引文格式：刘艺炫,左涛,雷倩芳,等. 基于复杂网络的西安主城区空间结构研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 49-52. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.011

基于复杂网络的西安主城区空间结构研究

刘艺炫[1,2]，左　涛[1,2]，雷倩芳[1,2]，陈恒恒[1,2]，杨晓东[1,2]
（1. 中煤航测遥感集团，陕西 西安 710199；2. 中煤航测遥感集团有限公司企业技术中心，陕西 西安 710199）

摘　要：以西安市主城区为研究区，采用OSM道路数据，通过计算道路网密度、识别多层次道路社区分析空间结构。结果表明：①从整体空间上看，西安市主城区道路网发展水平整体较高，以老城区为中心，在主城区北部区域逐渐向外圈层式扩展分布；②从全局尺度来看，西安市主城区表现出多个中心共同发展的城市结构，老城区与周围各区互相影响，形成新的道路空间分布结构，由内向外逐渐扩展，将城市中心分散化，形成多个中心；③从局部尺度来看，除长安区外，各区内部发展均衡，以碑林区、新城区和莲湖区为中心，圈层式向外发展，呈现出中心强外圈弱的空间结构。

关键词：道路网密度；复杂网络；社区；城市结构
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0049-04

Research on the Main Urban Area Spatial Structure of Xi'an Based on Complex Network

LIU Yixuan[1,2], ZUO Tao[1,2], LEI Qianfang[1,2], CHEN Hengheng[1,2], YANG Xiaodong[1,2]
(1. Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Group Co., Ltd., China National Administration of Coal Geology, Xi'an 710199, China;
2. Enterprise Technology Center of China Coal Aerial Survey and Remote Sensing Group Co., Ltd., Xi'an 710199, China)

Abstract: Taking the main urban area of Xi'an as the research area, we used OSM road data, and analyzed the spatial structure by calculating the road network density and identifying multi-level road communities. The results show that ①from the overall spatial perspective, the road network development level in main urban area of Xi'an is relatively high as a whole. The road network is centered in the old urban area and gradually expands to the outer circle in the northern area of main urban area. ②From the global scale, the urban area of Xi'an shows the urban structure of the common development of multiple centers. The old urban area and the surrounding districts interact with each other, forming a new spatial distribution structure of roads, which gradually expands from inside to outside, dispersing the urban center and forming multiple centers. ③From the local scale, except Chang'an District, the internal development of each district is balanced, with Beilin District, Xincheng District and Lianhu District as the center, and the development of outer circle, showing a spatial structure of the center is strong and the outer circle is weak.

Key words: road network density, complex network, community, urban structure

城市空间结构是城市内部多种要素在空间上相互作用形成的城市地域形态特征，是一定条件下社会经济发展和人口集聚的产物，是城市社会经济活动在地域空间上的映射[1-2]。城市空间结构研究一直是城市地理学的研究热点，众多学者已采用多种方法研究城市结构，王彦君[3]等以西安市为例，从经济角度研究了城市的社会空间结构，得到近现代以来西安市社会经济结构的演变过程；魏石梅[4]等基于夜间灯光遥感影像和微博签到数据识别了郑州主城区的城市中心与内部空间结构，得到18个城市中心，分析城市中心内部结构发现，城市中心内部可分为5个等级，由里到外降低分布；郑晓伟[5]等基于空间句法技术研究了西安城市网络拓扑结构，认为西安市应以偏心式的轴向发展模式代替单一的圈层式发展模式，从而达到优化西安市空间结构的目的；胡璐嘉[6]等基于空间句法理论分析了元、明、清3个时期的北京市功能空间结构，最终得出北京市功能中心及其变化规律；黄伟力[7]基于POI兴趣点数据，从微观和中观的角度研究了北京市城市空间结构，证明POI兴趣点能很好地表征城市形态结构；吴凤敏[8]等利用NPP/VIIRS数据识别得到重庆市建成区边界，并采用POI等数据分析了城市的发展变化，得到重庆市2013—2019年的空间变化、扩张方式、重心迁移等。上述学者基于不同数据、从不同角度对城市结构进行了研究，但对于小范围城市内多尺度多层次的空间结构研究仍较少。

