于博弈交叠社区模型进行空间交叠识别，2013年划分出4个社区，产生6个交叠城市，交叠社区城市在城市总数中占比为19%；2019年划分出6个社区，产生11个交叠城市，交叠社区城市在城市总数中占比为35%。③交叠空间从空间形态、区域位置以及城市功能等方面存在共性。在空间形态上，交叠空间呈团块状或条带状分布；从空间区位角度来看，交叠空间多位于省会城市周边，行政区域上多位于省间交界地带，独特的地理区位使得交叠城市多承担区域间交流互动；从城市功能视角来看，交叠城市依托铁路流通道，通过过渡与转换功能，表现为社区间网络联系桥梁。④COVID-19疫情可能对铁路流网络造成结构失衡、轴线中断、局部塌陷三方面影响。整体来看，对于长江中游城市群，可以尝试进一步优化和提升区域网络支撑能力，以更多的实际空间联系为依据，引导设施网络建设与共享；对于交叠空间，可以尝试进一步优化空间结构，实现由交叠空间组织向网络空间组织跨越，形成更高效互动的网络化发展格局。

【关键词】：长江中游城市群；铁路流网络；高速铁路；都市圈；交叠空间；交叠社区模型；新冠肺炎疫情

【中图分类号】：F530 **【文献标志码】**：A **【文章编号】**：1000 - 8462 (2022) 11 - 0009 - 10

¹ 收稿时间：2022 - 07 - 26；修回时间：2022 - 10 - 17

基金项目：国家自然科学基金项目（41971167）；华中师范大学基本科研业务费（CCNU22JC026、CCNU19TD002）

作者简介：郑文升（1982—），男，安徽六安人，教授，博士生导师，研究方向为城市群网络化、区域与国土空间规划。E-mail: zhengwensheng@ccnu.edu.cn

※通讯作者：王晓芳（1980—），女，河南许昌人，博士，副教授，研究方向为旅游流网络与交通可达性。E-mail: wangxiaofang@ccnu.edu.cn

现代通信技术的发展,对区域空间格局与空间组织产生影响显著^[1]。依托“交通流”,城市越来越多地参与到更大范围的要素流动,超越传统腹地限制,产生与非邻近城市紧密相连的功能网络^[2]。然而,社会经济活动的区位集聚特性需要嵌入在特定的场所空间^[3],城市作为社会经济活动的空间载体,各种要素流在城市间流动并联结在一起^[4],可能会表现出新的组织特征;而传统中心地理论认为,腹地与腹地会产生交叠性的空间,在城市一区域走向网络化发展背景下,也表现出新的变化。

铁路交通能够对区域发展和城市网络体系产生重要影响,特别是随着快捷、高效的高铁建设,铁路网络影响区域发展态势愈加深刻。从20世纪开始,国外学者就开始使用铁路数据展开对区域空间影响的研究^[5],从关注铁路开通前后对城市节点的发展影响^[6,7],到铁路沿线城市通道效应^[8,9],再到对区域空间结构变化^[10,11],部分学者认为铁路建设能够使得城市更紧密地结合在一起,导致区域经济资源再分配,影响区域空间格局^[12,13]。到20世纪末,“流空间”理论逐渐成为区域空间研究的“网络范式”,铁路流成为一种较为稳定的空间结构表达方式,被广泛应用在铁路流网络空间格局研究中,如冯长春等使用城际轨道交通流为基础,对珠三角城市区域的空间组织形式进行探讨,发现研究区域具有较高的功能多中心性^[14];进一步地,Yang等使用高铁客流来分析国家尺度的铁路流网络空间配置,认为东部和中部地区空间结构较优^[15];初楠臣等使用中国日高铁流量矩阵,研究中国高铁网络结构特征,发现京沪等串联的高铁大三角主骨架凸显^[16]。

伴随城市间资源要素跨区域流动速度加快,不同空间尺度下关联与互补的城市关系促使区域空间组织越来越复杂化。学者们早期关注点在铁路联系和交通经济带等方面^[17,18],随着交通效率改善以及高铁“普适化”的发展,区域空间优化动力逐渐转向网络组织能力提升^[19,20]。近年来,学者们相继注意到区域空间的产生与演化正日益受到内部城市的影响和塑造,不仅是遵循传统空间集聚与空间组织调控,更成为各城市相互博弈与共同作用的场所^[21,22]。韦伯也曾将这种城市活动形容为“充满了为追求不同目标而激烈竞争的利益集合”^[23]。目前,已有学者从主体博弈视角开展对区域空间的研究^[24],但已有研究主要侧重于区域治理阶段性演化过程的分析,基于博弈视角定量分析区域空间组织的研究则需要进一步丰富。

近些年,在信息网络以及生物科学等领域发展起一种能够有效分析复杂网络交叠问题的交叠社区发现算法^[25,26],成功应用于挖掘网络局部集聚以及子群交互作用。考虑到交叠社区发现算法可以在刻画网络局部集聚特性的同时实现交叠社区划分^[27],本文尝试将其引入到地理学的区域网络分析中。

长江中游城市群是中国首个获批复的国家级城市群。随着长江经济带发展战略的推进以及《长江中游城市群发展规划》《长江经济带发展规划纲要》等陆续出台,长江中游城市群作为长江经济带的重要组分,其科学发展关乎全国整体发展格局^[28]。与此同时,长江中游城市群交通网络密集,空间组织特征变化明显,具有较强典型性。鉴于此,本文以长江中游城市群为例,选取铁路客运车次数据变化相对较大的2013与2019年两个时间节点,从铁路客运车次表征的铁路流网络入手,使用博弈交叠社区发现模型,对长江中游城市群铁路流网络空间格局演化以及网络结构演化进行分析,同时分析COVID-19疫情可能对铁路流网络造成的影响,以期丰富区域铁路流网络交叠的空间演化特征研究,并为铁路客运规划与区域空间发展优化提供科学参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区域与数据来源

