

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2021.12.011

基于多尺度 sDNA 模型的成渝双城经济圈 公路交通网络空间特征研究^①

周亮宇¹, 张 勃², 唐伯明³, 齐宏娇¹, 吴 鹏¹

1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 艺术设计学院, 重庆 400074;
3. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074

摘要: 本文基于 ArcGIS 平台和 Geoda 空间计量软件, 综合运用空间设计网络分析(sDNA)、道路度量值加权核密度法和空间自相关法, 对成渝双城经济圈公路交通网络的空间结构以及空间关联性进行深入分析, 结果表明: 成渝双城经济圈公路交通网络空间结构在不同尺度下具有显著差异性, 在全球尺度上呈现“一轴三带”、局部尺度上呈现“两核心多节点”的空间结构; 公路交通网络的 sDNA 度量值在各尺度下皆存在空间正相关性且各类聚类区规模仅随搜索半径的变化而变化; 研究区域可理解度整体水平较高, 但区域内部可理解度差异较大, 区域内公路交通网络有待进一步衔接与优化. 本研究旨在促进成渝双城经济圈空间网络组织的健康发展, 并为制定科学合理的区域发展政策提供理论参考.

关 键 词: sDNA 模型; 多尺度; 成渝双城经济圈; 空间特征

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)12-0072-10

On Spatial Characteristics of Highway Traffic Network in Chengdu-Chongqing Economic Circle Based on Multi-Scale sDNA Model

ZHOU Liangyu¹, ZHANG Bo²,
TANG Boming³, QI Hongjiao¹, WU Peng¹

1. School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Art & Design, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: Based on ArcGIS and Geoda, Spatial Design Network Analysis (sDNA), road measurement weighted kernel density analysis and spatial autocorrelation method have comprehensively been applied in this paper to analyze deeply highway traffic network structure and spatial correlation of highway traffic network in Chengdu-Chongqing Twin Cities Economic Circle. The results show that, Firstly, the highway traffic network spatial structure of Chengdu-Chongqing Twin Cities Economic Circle has significant differences in different scales, showing “one axis and three belts” in the global scale and “two core and multiple nodes” in the local scale. Secondly, there is a positive spatial correlation between the Closeness, Between-

① 收稿日期: 2020-08-25

基金项目: 2020 年度重庆市社会科学规划项目(2020QNJJ14).

作者简介: 周亮宇, 硕士研究生, 主要从事交通地理、交通旅游融合研究.

通信作者: 张 勃, 博士研究生, 副教授.

ness, Severance and Efficiency of highway traffic network at all scales. Moreover, the number of various clustering areas changes with the change of search radius. Thirdly, the average quality of intelligibility of study area is relatively high, but the differences of understandability within this region are large, and the highway traffic network needs to be further optimized. The purpose of this study is to promote the healthy development of the spatial network organization in Chengdu-Chongqing Twin Cities Economic Circle, to provide theoretical reference for the formulation of scientific and reasonable regional development policies.

Key words: sDNA model; multi-scale; Chengdu-Chongqing Twin Cities Economic Circle; spatial characteristics

2020 年, 中央财经委员会第六次会议提出, 推动成渝地区双城经济圈建设, 在西部形成高质量发展的重要增长极, 使成渝地区成为具有全国影响力的重要经济中心和国际性综合交通枢纽。自 2011 年批复《成渝经济区区域规划》再到 2016 年发布《成渝城市群发展规划》以来, 成渝城市群研究热度不断上升, 这与当前成渝地区发展趋势相匹配, 相关研究主要集中在成渝城市群空间结构与规划^[1-2]、成渝双城经济圈^[3-4]和成渝地区与长江经济带协调发展^[5-6]等领域。作为立体交通网络不可或缺的一部分, 公路交通是区域空间相互联系的重要载体, 在地区社会经济发展中的地位与日俱增。而成渝地区处于丝绸之路经济带、中国—中南半岛经济走廊与长江经济带的交叉联结点, 具有对接东西、贯通南北的独特区位优势。研究成渝双城经济圈公路交通网络空间特征, 有利于提升城市群空间规划的科学性与合理性, 同时, 对于促进成渝双城经济圈一体化发展具有重大意义。

目前, 关于公路交通网络的相关研究主要集中在公路交通网络可达性分析、公路交通网络脆弱性研究和公路交通网络空间结构特征等方面。汪瑞琪等^[7]基于 GIS 网络分析模块并运用潜能模型对粤港澳民用机场区域交通可达性进行评价, 为民用机场的空间分布和规划研究提供了一种新的途径。郭卫东等^[8]基于综合网络视角, 运用社会网络分析方法和地理探测器对长江中游城市群县域交通网络中心性及影响因素进行分析。代洪娜等^[9]综合考量路网出行效率、出行需求等要素, 结合公路网流量随机均衡分配模型, 提出了考虑流量加权的公路网脆弱性评估方法。

空间设计网络分析(Spatial Design Network Analysis, sDNA)是由 Cooper 等人于 2013 年开发的一款空间网络分析工具。sDNA 是在继承社会网络分析方法基础上对空间句法的改进, 并利用道路中心线的方法建构网络, 同时可以将分析空间立体化, 提升空间分析的可视化。现有 sDNA 模型应用于交通网络相关的研究主要集中在路网组构形态分析、路网可达性、交通流预测与可持续运输系统建模等方面。Kang^[10]建立了多尺度 sDNA 模型, 分析了首尔市交通网络组构以及步行者出行行为之间的联系, 并指出不同尺度分析结果下步行者出行行为的差异性。He 等^[11]运用 sDNA 模型和空间分层分析法探测了武汉市休闲设施空间布局与路网组构的相关性。Cooper 等^[12]基于多元混合空间设计网络(MH-sDNA)分析了城市空间布局的变化对行人流量的影响。