在城市发展过程中，路网作为城市内部交通的重

收稿日期：2022-09-13。
项目来源：国家自然科学基金青年基金资助项目（61902313）。
第一作者简介：刘艺炫（1997—），硕士，主要研究方向为城市空间计算、三维可视化，E-mail：liuyxgis@foxmail.com。

要组成部分，具有至关重要的作用。城市路网不仅能增强城市各区域之间的相互影响与联系，也能影响人类的活动和社会公共机构等物质要素的空间分布模式[9]。城市路网结构能反映城市道路网络中各种相关要素形成的空间形态，从不同角度来看，这些空间形态通常具有十分规律的结构特性[10-11]。因此本文采用OSM道路数据构建复杂网络，再通过计算道路网密度、识别多层次道路社区，识别道路发展水平分布情况以及多层次的道路社区结构，从全局和局部空间结构的视角来分析西安市主城区的城市空间结构。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西安市地处关中平原中部，地理坐标在107°40′～109°49′E、33°42′～34°45′N之间，是我国西部地区重要的中心城市，国家重要的科研、教育和工业基地；内辖新城区、碑林区、莲湖区、灞桥区、未央区、雁塔区、阎良区、临潼区、长安区、高陵区、鄠邑区11个市辖区以及蓝田县、周至县两个县；区域总面积为1.01万km^2，中心城区面积约为5 146.66 km^2；根据第七次全国人口普查数据，常住人口为1 295.29万人。西安市主城区包括新城区、碑林区、莲湖区、未央区、雁塔区、灞桥区、长安区。

1.2 数据来源与处理

本文采用的数据包括西安市的OSM道路数据、行政边界数据，其中道路数据来源于OSM官网，行政边界数据来源于国家自然资源部网站。OSM为用户提供了免费且易于访问的数字地图资源，是目前最受欢迎的志愿者地理信息[12]，包含经纬度等基本的道路空间信息以及道路类型、最大行驶速度和单向街道等属性信息，数据实时且更新速度快。本文从OSM官网下载西安市2020年OSM道路数据，并进行格式转化。

2 研究方法

本文首先利用OSM数据构建城市道路网络；再计算道路网密度以反映不同区域的道路通达性，同时通过Infomap社区检测算法将城市道路网络划分为3个层次的社区；最后基于上述结果从全局和局部视角分析了西安市主城区的城市结构。

2.1 道路网络空间构建

城市内道路错综复杂，道路与道路之间相交形成众多节点，因此在很大程度上道路本身已形成一张复杂且庞大的网络；但OSM道路数据的属性只有线要素，没有节点要素，原始数据无法直接进行后续研究，因此需在已有道路数据的基础上构建网络空间，提取道路节点。首先将道路数据在相交处打断，提取道路的交点以及起点和终点作为复杂网络的节点V，将连接节点之间的路段作为复杂网络的边E，根据OSM数据的单向或双向属性确定边的方向，基于路段长度设置权重W，从而将道路构建为有向复杂网络$G\equiv(V,E,W)$；再将复杂网络存储为邻接表格式，便于后续社区检测计算。

2.2 道路网密度

道路网密度从长度上描述了城市的道路发展水平，是一个区域内道路总长度与区域面积的比值，可衡量道路网的发展规模，计算公式为[13]：

$$A=\frac{\sum_{i=1}^{n}l_i}{S}$$

道路网密度越大，说明该区域的道路通达性越高。

本文首先构建西安市主城区内300 m×300 m的渔网网格；再利用渔网网格对道路网络进行裁剪，将道路网映射到渔网网格内；然后计算落入每个网格内道路的总长度与网格面积的比值，得到西安市每个渔网网格内的道路网密度；最后将结果可视化。