依据国务院2015年批复的《长江中游城市群发展规划》,长江中游城市群涵盖武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群、宜荆荆城市群等子城市群^[29],土地面积约32.61万km²,是一个经济、交通、人口活动密集的巨型区域(图略)。长江中游城市群是我国实施“中部崛起”战略的重要支点,具有承东启西、连南接北的区域战略作用。研究区涉及湖北、湖南、江西3省31个城市,经济发展上湖北与湖南综合经济实力差距不大,江西经济水平稍低;产业结构上湖北与江西二三产并重,并以传统制造业为主导,湖南则表现出相对较强的服务经济水平(表1)。

表 1 被划入长江中游城市群各省的社会发展基本情况

年份	排名	省份	GDP（亿元）	总人口（万人）	人均 GDP（万元）	三产占比（%）
2013	1	湖南	22608	6691	3.38	12.60、47.00、40.03
	2	湖北	21503	5799	3.71	12.60、49.30、38.10
	3	江西	12947	4522	2.86	11.40、53.50、35.10
2019	1	湖北	45828	5927	7.73	8.31、41.67、50.01
	2	湖南	39752	6918	5.75	9.17、37.60、53.23
	3	江西	24758	4666	5.31	8.54、46.62、44.84

在当前铁路实际客流量难以获取的情况下，学者们通常以铁路客运车次来表征铁路流^[30]。本文使用的 2013、2019 以及 2021 年铁路客运车次数据，均来源于极品时刻表的铁路列车时刻表（<http://www.jpskb.com/>）。由于本文研究尺度为地级市单元，因此将隶属于同一地级市的普速铁路站点与高速铁路站点分别进行合并、去重，同时筛选出至少有 2 个长江中游城市群城市的铁路客运车次。根据目前实施的《铁路安全条例》设计开行时速达 250 km/h 以上且初期运营时速达 200 km/h 的线路，高速铁路统计车次类型包括以 G、D、C 开头的高速列车与临时旅客列车（L 车次）、快速旅客列车（K 车次）、特快旅客列车（T 车次）、临时旅游列车（Y 车次）、直达特快列车（Z 车次）和市郊动车组（S 车次）以及其他通勤票车或路用列车。需要说明的是，本文以 2013 年为研究起点，原因在于有研究表明 2013 年标志着我国中部地区高铁网络初步形成^[31]，由于铁路网络成型对刻画铁路流网络至关重要，因此本文设定 2013 为演化分析起始点。由于 2020 年初爆发新冠肺炎疫情，长江中游城市群多处城市铁路客运网络遭遇不同程度的停运，对区域铁路客运网络冲击较大，此背景下的铁路客运数据不能真实反映区域发展基底信息，因此本文选取新冠肺炎疫情爆发前的 2019 年铁路客运数据，并结合 2013 年铁路客运数据组成时间区间进行演化分析。

1.2 研究方法 with 模型构建

1.2.1 基于博弈交叠社区模型

区域铁路网与铁路车次反映了国家意志与地方政府或市场的综合博弈。铁路网建设一方面是国家顶层规划、布局与统筹，另一方面也充分考虑区域城市发展需求，双方博弈体现在区域宏观格局上，也体现在城市间车次表征的空间组织上。区域内城市为了增加自身的竞争力，都在主动或者被动地融入到区域发展过程中。类似于经济学中理性人的概念，每个城市选择策略的原则，实质上是实现自身利益最大化的行为，即理性城市假设。基于理性城市假设以及区域网络中每个城市互联互通的背景，城市之间的关系抽象理解为竞争与合作的二值关系，城市之间竞争与合作的策略选择，可以视为区域协同发展的多城博弈，直至得到一个稳定的博弈结果，最终达到均衡，这种城市自组织的集聚状态视为社区结构。

模型竞争与合作的策略选择类似现实世界中，当某人加入某个社区时会获得一定的收益，总会从中获得好处，同样很多时候也要付出一定的收益以进入这个社区。因此可以很自然地想到为每个人设定一个效用函数，这个函数代表了他全部收益，包括“获得的”和“失去的”利益。这样我们就能为网络中的每个个体设置个收益函数以及一个损失函数。然后让个体在做决策的时候依照效用函数确定当前策略^[32]。

参考 Chen 等^[33]利用博弈论框架用于交叠社区检测的方法，定义交叠社区发现模型中损失函数为：

$$g_i(L) = (|L_i| - 1) \cdot c$$

式中： $g_i(L)$ 表示节点 i 在属于 L_i 社区数量下的损失函数； c 为社区边的倒数。

定义模型中增益函数为：

$$Q_i(L) = \frac{1}{2m} \sum_{j \in [n]} \left[A_{ij} \hat{\delta}(i, j) - \frac{d_i d_j}{2m} \cdot |L_i \cap L_j| \right]$$

式中： $Q_i(L)$ 表示节点 i 在策略 L 下的增益函数； m 表示社区内的边； j 为节点 i 的邻居节点； $\delta(i, j)$ 为克罗内克函数，当节点 i, j 在同一社区时，函数值为 1，反之为 0； A_{ij} 为节点 i, j 的邻接矩阵； d_i 表示节点 i 的度， $|L_i \cap L_j|$ 表示节点 i, j 拥有共同社区的数量。同时参考 Hong 等人研究成果^[34]，对模块度函数进行改进。

交叠社区识别可以理解城市在本地或网络中寻找最优发展。区域内城市选择的策略或是嵌入到其他区域，或是与本地城市强化联结发展。根据城市自身发展策略，城市可以选择与某个城市合作或者与多个城市共同合作，表现在铁路流网络中以社区集聚的形式呈现。不同于传统研究区域非此即彼的划分形式，城市可以参与到多个社区合作，以实现自身利益最大化，表现为区域交叠空间格局。