综上, 发现当前公路交通网络的相关研究主要从图论、复杂网络等数理角度对公路交通网络形态变化进行了研究, 针对空间网络分析角度的研究较少。鉴于此, 本文基于 ArcGIS 平台和 Geoda 空间计量软件, 首先运用空间设计网络分析, 结合道路度量值核密度分析对成渝双城经济圈公路交通网络空间特征进行分析, 再根据空间自相关方法对成渝双城经济圈公路交通网络空间关联性进行评价, 旨在促进成渝双城经济圈空间组织的健康发展, 并为制定科学合理的区域发展政策提供理论参考。

1 研究方法

1.1 道路度量值加权核密度

核密度分析是探索区域结构聚集区域的重要方法, 可以对空间点要素或线要素的分布密度进行连续模拟, 有效地挖掘要素的聚集区域。核密度分析的基本原理是利用一个移动单元格对点或线的分布密度进行核心估计, 从而模拟该类对象的详细分布情况。本文考虑到不同度量值及尺度的影响不同, 故在计算中对不同度量值及尺度进行加权处理。一般定义核密度为: 设 $x_i, \dots, x_n$ 是从分布密度函数为 f 的总体中抽取的独立同分布样本, 估计 f 是在某点 x 处的值, 常用的有 Rosenblatt-Parzen 核估计^[13]:

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \tag{1}$$

式中： k 为核函数； h 为带宽，大于 0； $x - x_i$ 为估计点到线要素 x_i 处的距离。

1.2 空间设计网络分析

sDNA 模型是基于传统空间语法演变而来的一种复杂的空间网络分析技术，在当今城市及区域尺度的空间分析中有较好的应用前景。sDNA 通过重新定义图论中的节点和链，将网络中的链作为分析单元，对路网的可达性及中心性进行分析，亦可计算步行、机动车和公共交通穿越的潜力。sDNA 同时呼应了当前城市区域空间分析的趋势：将空间与大数据相结合。建模方面，运用道路中心线建构交通网络，并可以直接分析 OSM 等开放地图数据；在搜索半径上，较于传统空间句法基于离散空间的模式，sDNA 模型提供离散及连续空间模式，连续空间的计算也相对精确，故本文选取连续空间模式；在度量指标上，本文选取接近度、穿行度、绕行度及效率度衡量成渝双城经济圈公路网空间特征，描述及计算方式^[14-15]如表 1 所示。

表 1 sDNA 度量值及计算方式

指标	度量值指标	描述	计算方式
接近度	以距离为标准的网络数量	接近度越高，可达性和中心性越高，对交通流具有更大的吸引力	$NQPD(x) = \sum_{y \in R_x} \frac{(W(y)P(y))^{nqpdn}}{d_M(x,y)^{nq added}}$ 注：$W(y)$ 为链 y 的权重；$P(y)$ 为搜索半径 R 内节点 y 的权重；本文为连续分析，故 $P(y) \in [0, 1]$；$d_M(x, y)$ 为 x 节点到 y 节点的最短拓扑距离；$nqpdn, nq added$ 常取 1
穿行度	两阶段穿行度	流量模型，反映交通穿越性活动的潜力	$OD(y,z,x) = \begin{cases} 1, & \text{若 } x \text{ 位于 } y \text{ 到 } z \text{ 的最短路径上} \\ 1/2, & \text{若 } x = y \neq z \\ 1/2, & \text{若 } x = z \neq y \\ 1/3, & \text{若 } x = y = z \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ $TPBt(x) = \sum_{y \in N} \sum_{z \in R_y} OD(y,z,x) \frac{W(x)P(x)}{W(y)}$ 注：$OD(y, z, x)$ 为搜索半径内通过节点 x 的 y 到 z 之间的最短拓扑路径；$W(y)$ 为半径内 y 的总权重
绕行度	绕行率	测量公路交通网络的扭曲程度来衡量出行空间变化的困难程度	$Div(x) = \frac{\sum_{y \in R_x} \frac{d_M(x,y)}{CFD(x,y)} W(y)P(y)}{\sum_{y \in R_x} W(y)P(y)}$ 注：$CFD(x, y)$ 为 x 与 y 之间的平均直线距离
效率度	凸壳最大半径	衡量空间网络覆盖的区域空间内的可达性	网络半径内的最大平均直线距离， MCF ： $HullR = \max \left\{ MCF(x) = \frac{\sum_{y \in R_x} CFD(x,y) W(y)P(y)}{\sum_{y \in R_x} W(y)P(y)} \right\}$

1) 搜索半径(R)

搜索半径通过计算某路段在规定度量方式下公路交通网络中所包含的空间范围，路网变量所考虑的空间范围也会随着搜索半径增加而增加，即各路网变量的计算考虑到其余所有路段的特征^[11]。据杨滔^[16]在多个城市群空间网络的研究，不同尺度下分析得到的空间网络结构具有差异性，故本文选取 N (无穷大) 作为宏观尺度计算半径，旨在分析全局尺度下成渝双城经济圈的空间网络结构。将 100 km, 200 km 视为中观尺度的分析半径，50 km 视为微观尺度的分析半径，旨在反映成渝双城经济圈局部尺度下的公路交通网络结构，也旨在揭示成渝双城经济圈不同尺度下的几何关联机制的差异。

2) 度量方式

相较于传统空间句法轴线模型从单一拓扑深度定义最短路径，sDNA 提供了欧式距离、角度距离、用户自定义、混合距离等度量方式，不少学者在空间网络分析中探讨了度量方式的选用。张灵珠等^[17]在香港地区的研究证实，角度距离与欧氏距离混合度量法得出的结果与步行流量具有较好相关性；Serra 等^[18]在英国全域公路网的一项实证研究表明，将这两种度量方法合并可以真实反映系统中的最短路径，在欧式距离缓冲区内运用最小角度距离法相关性系数较欧式距离度量法提升了 21%，显著地提升了计算精度；

Omer 等^[19] 在以色列 Kfar Saba 和 Beer Sheva 的公路网实证研究亦证实, 考虑欧氏距离的最小角度度量法在计算接近度和穿行度时的拟合优度相比米制度量法高出 18.92% ~ 23.52%, 且相关性更优. 故本文运用考虑最小角度距离与最短欧式距离的混合距离度量法.