2.3 社区检测算法

社区检测算法通过遍历网络的拓扑结构来寻找网络中最合理的分区，其中Infomap社区检测算法是目前性能最好的社区检测算法，能将复杂网络划分为多层次社区，并根据城市道路的规模确定社区的深度，层层递进挖掘深层次的社区结构。该算法将由n个节点构成的分区M划分为m个模块，尽可能地将随机游走的预期描述长度最小化，通过缩短步长达到分层社区检测的目的[14-15]。每个步骤平均描述长度的计算公式为：

$$L(M)=q_{\curvearrowright}H(\zeta)+\sum_{i=1}^{m}p_{\circlearrowright}^{i}H\left(P^{i}\right)$$

式中，$q_{\curvearrowright}$为随机游走离开不同模块的概率；$H(\zeta)$为模块编码的熵；$p_{\circlearrowright}^{i}$为模块$i$被访问的概率，即模块$i$中每个节点的遍历概率和离开概率的和；$H\left(P^{i}\right)$为模块内部节点编码的熵。

3 西安市主城区空间结构分析

3.1 路网分布密度

道路结构特征能在一定程度上表征城市区域发展特征，道路网密度能衡量路网的发展规模，进而反映区域发展水平，道路网密度越大的区域道路通达性越强、发展水平越高。西安市主城区的道路网密度见图1，本文将道路网密度分为9个等级，颜色越红，密度越

高，显而易见，新城区、莲湖区、雁塔区、未央区的内部道路网密度较大，这些区域也是市中心的核心组成部分；灞桥区的道路网密度略低于其余区；而长安区的道路网密度有明显区别，北部与雁塔区邻近的区域密度较高，南部区域密度则较低。西安市主城区内道路网密度整体在中等及以上水平，密度高的区域由内向外呈圈层式分布，最中心的区域为莲湖区、新城区与碑林区的交界处，该处为西安市最中心的区域，也是西安市发展最早的老城区；再以此为中心，逐渐向外层扩散。整体来看，西安市的道路空间呈现出圈层式分布结构，主要分布在主城区的北部区域，南部主要为长安区，长安区内部道路则呈现出北部更密集的现象。

上述结果表明，西安市主城区道路整体发展水平较高，以西安市老城区为中心，在主城区北部区域逐渐向外扩散分布，说明西安市主城区的道路发展为圈层式发展模式。长安区内道路呈现出明显的发展不均衡现象，北部发展水平高于南部。

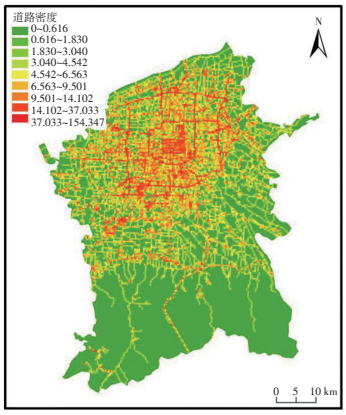


图1　西安市主城区道路网密度分布

3.2　全局空间结构分析

城市道路网络代表了城市空间的拓扑关系与连接关系，分层社区检测能挖掘不同阈值下的集聚社区，Infomap算法可通过遍历城市道路网络的拓扑关系，达到自动分割阈值的效果。Infomap算法根据不同的步长在不同尺度下对道路节点进行聚类，社区的深度取决于道路规模，基于此将城市道路网络划分为不同层次的社区，同一个道路社区内部的节点和空间结构联系更强、紧密度更高。