2 研究结果

2.1 长江中游城市群联系格局演化

长江中游城市群铁路网络经历了由普速铁路主导向高速铁路主导的转变。2013 年，长江中游城市群拥有铁路客运总车次数量 944 次，其中高速铁路数量为 335 次，高速铁路对铁路客运网络贡献率为 35.49%，在整体网络中处于从属地位。2013 年长江中游城市群高速铁路基本形成网络，然而对铁路客运整体提升程度较小且未形成大规模覆盖网络。到 2019 年，长江中游城市群拥有铁路客运总车次数量 2 330 次，其中高速铁路数量为 1 553 次，高速铁路对铁路客运网络贡献率为 66.65%，高速铁路在铁路总体客运网络中占据主导地位。长江中游城市群铁路客运网络具有显著的空间异质性，铁路流网络关联形态表现出明显的层级特征与网络特性共存的现象，更多体现的是核心—外围的组合关系以及跨省域的网络空间关系（图 1）。2013 年铁路客运车次主要集中在省域相对活跃的城市之间，如武汉—孝感、武汉—咸宁、宜昌—荆州、长沙—岳阳、长沙—株洲以及南昌—九江等，形成长江中游城市群城市关联的基本骨架，此时区域铁路流网络发育程度较低，省域中心城市联结省内其他城市带动区域发展。到 2019 年，长江中游城市群内铁路客运车次增多，主要体现在武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群以及宜荆荆城市群、大南昌都市圈等，如鄂东地区的黄冈—鄂州—黄石，鄂西地区的宜昌—荆州—荆门，赣东地区的抚州—鹰潭—上饶，赣西地区的宜春—新余—萍乡以及环长株潭城市群的长沙—湘潭—株洲等，构成长江中游城市群城市关联密集区域，此时区域网络程度得到较大程度改善，城市之间不限于本区域的竞争关系，而是在更大尺度上与其他城市尝试竞争或合作的博弈关系。

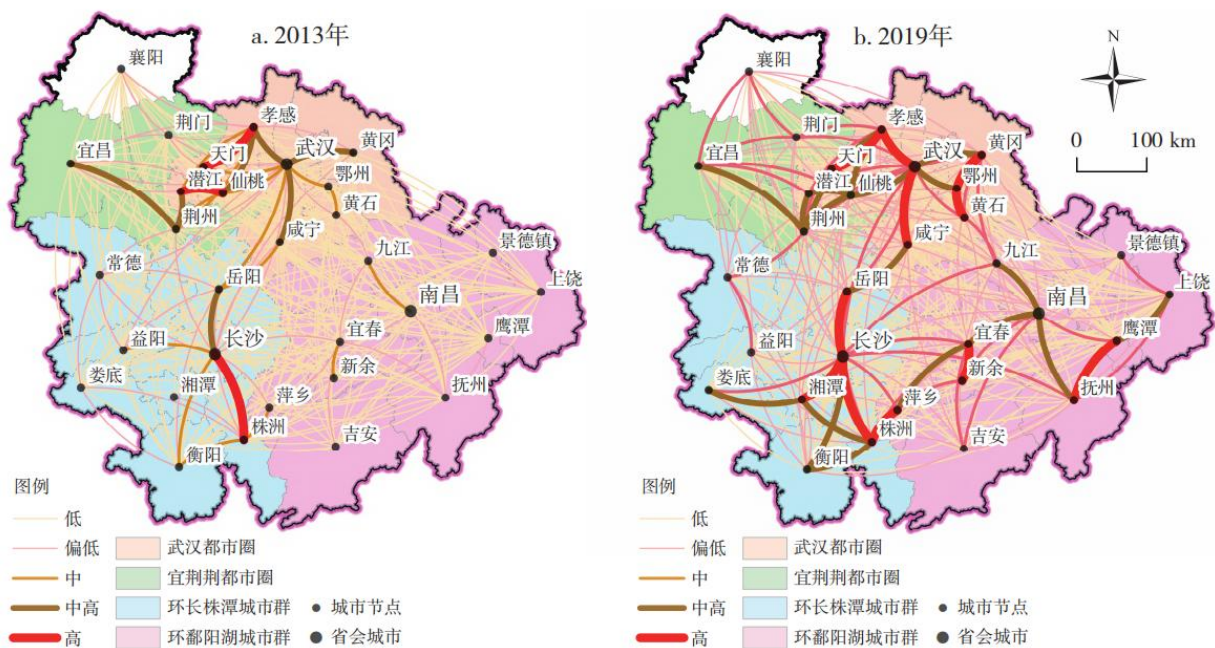


图1 2013与2019年长江中游城市群城市联系空间格局

Fig.1 Urban linkage spatial pattern of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River in 2013 and 2019

从空间关联形态来看，2013年，区域空间联系以省会城市与省域副中心城市联系为主，构成省内辐射的放射形空间联系格局。跨区域联系方面，武汉与长沙不仅与省内城市保持密切联系，还依托武广通道的高客运流量，形成跨区域联系态势。例如长沙与株洲处于高联系层级，长沙—岳阳、武汉—孝感、武汉—黄冈处于中高联系层级。从城市博弈视角来看，这个阶段区域城市博弈的主要发展策略是构建本地城市联系，提升区域竞争力。到2019年，长江中游城市群基本形成多中心、多层级、网络化的铁路流网络格局。各城市间不仅紧密相连，而且延伸至周边区域。例如黄冈、鄂州、黄石3个城市，一方面隶属于武汉城市圈，另一方面向南跨越幕阜山，延伸至九江、南昌等城市，形成跨省域空间联系格局；萍乡、新余、宜春等城市与省会城市南昌保持紧密联系，同时嵌入到湘东地区，与株洲以及衡阳保持跨区域联系。从城市博弈视角来看，这个阶段区域城市博弈的主要发展策略是形成跨区域网络联系。