1.3 空间自相关法

空间自相关的测度分为全局统计量测度和局部统计量测度两种类型. 全局 Moran's I 指数计算如下, 从整体衡量空间要素之间的相互关系, 其值介于 $[-1, 1]$. 大于 0 表示存在空间正相关, 且越接近 1, 空间要素的集聚程度越高; 等于 0, 表示不存在空间自相关性, 即随机分布, 计算方法^[20] 如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中: n 为县域单元总个数, y_i 和 y_j 分别表示第 i 个县域单元和第 j 个县域单元的属性值, $\bar{y}$ 为所有县域单元属性值的均值, w_{ij} 为空间权重值.

局部 Moran's I 相较于全局空间自相关, 局部空间自相关则是计算分析区域内各个县域内交通网络参数与其邻域县域内交通网络参数的空间相关程度, 计算分析空间分布中所存在的局部特征差异, 反映局部区域内的空间异质性与不稳定性, 计算方式如下:

$$I_i = (y_i - \bar{y}) \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (y_j - \bar{y}) \quad (3)$$

当 $(y_i - \bar{y}) > 0$, $\sum_{j \neq i}^n w_{ij} (y_j - \bar{y}) > 0$ 时, 呈高高聚类; 当 $(y_i - \bar{y}) < 0$, $\sum_{j \neq i}^n w_{ij} (y_j - \bar{y}) < 0$ 时, 呈低低聚类; 当 $(y_i - \bar{y}) < 0$, $\sum_{j \neq i}^n w_{ij} (y_j - \bar{y}) > 0$ 时, 呈低高聚类; 当 $(y_i - \bar{y}) > 0$, $\sum_{j \neq i}^n w_{ij} (y_j - \bar{y}) < 0$ 时, 呈高低聚类. 本文全局 Moran's I 主要用于判断公路网络参数的全局平均关联程度, 局部 Moran's I 则用于识别县域内交通网络参数的空间聚类特征.

2 公路交通网络空间特征分析

2.1 研究区域概况

成渝地区双城经济圈目前还没有国家明确的地理和行政范围^[3-4], 故本文研究区域根据《成渝城市群发展规划》选取四川省 15 个地级市以及重庆市的全部区域. 成渝地区处于丝绸之路经济带、中国—中南半岛经济走廊与长江经济带的交叉联结点, 具有对接东西、贯通南北的独特区位优势, 是长江经济带的重要组成部分, 研究区域面积约 24 万 km^2 , 地区生产总值已从 2014 年的 3.76 万亿元增长到 2018 年的 5.75 万亿元, 占全国比重从 5.84% 上升到 6.25%, 增速在全国的城市群中位居前列, 显示出了较强的增长动力. 城市群具备较好的交通区位优势, 在公路交通方面, 截至 2020 年初期, 成渝地区高速公路通道多达 12 条, 成渝毗邻地区 9 条国道达到二级及以上, 预计到 2025 年, 成渝间将形成 17 条以上高速公路大通道, 推动形成成渝地区双城经济圈“1123”交通圈.

2.2 成渝双城经济圈公路交通网络空间结构分析

研究区域的道路矢量数据来自于开源地图 (Open-Street map), 获取的成渝地区道路数据参照道路属性分级, 进行拓扑关系检查和编辑修改, 结合人工判读进行融合、清洗, 在清除空值、互通、断线、重复线等要素之后生成所需的道路网络 (包括高速公路、一级路、二级路、三级路). 在 ArcGIS 平台加载 sDNA 工具箱并提取研究区域道路轴线, 计算各道路在 50, 100, 200 km 以及搜索半径 N 下的度量值, 并分别运用核密度法计算出不同尺度下度量值的道路加权核密度 (图 1), 以探测公路网络结构的特征.

2.2.1 全局尺度上呈现“一轴三带”的公路交通网络结构

通过分析成渝双城经济圈的全局接近度和全局穿行度, 整体上呈现出“一轴三带”的公路交通网络结构, 具有块状集聚、轴状延伸的格局. “一轴”以成都、重庆为核心, 依托贯穿遂宁、内江、资阳、自贡的成渝高速、渝蓉高速等交通干线组成基本骨架的一条东西走向的发展轴. “三带”指的是成绵乐城市带、沿长江城市带及嘉陵江城市带, 成绵乐城市带以成都为核心, 依托成乐高速、成雅高速以及成绵高速等交通干

线为辐射, 绵阳、德阳、乐山、眉山等城市为节点支撑; 沿长江城市带以重庆为核心, 依托厦蓉高速、成渝环线高速以及沪渝高速等交通干线为辐射, 泸州、宜宾、江津、万州等为节点支撑; 嘉陵江城市带以重庆主城为龙头, 嘉陵江为轴线, 依托沪蓉高速、兰海高速等交通纽带, 南充、广安等为节点支撑. “一轴三带”为研究区域全局接近度和全局穿行度的高值区域, 一是代表该区域在全局尺度上有较好的可达性和中心性, 对全局路网的吸引力更强; 二是代表该区域路网穿越性较高, 即承担更大的交通量; 三是整体上与《成渝城市群发展规划》中的“成渝主轴—成绵乐城市带—沿江城市带”空间发展模式相吻合.