本文采用Infomap算法对西安市主城区的道路网络进行分层社区划分，根据西安市的道路网络规模，将检测深度设置为3层，得到3个层次的社区结构（图2）。从整体来看，西安市主城区被划分为8个社区，道路社区与行政区划具有较明显的差别，说明城市道路影响着各区之间的相互作用与交流，其中莲湖区、新城区和碑林区的交界处形成一个社区，该结果与道路网密度结果相似，表明该区域作为西安市老城区中心，已在道路空间上形成了其特有的内部联系；未央区内部形成了一个面积较大的社区，占据了未央区的大部分区域，仅与莲湖区和新城区有极小范围的交互，与前一个社区以北一环路为界分隔开；在未央区、莲湖区、雁塔区与长安区的交界处形成一个社区，将这4个区紧密联系起来；在长安区与雁塔区的交界处形成两个社区，长安区内又形成两个独立社区，并未与其他区有交互；灞桥区内部形成一个独立社区，与未央区和长安区有极小范围的联系。在主城区内部，灞桥区、未央区与其他各区在空间上的联系较少，而其余各区则互相影响形成多个道路社区，其中联系较紧密的是莲湖区、新城区与碑林区，长安区作为新兴的主城区，与雁塔区的联系十分紧密。综上所述，西安市主城区表现出多个中心共同发展的城市结构，老城区与周围各区互相影响，形成新的道路空间分布结构，由内向外逐渐扩展，将城市中心分散化，形成多个中心，从而达到促进城市快速发展的目的。

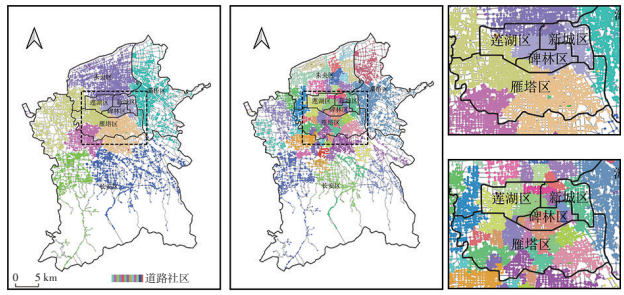


图2　西安市主城区第一层与第二层道路社区

3.3　局部空间结构

第一层道路社区反映了城市的全局空间结构，第二、三层道路社区是在其基础上的进一步内部划分，社区面积小，可具体到街道甚至功能区，因此更能反映城市的局部空间结构。由于城市中心道路密度大，第二层社区由内向外面积逐渐扩大，中心的社区面积非常小。从局部来看，新城区内部被划分为4个社区，主要分为东部和西部两部分，以经九路为界，东部形成一个面积较大的社区，西部则分别以解放路、大明宫遗址、麟德一路为中心形成3个社区；莲湖区内部也被划分为4个社区，横向以铁路线为界，纵向以星火路为界；碑林区内部形成4个社区，其中面积最大的社区以文艺路、太乙路为中心，西安交通大学兴庆校区、西北工业大学友谊校区则形成单独社区，和平路以自身为中心形成单独社区；未央区内部形成13个社区，其中面积较大的社区是以西安市行政中心为中心形成的社区；雁塔区内部，陕西师范大

学、大唐芙蓉园都形成各自的社区；灞桥区内形成两个社区；长安区内社区面积差异较明显，主要可分为北部和南部两部分，北部与雁塔区接壤，道路密度大，社区面积小，而由南向北道路密度逐渐减小，导致南部社区面积较大。

第三层社区是在第二层社区的基础上的进一步划分（图3），可以看出，莲湖区、新城区、碑林区与雁塔区内部的社区平均面积较小，以具体的小型功能区为核心组成单独社区，而以这4个区为中心，外圈各区内的第三层社区面积偏大，说明西安市内的道路结构呈明显的圈层结构，中心的道路早已发展成熟，外圈道路仍在逐渐发展扩张。其中较明显的是长安区，长安区内部形成的社区差异较大，说明其内部发展存在部分不平衡或目前正由北向南逐渐发展；而灞桥区作为近年来新建城区，在道路结构上表现出较明显的弱势；与中心区域相比，未央区内第三层社区面积较大。从整体来看，西安市主城区的第三层社区呈现出明显的圈层式发展结构。