2.2 长江中游城市群交叠社区演化

2.2.1 社区划分

铁路客运流作为城市关系数据，可以较为直接地反映开放的、动态的以及网络化的城市联系，进而识别流动交叠空间的形态与格局。使用博弈交叠社区发现模型，基于社区内部联系相对紧密、社区间相对稀疏的原则，将2013与2019年的长江中游城市群铁路流网络划分为多个子空间。从划分结果来看，2013年共划分出4个社区，交叠社区城市在城市总数中占比为19%；2019年划分出6个社区，交叠城市在城市总数中占比为35%。与长江中游城市群内部城市群区域空间划分不同，社区不仅存在地理位置邻近且处于同一行政区内的省城社区，还包括受到地理邻近效应和空间距离摩擦叠加作用的跨区域社区。

从地理特征来看，部分社区基本延续了自然地理界限，如2013年识别出的荆楚社区与赣鄱社区以幕阜山为界，罗霄山将潇湘社区与赣鄱社区分隔开来；还有些社区由于天然地形的阻隔，形成相对独立的区域空间，如2013与2019年划分出的交叠社区中，赣东社区主要包含赣东地区的上饶、鹰潭、抚州等城市。这些社区在省级行政边界内，在要素流动、基础设施共享以及区域分工协作等方面具有较强优势，从而形成行政区范围内的社区组团。

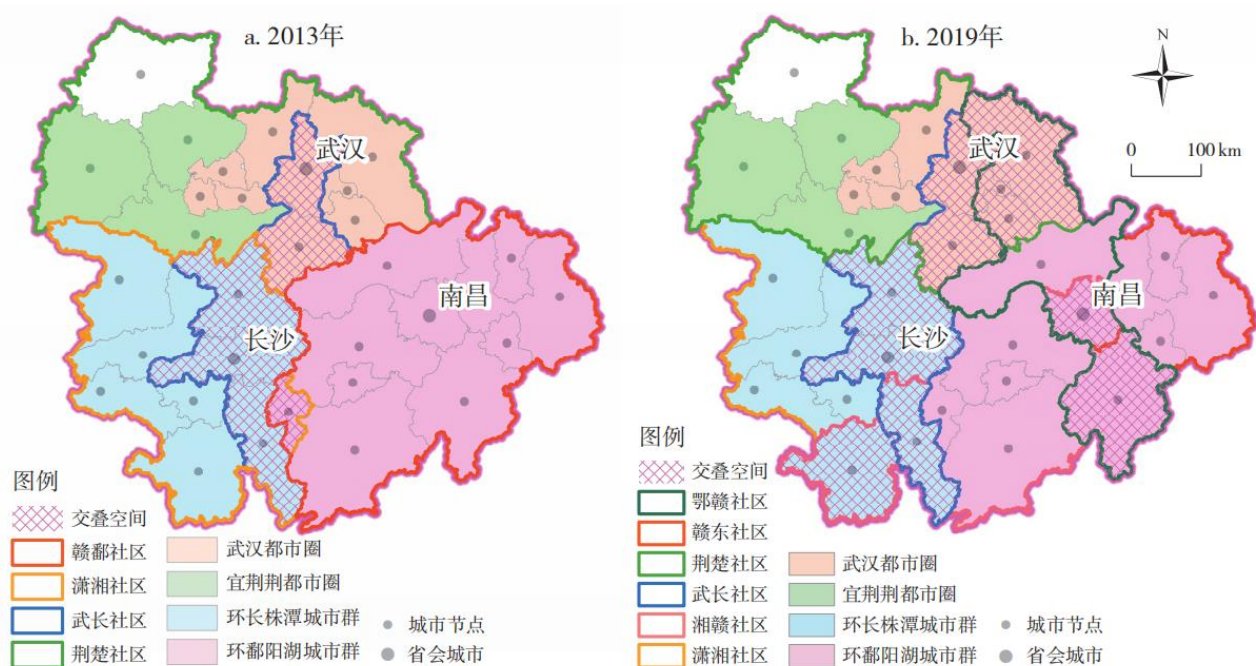


图2 2013与2019年长江中游城市群交叠社区划分

Fig.2 Overlap community division of urban agglomerations in the middle reaches of Yangtze River in 2013 and 2019

从区域联系视角来看，2013 年识别出的武长社区将武汉城市圈与环长株潭城市群进行连接，并形成社区组团。武汉与长沙是省域中心城市，也是区域发展龙头，经济辐射能力强，统领区域间要素关联，并逐步辐射呈条带状区域。2019 年识别出的湘赣社区将江西省东部部分城市与湖南省株洲、衡阳连接起来，从而形成跨区域社区空间。

从区域发展视角来看，基于铁路客运流划分出的部分社区，既表现出存在于本省行政边界或隶属城市群范围内，还表现出联系到其他经济区的空间交叠态势。如在 2013 年，萍乡市不仅是赣西地区的重要城市，同时嵌入到湖南省经济区范围内；在 2019 年，鄂东地区的黄冈、黄石、鄂州不仅与武汉城市圈联系紧密，同时与南昌、九江等城市连为一体，形成区域空间融合发展态势。

2.2.2 交叠社区演化

2013 年识别出荆楚社区、潇湘社区、赣鄱社区、武长社区，整体来看城市空间分布的自组织性较弱，沿沪昆、武广以及沪汉蓉铁路廊道集聚效应显著（图 2）。具体来看，荆楚社区位于湖北省内，由省辖区 12 个城市组成。从空间范围来看，社区涉及武汉城市圈、宜荆荆都市圈，空间上整体连续；从地理区域来看，荆楚社区不仅包含鄂东地区，还吸纳了鄂中与鄂西部分城市，反映区域空间融合发展态势。潇湘社区主要位于湖南省内，社区以省内城市为主体，同时吸纳了江西省萍乡市，形成共有 9 个城市的社区组团。赣鄱社区由江西省内的 10 个城市组成。社区整体发育程度较低，跟其他社区之间互动较弱，空间联系相对独立。武长社区凭借京广通道连接起鄂湘地区的 5 个城市，在南北纵深的武广铁路上，形成跨区域联系，呈现南北向细长条带状分布。该社区以武汉、长沙为龙头引领区域内其他城市，形成通道式的空间关联形态。