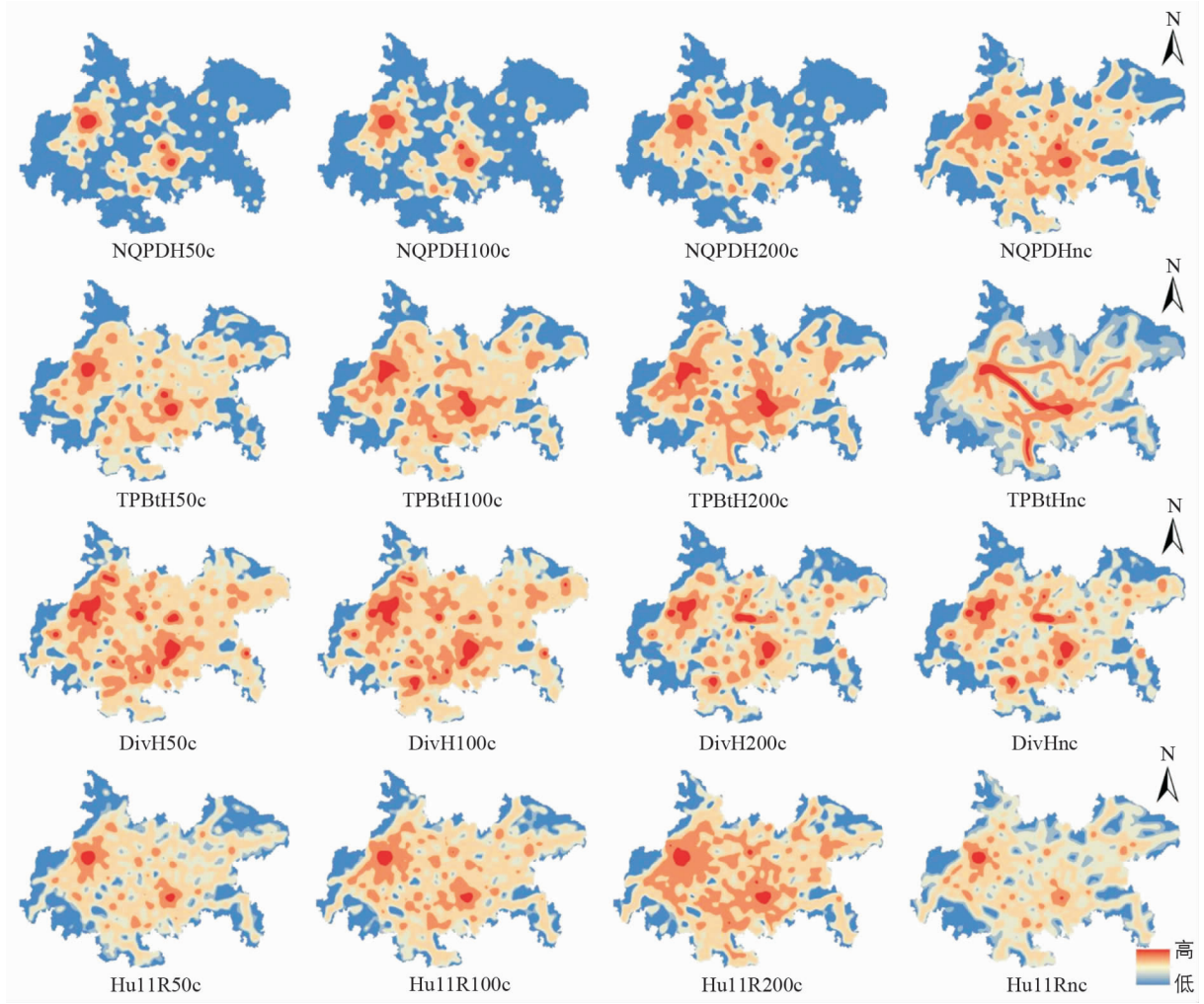


图 1 成渝双城经济圈 sDNA 度量值加权核密度

2.2.2 局部尺度上呈现“两核心多节点”公路交通网络结构

通过分析各局部尺度下的接近度、穿行度、分离度及效率度, 整体上呈现出“两核心多节点”的空间网络结构. “两核心”以研究区域内两座一线城市成都、重庆组成, “多节点”以川南城镇密集区的泸州和宜宾、南遂广城镇密集区的南充、万达开城镇密集区的万州等节点组成. 以 50 km 为搜索半径时, 仅成都主城、重庆主城以及各城镇密集带的核心城区的局部接近度、穿行度较高, 表明短距离出行全局道路网可达性及通过能力较差, 仅对各城区内路网吸引力较强; 以 100 km 为搜索半径时, 成都第二绕城高速、重庆绕城高速内区域各度量值都有明显提升且分布均匀, 表明各城镇组团内部联系紧密, 组团内中心性和交通穿越性良好; 以 200 km 为搜索半径时, 成绵乐、沿江城市带等带状区域中心性及可达性水平较高, 绵阳、乐山、南充、泸州与核心城市联系较为紧密.