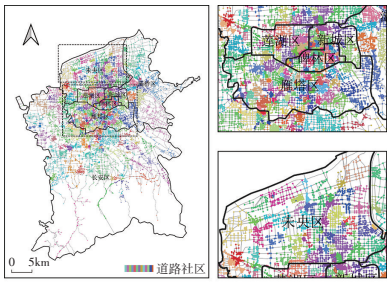


图3 西安市主城区第三层道路社区

在第二、三层社区划分结果中，雁塔区与碑林区、莲湖区、新城区的道路划分程度极为相似，说明在局部空间结构中，雁塔区的发展已十分成熟，主城区呈现出内圈强外圈弱的空间结构，各区内部则呈现出多中心的结构，而长安区内部表现出较明显的发展不均衡现象。

4 结 语

城市交通路网是城市经济活动的重要载体，在城市发展过程中具有重要作用。本文通过计算西安市主城区内部的道路网密度、识别多层次道路社区来研究其空间结构。

1）西安市主城区道路整体发展水平较高，呈圈层式分布结构，以老城区为中心，在主城区北部区域逐渐向外扩散分布。长安区内道路呈现出明显的发展不均衡现象，北部发展水平高于南部。

2）从全局尺度来看，西安市主城区被划分为8个社区，其中莲湖区、新城区和碑林区联系紧密，长安区与雁塔区联系密切，而未央区与灞桥区则形成各自独立的社区，并未与其他区域有太多的空间上的交互。整体表现出多个中心共同发展的城市结构，老城区与周围各区互相影响，形成新的道路空间分布结构，由内向外逐渐扩展，将城市中心分散化，形成多个中心。

3）从局部尺度来看，各区内部发展均衡，只有长安区内部出现较明显的南北差异，雁塔区发展已十分成熟。主城区呈现出中心强外圈弱的空间结构，各区内部呈现出多中心的结构，而长安区内部表现出发展不均衡的现象。

参考文献

[1] 席强敏,李国平. 超大城市规模与空间结构效应研究评述与展望[J]. 经济地理,2018,38(1):61-68

[2] 李传斌. 西安市城市空间结构演替研究[D]. 西安:西北大学,2002

[3] 王彦君,刘科伟. 近现代以来西安市社会空间结构演变研究[J]. 城市发展研究,2018,25(2):130-134

[4] 魏石梅,潘竟虎. 基于夜间灯光和微博签到数据的郑州市城市空间结构识别[J]. 遥感技术与应用,2022,37(3):771-780

[5] 郑晓伟,权瑾. 基于空间句法的西安城市网络拓扑结构优化研究[J]. 规划师,2008,24(12):49-52

[6] 胡璐嘉,郑新奇,郑劭颖. 基于空间句法的元明清北京城市功能时空演变分析[J]. 地理空间信息,2022,20(2):71-78

[7] 黄伟力. 基于POI的城市空间结构分析:以北京市为例[J]. 现代城市研究,2017(12):87-95

[8] 吴凤敏,郑稚棚,梁均军,等. 基于NPP/VIIRS数据的重庆市城市空间发展变化分析[J]. 地理空间信息,2021,19(5):45-50

[9] 李琛强,娄宁,杨永崇,等. 西安市路网时空演变与城市空间变化关系研究[J]. 测绘科学,2021,46(11):173-180

[10] 吴凡,石飞,肖沛余,等. 城市路网布局结构对公共交通出行的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2019,41(4):520-528

[11] 石飞,王炜. 城市路网结构分析[J]. 城市规划,2007,31(8):68-73

[12] 丁彦文,许捍卫,汪成昊. 融合OSM路网与POI数据的城市功能区识别研究[J]. 地理与地理信息科学,2020,36(4):57-63

[13] 李艳,王鹏飞. 基于GIS的道路网密度空间分异特征:以河北省石家庄市为例[J]. 河北科技师范学院学报,2018,32(4):41-47

[14] Rosvall M, Bergstrom C T. Maps of Random Walks on Complex Networks Reveal Community Structure[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2008,105(4):1 118-1 123

[15] Huffman D A. A Method for the Construction of Minimum-redundancy Codes[J]. Resonance,2006,11(2):91-99