2019 年识别出荆楚社区、鄂赣社区、潇湘社区、湘赣社区、赣东社区、武长社区以及 6 个社区（图 2）。整体来看，识别出的社区空间组织性显著增强，产生交叠社区的数量明显上升。具体来看，荆楚社区与 2013 年识别出的荆楚社区城市组成相同，整体空间范围并未发生变化。鄂东地区依托京九发展轴，在南昌、九江辐射带动作用，与发展梯度相似的赣北地区形成跨区

域空间联系，生成鄂赣交叠社区，呈现组团式的空间格局。与上一个时间点的潇湘社区相比，2019 年识别出的潇湘社区并未吸纳萍乡市，一方面，在京广、沪昆通道作用下，城市组团呈现省内发展的趋势，另一方面，在赣西转型升级战略规划下，宜春、新余、萍乡以绿色生态为发展主线连同省会南昌，依托沪昆高铁，与株洲、衡阳形成产业结构互补，共同构成跨省域的湘赣交叠社区。赣东社区主要位于江西省东部地区，由景德镇、上饶、鹰潭、抚州 4 城市组成。依托沪昆高铁，形成组团发展格局。从空间战略来看，该区域一方面对接长三角一体化发展先行区，承接东部沿海先进制造业转移基地、国际文化旅游和康养休闲胜地，另一方面嵌入到省域发展格局中，与鄂赣社区形成交叠。武长社区与 2013 年类似，整体结构并未发生较大变化。

2.3 长江中游城市群交叠空间演化

通过博弈交叠社区模型进一步识别交叠空间发现，2013 年长江中游城市群识别出的 4 个交叠社区，产生 6 个交叠城市；2019 年长江中游城市群识别出的 6 个交叠社区，产生 11 个交叠城市，占比 35%，见图 3。

2013 年，荆楚社区与武长社区产生交叠，形成包含武汉与咸宁的交叠空间。交叠城市武汉是全国性综合交通枢纽城市，九省通衢的别称也反映了武汉在铁路客运网络中的重要地位。依托武广铁路，武汉联动咸宁，衔接湖北与湖南地区，搭建起沟通长江中游南北的经济发展轴，进一步强化与珠三角、长株潭等地区的经济联系。武长社区与潇湘社区产生交叠城市岳阳、长沙以及株洲。依托京广铁路大通道，长沙连同岳阳、株洲，上联武汉城市圈经济区，下联珠三角城市群，内联一湖四水流域，形成跨省域密切联系的鄂赣联通格局。潇湘社区与赣鄱社区形成交叠空间萍乡，依托沪昆通道，一方面参与到赣西地区发展，另一方面嵌入到湘东地区，呈现空间交叠发展态势。

2019 年，荆楚社区与武长社区产生交叠空间武汉、咸宁，潇湘社区与武长社区产生交叠空间长沙、岳阳、株洲，这两组交叠空间与 2013 年相同，整体没有太大变化（图 4）。荆楚社区与鄂赣社区产生交叠，交叠空间包含黄冈、鄂州、黄石，依托京九铁路，向南与赣北地区对接，在资源型产品生产及加工基地的空间发展定位下，成为联系京津冀、珠三角和海峡西岸等地区的重要通道。鄂赣社区与鄂东社区产生交叠空间抚州，一方面，抚州依托沪昆铁路与鄂东地区联动对接，对接粤闽浙沿海城市群发展，承担东部沿海产业转移；另一方面凭借向莆铁路与昌九高铁，抚州嵌入到鄂东与赣北融合发展格局中。湘赣社区与鄂赣社区形成交叠城市南昌，依托纵横交错的沪昆、昌九、向莆铁路，南昌凭借省会核心地位，同时在大南昌都市圈的引领下，南昌一方面参与鄂东与赣东的组团发展，另一方面涉及赣西地区的新（余）宜（春）萍（乡）城镇密集带的区域发展，引领、带动、强化江西东西地区发展轴带。湘赣社区与潇湘社区产生交叠，形成交叠空间株洲与衡阳。凭借京广通道，株洲与衡阳一方面向南承接大亚湾地区的产业转移，另一方面依托沪昆线，向东连接赣西地区进行分工协作，从而形成组团交叠发展格局。

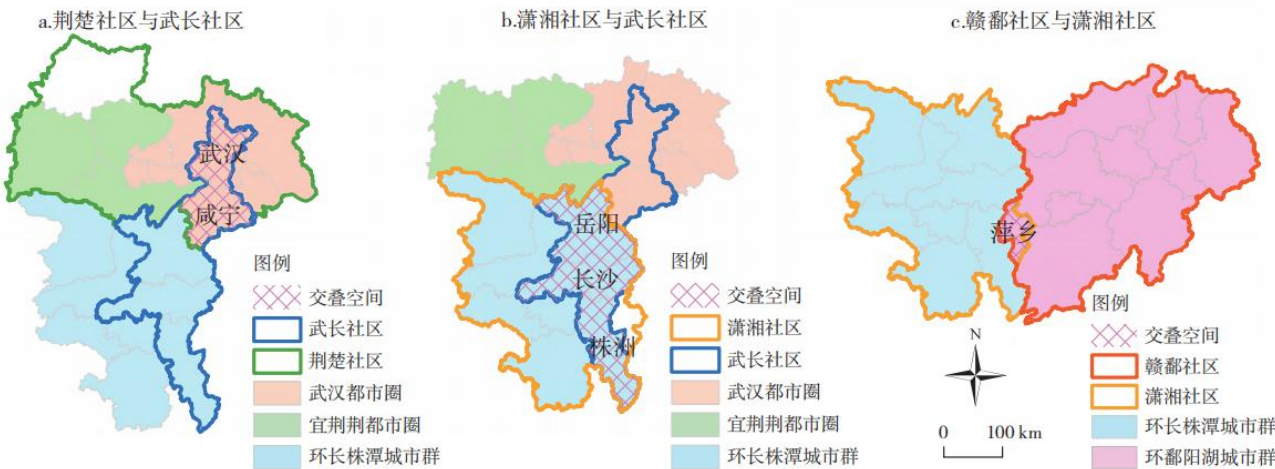


图3 2013年长江中游城市群交叠空间

Fig.3 Overlap space of urban agglomerations in the middle reaches of Yangtze River in 2013