各局部尺度下川南城镇密集区、南遂广城镇密集区及万达开城镇密集区各度量值具有显著差异. 南遂广城市群在局部接近度与穿行度的计算结果表明, 该区域呈现高可达性和穿越性的空间交通网络结构, 城镇组团内部形成“三城同构”的空间形态, 依托“一轴一带”良好的交通条件促进区域协调发展. 而位于研究区域东北部的万达开城镇密集区则呈现边缘化趋势, 一是与成都、重庆核心城市的外向联系相对较弱, 二

是组团核心城区万州、达州内部没有建立良好的城际通达通道。

2.2.3 不同尺度下公路交通网络结构具有显著差异性

为探测不同尺度下公路交通网络空间结构差异,运用 ArcGIS 中的 spatial join 工具将基于路网线要素计算的各 sDNA 参数汇总至县域地理单元^[21-22],并计算得出各县域公路的平均接近度、平均穿行度、平均分离度及平均效率度且在不同尺度下具有显著差异性。其中接近度和穿行度差异最为显著,得出在 50, 100, 200 km 及搜索半径 N 下,平均接近度在 $[0.12\%, 6.35\%]$, $[0.12\%, 7.07\%]$, $[0.13\%, 7.84\%]$ 及 $[0.13\%, 9.11\%]$ 区间内,平均穿行度分别在 $[0.20, 11.59]$, $[0.24, 20.38]$, $[0.31, 20.85]$ 及 $[0.39, 91.23]$ 区间内。平均接近度最高的 5 个县域单元由微观尺度的合川区、成华区、青羊区、锦江区及金牛区演变至全局尺度的合川区、成华区、青羊区、渝中区及锦江区,可见各县域单元平均接近度值仅随搜索半径的增加而增加,反映了研究区域内活力中心始终为各城镇组团的核心城区。平均穿行度最高的 5 个县域单元由微观尺度的渝中区、青羊区、武侯区、江北区及合川区演变至全局尺度的大足区、安岳县、乐至县、纳溪区及渝中区,可见搜索半径由局部演变到全局,穿行度高值县域单元也由各城镇组团的核心城区演化为成渝主轴沿线县域单元,也反映出短距离出行中心城区的穿行度较高和远距离出行区域之间的衔接通道穿行度较高。

3 公路交通网络空间关联性判别

3.1 公路交通网络全局自相关评价

本节综合运用 ArcGIS 平台和 Geoda 空间计量软件,计算成渝双城经济圈内各县域单元全局 Moran's I 指数。在运算过程中发现,各县域相邻的欧式距离阈值为 71.58 km。sDNA 参数在各尺度下的全局 Moran's I 指数皆大于零,且结果均在 1% 的水平下显著,如表 2 所示。结果表明,研究区域各县域公路交通中心性和穿越性在空间分布上存在空间正相关性,且呈现一定的空间聚集性,即成渝双城经济圈公路交通网络存在相互促进的关系。各度量值全局 Moran's I 指数随搜索半径的变化而有所波动,如接近度在 50 km 搜索半径下全局 Moran's I 指数是 0.890, 100 km 是 0.976,有所增加, 200 km 下降到 0.965, 全局尺度下降至 0.838,成渝双城经济圈各县域交通网络中心度的整体相关性呈下降趋势,表明成渝双城经济圈的中心性相互促进的影响有所变小;穿行度在 50 km 搜索半径下全局 Moran's I 指数是 0.595, 100 km, 200 km 及全局尺度分别下降至 0.583, 0.559 和 0.583,成渝双城经济圈内各县域交通网络穿行度的相关性随搜索半径的增加呈下降趋势,说明成渝双城经济圈在各尺度上公路网络中心性和穿越性总体上虽呈现出集聚的形态特征,但全局尺度集聚程度不及局部尺度。

表 2 成渝双城经济圈全局 Moran's I 计算结果

度量值指标	全局 Moran's I 指数	Z 值	p 值
NQPDH50c	0.890***	25.558	0.000
TPBtH50c	0.595***	18.094	0.000
DivH50c	0.135***	3.938	0.000
HullR50c	0.133***	3.861	0.000
NQPDH100c	0.976***	27.931	0.000
TPBtH100c	0.583***	17.396	0.000
DivH100c	0.138***	4.069	0.000
HullR100c	0.138***	3.975	0.000
NQPDH200c	0.965***	27.534	0.000
TPBtH200c	0.559***	16.254	0.000
DivH200c	0.162***	4.776	0.000
HullR200c	0.137***	3.975	0.000
NQPDHnc	0.838***	23.859	0.000
TPBtHnc	0.583***	17.396	0.000
DivHnc	0.162***	4.776	0.000
HullRnc	0.187***	5.346	0.000

注:***表示通过了 1% 的显著性水平检验。度量值指标解释:如 NQPDH50c, NQPD—接近度, H—度量方式为混合度量, 50—搜索半径 50 km, c—连续空间模式。

3.2 公路交通网络局部自相关评价

为了更好探测成渝双城经济圈公路网络的局部性特征，将公路网络线要素的计算结果汇总到县域，运用 Geoda 分别计算接近度和穿行度的局部莫兰指数，得出各尺度 LISA 集聚图(图 2)。从各类集聚空间分布来看，可达性及中心性的高高集聚区主要集中在成都城市圈、重庆城市圈及南充城区，此类区域城市经济发展活力较高，交通枢纽地位显著，在空间上呈现强强集聚的分布形态；低低集聚区主要集中在雅安石棉县、汉源县、乐山峨边县、马边县以及重庆东南部、东北部地区，此类区域的城市发展水平相对较差，交通基础设施发展水平较低，邻接空间分布形态使得这些区域空间联系较低；低高集聚区主要集中在核心城市周边区域，这些城市依托于核心城市具有一定的交通区位优势，周边城市发展水平较高，形成了低高空间分布格局。非核心一边缘地区中心性结果在各尺度下集聚效果呈现不显著的特点。从各类集聚区的变化来看，随着搜索半径的增加，各类集聚区规模出现明显的变化过程，以穿行度为例，高高集聚区从成都、重庆核心区向成渝发展主轴沿线转变，表明成渝发展主轴沿线城市在城际出行时穿越性成互相促进的态势。同时，低高集聚区和低低集聚区规模也出现了明显增加，低高集聚区从核心城市周边区域转向渝蓉高速沿线城市的周边区域；低低集聚区在由研究区域边缘地区转至四川雅安、乐山及万达开城镇密集区边缘地区，该区域交通基础设施较差，发展等级与研究区域其他地区比较相对较低，乐山金河口区、马边县、平武县、宝兴县等地尚无高速公路，致整体穿行度较差，Friedman^[23]提出的核心一边缘理论中“区域发展过程中核心与边缘发展不平衡，且核心的发展并不一定对边缘有好处”模式与之相吻合。但随着成渝双城经济圈的战略推进及区域内多条高速公路的规划建设，将进一步消除城际间的“断头路”“瓶颈路”，意在推动区域国土空间均衡开发，缩小核心一边缘地区基础设施差距。