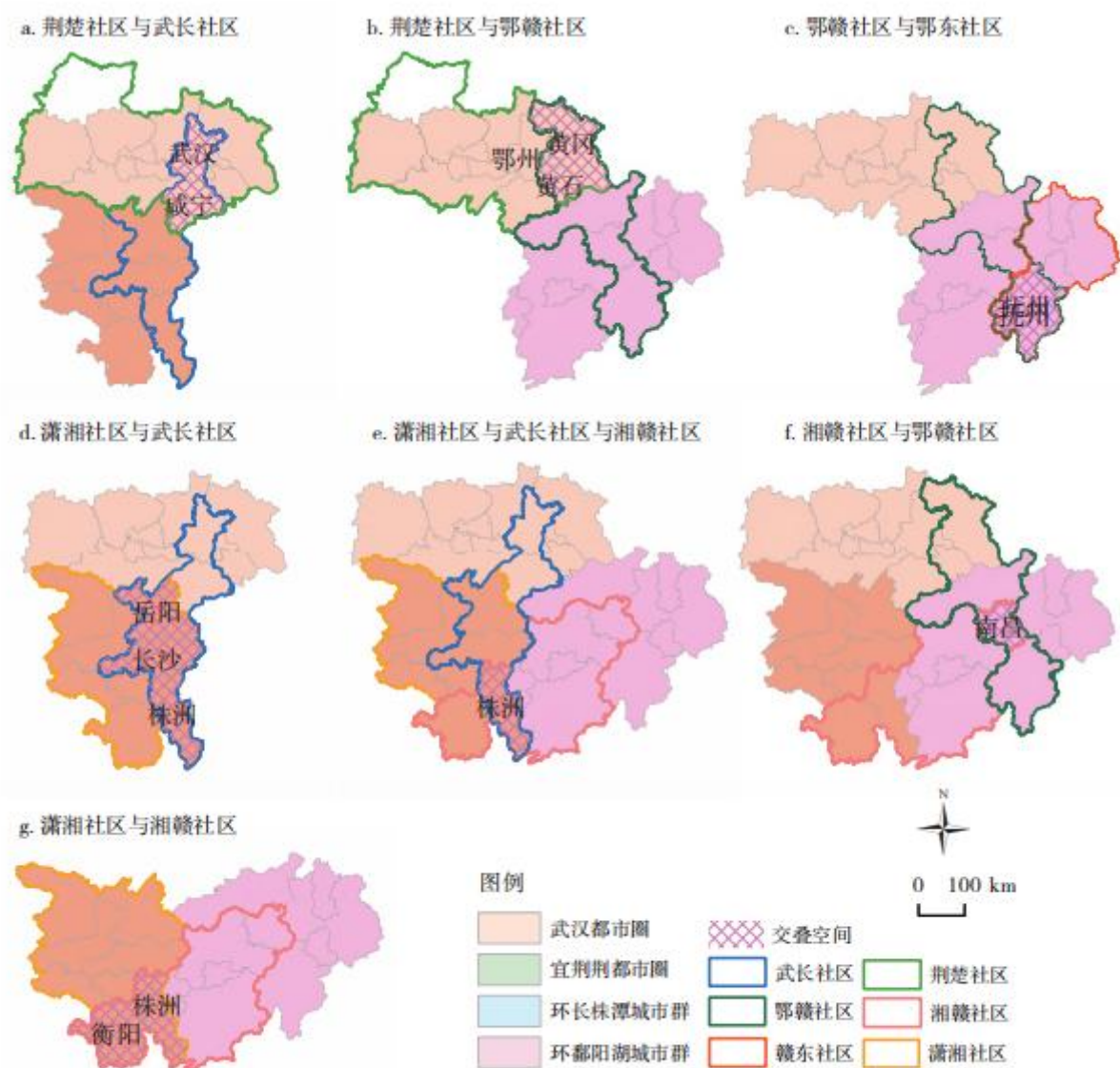


图4 2019年长江中游城市群交叠空间

Fig.4 Overlap space of urban agglomerations in the middle reaches of Yangtze River in 2019

综上所述，交叠空间从空间形态、区域位置以及城市功能等方面存在共性。在空间形态上，交叠空间呈团块状或条带状分布；从空间区位角度来看，交叠空间多位于省会城市周边，行政区域化上多位于省间交界地带，独特的地理区位使得交叠城市多承担区域间交流互动；从城市功能视角来看，交叠城市依托铁路流通道，通过过渡与转换功能，表现为社区间网络联系桥梁。

2.4 新冠肺炎疫情对铁路流网络的影响

2020年初，新型冠状病毒肺炎（COVID-19）在全球范围内迅速蔓延，对社会经济发展造成巨大负面效应。继武汉出现新冠肺炎疫情后，邻近的黄冈市首先出现确诊病例，蔓延并扩散至荆州、仙桃、宜昌等城市，至1月27日湖北省内城市均发现有新冠疫情病例，影响着社会活动的正常运行。铁路交通作为长江中游城市群社会发展的重要支撑，铁路列车的运行以及伴随的人口流动与集聚特征，使其成为疫情传播的重要途径之一，城市疫情的冲击反过来又影响着铁路车次的运行，反映在铁路流网络上，主要表现在：

①铁路流网络的结构失衡。由于长江中游城市群社会经济联系、人口迁移等“流网络”具有跨区域流动特点，因此铁路流网络也有类似的空间结构特征。伴随铁路交通的时效性和便捷性，要素流依托铁路客运网络能够在较短时间抵达较远距离地区，反映在铁路客运流上可能表现为跨区域铁路网络结构的不平衡。

②铁路流网络的轴线中断。铁路廊道往往连接社会活动丰富且人口流动频繁的地区，依托高时效的铁路交通，城市间互联互通程度增强。在长江中游城市群，疫情的扩散会较早出现在京广、沪汉蓉等铁路通道沿线地区。例如，2020年1月21日，出现疫情的城市半数来自铁路干线沿线城市^[35]，以汉蓉高铁和沿江通道城市疫情出现较早且较严重，也体现了沿交通干线扩散的特征。

③铁路流网络的局部塌陷。新冠肺炎疫情爆发后，距离较近的城市疫情表现较为严重，同时也对地理空间邻近的铁路流网络造成剧烈冲击。例如，2020年初，武汉突发新冠肺炎疫情之后，2020年1月20—27日，周边邻近城市黄冈、荆州、孝感等相继出现确诊患者^[35]。随后出现武汉“封城”、铁路线路中断的管控措施，武汉城市圈铁路网络也出现了大规模铁路停运。

3 结论与讨论

3.1 结论

铁路交通是区域发展的重要支撑，其中高铁的快速发展对区域发展格局产生重要影响。本文以长江中游城市群为研究对象，以2013与2019年铁路客运车次数据刻画区域铁路流网络，运用博弈交叠社区发现模型，从网络格局演化、交叠社区结构演化以及交叠空间演化对铁路流网络进行分析，同时定性分析了COVID-19疫情可能对铁路流网络造成的影响，主要结论如下：

①长江中游城市群铁路客运经历了由普铁主导到高铁主导的转变，整体格局具有显著的空间异质性特征，铁路流网络关联形态表现出明显的层级特征与网络特性共存的现象，更多体现的是核心—外围的组合关系以及跨省域的网络空间关系。

②使用基于博弈交叠社区模型进行空间交叠识别，2013年划分出4个社区，产生6个交叠城市，交叠社区城市在城市总数中占比为19%；2019年划分出6个社区，产生11个交叠城市，交叠社区城市在城市总数中占比为35%。

③交叠空间从空间形态、区域位置以及城市功能等方面存在共性。在空间形态上，交叠空间呈团块状或条带状分布；从空间区位角度来看，交叠空间多位于省会城市周边，行政区域化上多位于省间交界地带，独特的地理区位使得交叠城市多承担区域间交流互动；从城市功能视角来看，交叠城市依托铁路流通道，通过过渡与转换功能，表现为社区间网络联系桥梁。

④COVID-19疫情可能对铁路流网络造成结构失衡、轴线中断、局部塌陷三方面影响。

随着城市群内部功能联系网络的形成，区域内城市逐渐形成紧密相连、不可分割的互补与支撑关系。对于长江中游城市群，需尝试进一步优化和提升区域网络支撑能力，以更多的实际空间联系为依据，引导设施网络建设与共享。与此同时，发挥武汉、长沙、南昌省会城市辐射外溢作用，结合比较优势，通过利用周边自然环境与社会经济资源以及政策优势实现空间组织更大程度的交叠，形成良性的利益共同体；其他区域尝试构建更加科学高效的铁路流网络，可以尝试进一步优化空间结构，实现由交叠空间组织向网络空间组织跨越，形成更高效互动的网络化发展格局。

3.2 讨论

本文以铁路客运数据为切入点，研究长江中游城市群铁路流网络交叠情况，对比分析区域交叠网络格局演化特征，探究区域空间交叠的新变化与新认识。基于自然人文地理条件、区域发展的地域差异和传统交通联系方式，长江中游城市群空间格局的划分方式可能主要包括武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群、宜荆荆都市圈、大南昌都市圈等。与一般区划不同，

本文研究显示，长江中游城市群铁路客运流网络的区域空间格局，呈现跨城市群联系与区域组团发展态势。从空间尺度看，本文识别的社区范围既有与传统区域范围相吻合的，也有区别于传统城市群与都市圈空间范围的社区。从各社区来看，2013年，武长社区贯穿鄂湘两省两大经济区，反映铁路客运流作用下湖北、湖南地区正在形成南北连贯的空间联系格局；荆楚社区、潇湘社区以及赣鄱社区与省域空间范围相差不大，反映了相对完整的地域单元特征。2019年江西北部以及西部部分城市，被荆楚社区、潇湘社区子区域吸纳，或是成为交叠区域，形成鄂赣社区以及湘赣社区，反映了铁路客运流视角下湖北、湖南两地区影响力的扩大；赣东地区在2019年表现相对独立，单独划分为赣东社区。另外，在疫情蔓延导致的铁路停运、城市“封城”等一系列管控措施背景下，铁路交通的正常运行受到巨大的冲击与影响，本文总结出 COVID-19 疫情对铁路流网络可能造成结构失衡、轴线中断、局部塌陷的三点影响。

在流空间时代，铁路流与各种人流、物流、信息流等要素流在城市间流动并联结在一起。高铁的迅猛发展，对区域空间发展态势影响显著。高铁空间布局、社会经济发展水平等差异，使得高铁对于区域发展的影响呈现空间不均衡特征，强化了区域城市间的合作与博弈，城市群内部的区域空间分异以及空间交叠发展格局凸显。铁路流网络的交叠演化一定程度上反映了区域城市的竞合博弈。城市在区域发展过程中，依托铁路客运网络以及人口的转移流动，城市之间强化本地联结的同时，衍生出复杂而相互依存的关系网络，最终演化为空间交叠的新态势。

基于博弈理论构建的交叠社区发现模型运用了理性城市的思想，把区域城市发展和联系理解为城市间竞争与合作的博弈，将区域的动态均衡通过自下而上建模过程进行交叠社区模型构建，能够以较为接近现实的方式来反映区域铁路流网络空间格局，使得模型更具有解释力，进而归纳与总结铁路流网络的空间组织特征与演化规律。