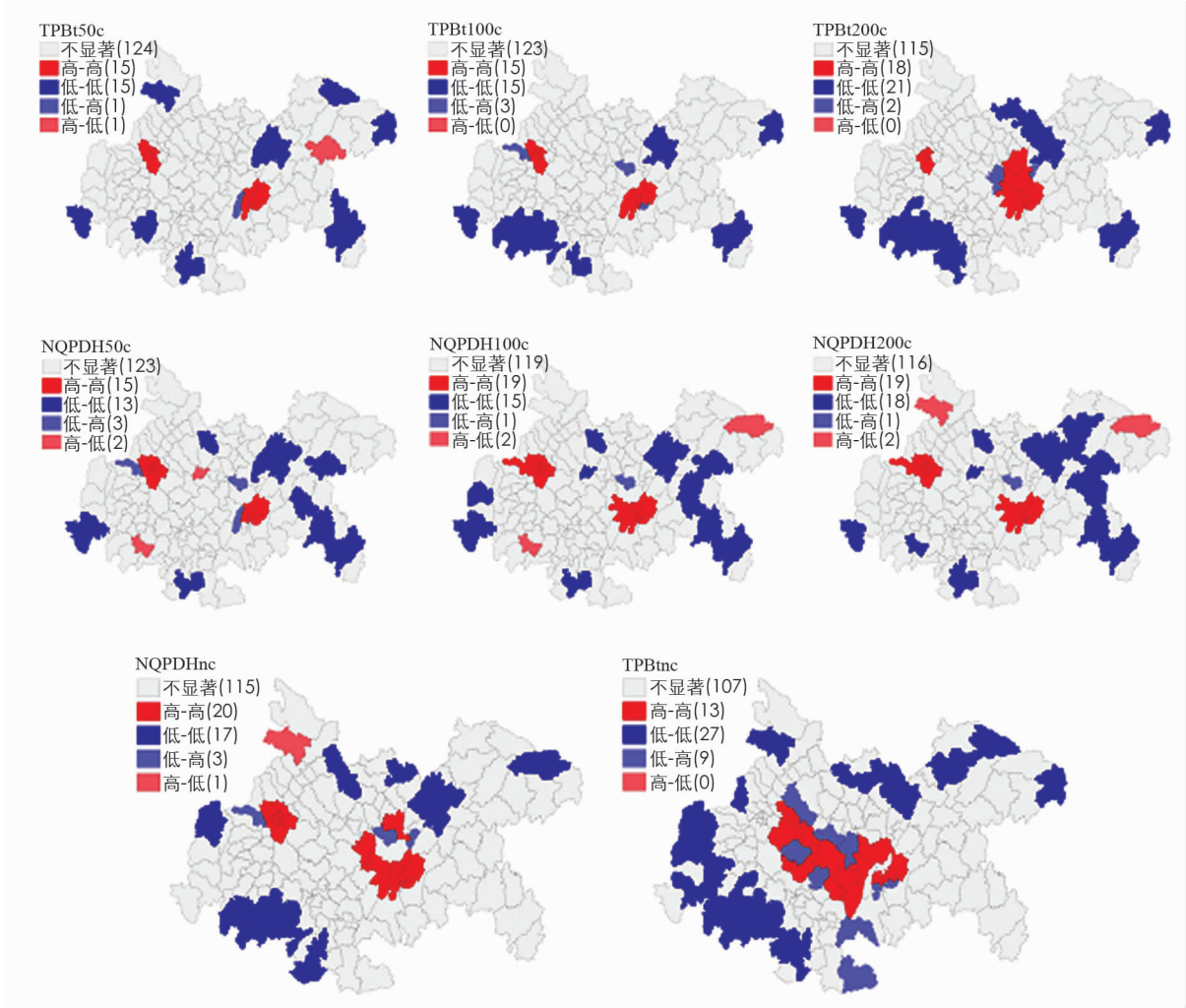


图 2 成渝双城经济圈公路网络局部自相关评价

3.3 公路交通网络空间协同评价

Hillier 研究^[24]认为可理解度为局部接近度和全局接近度之间相关性的表达, 揭示了一些区域中局部与整体结构之间的潜在关系, 通过局部空间感知整体空间的能力. 某一节点的局部相关系数与总体相关系数的比值即为可理解度^[20]. 以县级行政单位为研究单元, 计算各县内公路网在各尺度下的平均接近度, 再求得不同尺度下成渝双城经济圈的公路网可理解度. 计算出研究区内 50,100,200 km 局部尺度与全局尺度的可理解度的拟合优度分别为 0.89,0.92,0.95, 如图 3(a)所示, 反映出研究区域内局部尺度与全局尺度公路网络形态发展较为一致. 为进一步探测核心与边缘区域的可理解度的差异性, 故选取在微观尺度下平均接近度最小及最大的 50 个县域单元, 得出结果如图 3(b)和图 3(c)所示: 平均接近度最小的 50 个县域单元在 50,100,200 km 局部尺度与全局尺度的可理解度的拟合优度分别仅为 0.21,0.32,0.56, 而平均接近度最大的 50 个县域单元在各局部尺度下的可理解度的拟合优度分别为 0.93,0.96,0.98, 表明核心边缘地区局部与整体公路网协同差异较大. 交通一体化及公路交通网空间协同发展是促进区域协同发展的排头兵, 而对于成渝双城经济圈而言, 除了成都、重庆及南充等区域核心城市的公路网空间协同发展条件较好外, 大部分区域的公路网有待进一步衔接与优化.