本文还有进一步探讨与优化的地方，如未考虑多种交通方式之间的竞争，以及铁路尤其是高铁对其他运输方式的替代，未来可进一步结合多元交通数据进行更加深入的研究。

参考文献

- [1] Dicken P. Economic globalization:corporations[C]//The Blackwell Companion to Globalization. Oxford:Wiley-Blackwell,2007:291.
- [2] Camagni R,Capello R. The city network paradigm:Theory and empirical evidence[J]. Contributions to Economic Analysis,2004,266:495-529.
- [3] Roy J R,Thill J-C. Spatial interaction modelling[J]. Papers in Regional Science,2003,83(1):339-361.
- [4] Batty M. The New Science of Cities[M]. Cambridge:MIT Press,2013.
- [5] Dupuy G,Stransky V. Cities and highway networks in Europe[J]. Journal of Transport Geography,1996,4(2):107-121.
- [6] 金凤君,武文杰.铁路客运系统提速的空间经济影响[J].经济地理,2007,27(6):888-891,895.
- [7] 丛志颖,于天福.东北东部边境口岸经济发展探析[J].经济地理,2010,30(12):1937-1943.
- [8] 孟德友,陆玉麒.高速铁路对河南沿线城市可达性及经济联系的影响[J].地理科学,2011,31(5):537-543.

-
- [9] 姜博, 初楠臣, 王媛, 等. 高速铁路影响下的城市可达性测度及其空间格局模拟分析——以哈大高铁为例[J]. 经济地理, 2014, 34(11):58-62, 68.
- [10] 刘书舟, 韩增林, 郭建科. 高速铁路对东北城市网络结构的空間影响[J]. 地理科学, 2020, 40(2):270-279.
- [11] 叶磊, 段学军, 吴威. 基于交通信息流的长三角地区网络空间结构及其效率研究[J]. 地理研究, 2016, 35(5):992-1002.
- [12] 陈俐锦, 欧国立, 范梦余, 等. 高铁流视角下的中国县域网络结构特征与演化研究[J]. 地理科学进展, 2021, 40(10):1639-1649.
- [13] 孙娜, 张梅青. 基于高铁流的中国城市网络结构特征演变研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(5):727-737.
- [14] 冯长春, 谢旦杏, 马学广, 等. 基于城际轨道交通流的珠三角城市区域功能多中心研究[J]. 地理科学, 2014, 34(6):648-655.
- [15] Yang H, Dijst M, Witte P, et al. The spatial structure of high speed railways and urban networks in China: A flow approach[J]. Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie, 2018, 109(1):109-128.
- [16] 初楠臣, 张平宇, 姜博. 基于日高铁流量视角的中国高速铁路网络空间特征[J]. 地理研究, 2018, 37(11):2193-2205.
- [17] 孟德友, 陆玉麒. 基于铁路客运网络的省际可达性及经济联系格局[J]. 地理研究, 2012, 31(1):107-122.
- [18] 吴威, 曹有挥, 梁双波, 等. 中国铁路客运网络可达性空间格局[J]. 地理研究, 2009, 28(5):1389-1400.
- [19] 王姣娥, 金凤君. 中国铁路客运网络组织与空间服务系统优化[J]. 地理学报, 2005(3):371-380.
- [20] 柯文前, 肖宝玉, 许可, 等. 基于铁路客运班次的福建省城市网络空间组织模式[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2021, 37(4):87-98.
- [21] 叶超, 柴彦威, 张小林. “空间的生产”理论、研究进展及其对中国城市研究的启示[J]. 经济地理, 2011, 31(3):409-413.
- [22] 张衍春, 杨宇, 单卓然, 等. 珠三角城市区域治理的尺度重构机制研究——基于产业合作项目与交通基础设施项目的比较[J]. 地理研究, 2020, 39(9):2095-2108.
- [23] Webber M M. Comprehensive planning and social responsibility: Toward an AIP consensus on the profession's roles and purposes[J]. Journal of the American Institute of Planners, 1963, 29(4):232-241.
- [24] 张衍春, 栾晓帆, 李志刚. “城市区域”主义下的中国区域治理模式重构——珠三角城际铁路的实证[J]. 地理研究, 2020, 39(3):483-494.
- [25] Huang F, Li X, Zhang S, et al. Overlapping community detection for multimedia social networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2017, 19(8):1881-1893.

-
- [26] Zhang F, Ma A, Wang Z, et al. A central edge selection based overlapping community detection algorithm for the detection of overlapping structures in protein-protein interaction networks[J]. *Molecules*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018, 23(10):2633.
- [27] Palla G, Derényi I, Farkas I, et al. Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society[J]. *Nature*, 2005, 435(7043):814-818.
- [28] 朱政, 朱翔, 李霜霜. 长江中游城市群空间结构演变历程与特征[J]. *地理学报*, 2021, 76(4):799-817.
- [29] 郑文升, 杜南乔, 杨瑶, 等. 长江中游城市群空间结构的多分形特征[J]. *地理学报*, 2022, 77(4):947-959.
- [30] 陈永林, 谢炳庚, 张爱明, 等. 不同尺度下交通对空间流动性的影响[J]. *地理学报*, 2018, 73(6):1162-1172.
- [31] 钟业喜, 郭卫东. 中国高铁网络结构特征及其组织模式[J]. *地理科学*, 2020, 40(1):79-88.
- [32] 朱小虎. 用于重叠社团发现的社团生成博弈框架的设计与分析[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [33] Chen W, Liu Z, Sun X, et al. A game-theoretic framework to identify overlapping communities in social networks[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2010, 21(2):224-240.
- [34] Hong Y, Yao Y. Hierarchical community detection and functional area identification with OSM roads and complex graph theory[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(8):1569-1587.
- [35] 王姣娥, 杜德林, 魏冶, 等. 新冠肺炎疫情的空间扩散过程与模式研究[J]. *地理研究*, 2020, 39(7):1450-1462.