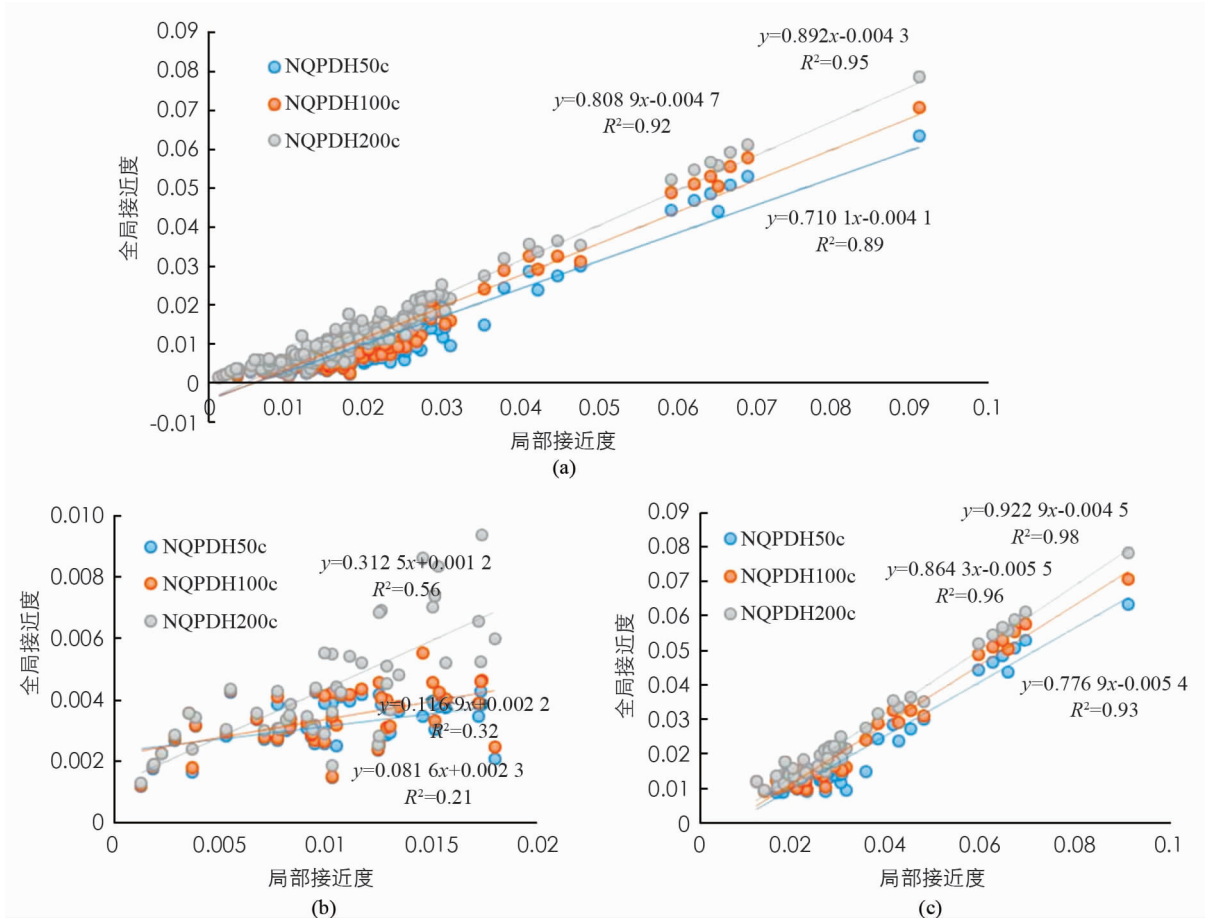


图 3 成渝双城经济圈公路网空间协同评价

4 结论与启示

空间设计网络分析可有效解释区域路网的可达性、中心性及穿行度以及判定路网的空间组构特征. 本文引进 sDNA 模型, 试图基于空间设计网络分析视角, 从接近度、穿行度、绕行度及效率度解构成渝双城经济圈的公路网空间特征, 实现从数理、社会网络分析等角度向空间网络分析转变, 这有助于突破、丰富研究城市群公路网的研究视角. 通过研究得到以下两点结论:

1) 成渝双城经济圈在不同尺度下公路交通网络结构具有显著差异性, 在全局尺度上呈现“一轴三带”

的空间网络结构:一是在全局尺度上有较好的可达性和中心性,对全局路网的吸引力更强;二是代表路网穿越性较高,即承担更大的交通量,与实际高速公路承担较多远距离交通流相匹配;三是整体上与《成渝城市群发展规划》的“成渝主轴—成绵乐城市带—沿江城市带”空间发展模式相吻合。在局部尺度上呈现“两核心多节点”的空间网络结构,且川南城镇密集区、南遂广城镇密集区及万达开城镇密集区各度量值在各局部尺度下具有显著差异。

2)成渝双城经济圈公路交通网络接近度、穿行度、绕行度及效率度在各尺度下皆存在空间正相关性,接近度及穿行度整体相关性较高,而绕行度及效率度整体相关性较低。从各类集聚区的分布来看,高高集聚区主要集中于成都城市圈、重庆城市圈及南充城区,低低集聚区主要集中在雅安石棉县、汉源县、乐山峨边县、马边县以及重庆东南部、东北部地区,低高集聚区主要集中在核心城市周边区域。从各类集聚区的变化来看,各类集聚区规模随搜索半径的增加出现明显的变化过程,且成渝双城经济圈核心—边缘地区公路网协同差异较大,除了成都、重庆及南充等区域核心城市的公路网空间协同发展条件较好外,大部分区域的公路网有待进一步衔接与优化。

上述结论对于进一步优化成渝双城经济圈公路网空间结构,促进区域公路网高质量发展具有重要启发意义,因此本文提出两点建议:

1)依托成渝发展主轴,推动成渝双城经济圈的交通一体化进程,进一步完善高等级公路交通通道,建设立体交通网络,形成 1 小时交通通勤圈,带动成都都市圈和重庆 1 小时经济圈两个大型都市圈内部同城化发展。

2)培育川南城镇组团的泸州和宜宾、南遂广城镇组团的南充、万达开城镇组团的万州和开州为次级交通枢纽城市,打造成渝地区双城经济圈中的多支点、强核心。同时,打通组团枢纽性城市与边缘地区的联系通道,组团枢纽性城市城际联系通道向组团内中小城市扩展,实现整个成渝双城经济圈公路网全面一体化发展。

相较于以往研究,研究突破了传统空间句法轴线模型从单一拓扑深度定义最短路径,采纳了“最小角度距离—最短欧式距离”复合的度量方式,为城市群空间结构关系的度量提供了新的可能性;搜索半径模式从离散空间到连续空间的转变,从原有 0 或 1 的取值向 0 到 1 取值范围的改变,显著提高了计算精度。目前,本文还停留在静态研究的层面,未来研究一方面可收集成渝双城经济圈的时间序列数据,以深入探讨公路交通网络体系的时空演化特征,并引入地理探测器法对其时空演化驱动因子进行判定;另一方面可以搭建交通网络、土地利用模式及经济网络之间的桥梁,将三者结合起来开展区域公路网络综合体系研究。

参考文献:

- [1] 尹虹潘.成渝城市群空间经济格局与城际经济关联[J].西南大学学报(社会科学版),2019,45(3):44-53.
- [2] 王 豪,刘秀华.高速铁路对沿线城市可达性的影响研究——以成渝高铁为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2018,43(7):123-129.
- [3] 钟海燕,冷玉婷.基于知识图谱的成渝地区双城经济圈研究综述[J].重庆大学学报(社会科学版),2020,26(4):13-26.
- [4] 蒋永穆,李 想.川渝黔经济一体化助推成渝地区双城经济圈建设研究[J].西部论坛,2020,30(5):43-56.
- [5] 涂建军,毛 凯,况人瑞,等.长江经济带三大城市群城际客运联系网络结构对比分析[J/OL].世界地理研究,2021,30(1):69-79[2021-08-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20200804.1417.004.html>.
- [6] 官冬杰,和秀娟,陈 林.长江经济带不同尺度城市规模扩张特征及空间差异研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(6):108-116.
- [7] 汪瑞琪,陈建均.基于潜能模型的粤港澳大湾区民用机场公路交通网络可达性研究[J].公路,2020,65(4):225-231.
- [8] 郭卫东,钟业喜,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.
- [9] 代洪娜,李 炜.考虑流量加权的高速公路网脆弱性研究[J].公路,2019,64(5):181-187.

[10] KANG C D. Measuring the Effects of Street Network Configurations on Walking in Seoul, Korea [J]. Cities, 2017, 71: 30-40.

[11] HE S W, YU S, WEI P, et al. A Spatial Design Network Analysis of Street Networks and the Locations of Leisure Entertainment Activities: A Case Study of Wuhan, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 44: 880-887.

[12] COOPER C H V, HARVEY I, ORFORD S, et al. Using Multiple Hybrid Spatial Design Network Analysis to Predict Longitudinal Effect of a Major City Centre Redevelopment on Pedestrian Flows [J]. Transportation, 2021, 48(2): 643-672.

[13] 刘建军, 陈颖彪, 千庆兰, 等. 广州市交通网络的综合通达性及其空间特征 [J]. 经济地理, 2016, 36(2): 45-52,73.

[14] COOPER C H V. Spatial Design Network Analysis(sDNA) Version 4.0 Manual [EB/OL]. [2020-02-03]. <https://sdna.cardiff.ac.uk/sdna/software/documentation/>.

[15] COOPER C H V, CHARADIA A J F. sDNA: 3-d Spatial Network Analysis for GIS, CAD, Command Line&Py-thon [J]. Software X, 2020, 12: 100525.

[16] 杨 滔. 基于空间句法的多尺度城市空间网络形态研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017.

[17] 张灵珠, 晴安蓝. 三维空间网络分析在高密度城市中心区步行系统中的应用——以香港中环地区为例 [J]. 国际城市规划, 2019, 34(1): 46-53.

[18] SERRA M, HILLIER B. Angular and Metric Distance in Road Network Analysis: A Nationwide Correlation Study [J]. Computers Environment and Urban Systems, 2019, 74: 194-207.

[19] OMER I, KAPLAN N. Structural Properties of the Angular and Metric Street Network’s Centralities and Their Implications for Movement Flows [J]. Environment and Planning B-Urban Analytics and City Science, 2019, 46(6): 1182-1200.

[20] 王绍博, 郭建科. 我国城市整体交通运输流发展的时空演化及其空间关联性分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 43-49.

[21] 古恒宇, 周 麟, 沈体雁, 等. 基于空间句法的长江中游城市群公路交通网络研究 [J]. 地域研究与开发, 2018, 37(5): 24-29.

[22] 陆百川, 李玉莲, 舒 芹. 基于时空相关性和遗传小波神经网络的路网短时交通流预测 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(5): 25-34.

[23] FRIEDMAN J R. Regional Development Policy: A Case Study of Venezuela [M]. Cambridge: MIT Press, 1966.

[24] HILLIER B. Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

责任编辑 汤振金