引文格式：韩宇瑶 ,张郁 ,王明省,等. 城市路网结构与用地功能关联分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 11-19. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.003

城市路网结构与用地功能关联分析

韩宇瑶[1,2,3]，张　郁[1,2,3*]，王明省[1,2,3]，林婉斯[1,2,3]，吴　辉[1,2,3]
（1. 广州市城市规划勘测设计研究院，广东 广州 510060；2. 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心，广东 广州 510060；
3. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室，广东 广州 510060）

摘　要：为辅助城市道路规划与土地利用规划布局，以武汉都市发展区为研究区，综合利用核密度估计法、多中心评价模型和空间相关分析划定研究尺度，挖掘路网结构与城市用地功能的空间关联特征。结果表明，不同尺度下路网结构中心性指标与城市用地功能利用强度均呈显著正相关，局部空间集聚特征明显，主要呈现高—高集聚、低—低集聚的空间关联模式；公共管理与公共服务设施用地功能、交通设施用地功能对路网结构中心性的依赖性较强，而工业用地功能的依赖性较弱；研究单元可划分为单一功能型区域与混合功能型区域，单一功能型区域布局受邻近度影响较大，混合功能型区域布局对邻近度与平直性的依赖性更强。研究结果可为城市重要项目选址和用地功能布局提供参考。

关键词：路网结构中心性；城市用地功能；核密度估计；多尺度；空间关联
中图分类号：TU984　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0011-09

Correlation Analysis of Urban Road Network Structure and Land-use Functions

HAN Yuyao[1,2,3], ZHANG Yu[1,2,3], WANG Mingsheng[1,2,3], LIN Wansi[1,2,3], WU Hui[1,2,3]
(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China;
2. Collaborative Innovation Center for Natural Resources Planning and Marine Technology of Guangzhou, Guangzhou 510060, China;
3. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China)

Abstract: In order to assist urban road planning and land-use planning layout, we explored the correlation between urban road structure and land-use functions at different scales based on kernel density estimation, multiple centrality analysis model and spatial correlation analysis in Wuhan metropolitan area. The results show that there are significant positive correlations between the centrality of road network structure and the intensity of urban land-use functions at different scales. The local spatial agglomerations are obvious, and the spatial association patterns of high-high agglomeration and low-low agglomeration are mainly presented. The functions of public management and public service facilities and transport facilities strongly depend on the road network structure centrality, while the industry land-use function is less dependent on it. At the scale of grid, research grids can be divided into single-function zones and mixed-function zones. The layout of single-function zones is most affected by closeness centrality, while the layout of mixed-function zones is more dependent on closeness centrality and straightness centrality. The research results can provide reference for the location selection and functional layout of important urban projects.

Key words: road network structure centrality, urban land-use function, kernel density estimation, multi-scale, spatial correlation

《雅典宪章》指出：城市包含居住、工作、游憩和交通 4 大功能，交通是其他 3 项城市功能的基础，是构成城市内外人员、物资等要素沟通联系的前提[1]。众多不同等级、不同布局、不同功能的道路形成了一个有层次、有联系的城市道路网，塑造了城市结构，是城市系统的“骨架”，连接起城市的各个部分[2]，并通过改变路网结构等方式引发城市用地功能空间结构的变化。城市用地功能是指城市土地为满足城市建设的相关功能，如居住用地、工业用地、公共管理与公共服务设施用地等，可反映城市的土地利用状况[3]。城市用地功能布局决定了城市中各要素的空间分布，进而影响人的出行路线与方式。不同的城市用地功能布局对道路网络结构存在不同的影响和要求[4]。

随着我国城镇化与机动化水平的不断提高，城市道路交通和土地开发利用之间的不协调愈发明显，主

收稿日期：2023-07-03。
项目来源：广州市资源规划和海洋科技协同创新中心资助项目（2023B04J0301、2023B04J0326）；广东省重点领域研发计划资助项目（2020B0101130009）；广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金资助项目（2020B121202019）。
第一作者简介：韩宇瑶（1993—），硕士研究生，工程师，研究方向为地理空间分析与土地资源利用，E-mail：125326045@qq.com。
通信作者：张郁（1987—），硕士研究生，高级工程师，注册测绘师，研究方向为地理空间分析与测绘，E-mail：526639850@qq.com。

要包括城市交通系统结构与土地高密度开发的不协调、城市新区大规模建设与所需交通设施建设延迟的不协调。如何促进城市道路交通网络与土地利用的协调发展是亟待解决的问题[5]；而解决该问题的前提是了解城市道路交通网络与土地利用的关联关系。随着路网可达性对城市土地利用影响的研究的兴起，路网结构中心性作为衡量路网可达性与社会经济活动关系的有效手段，成为研究城市土地利用的重要路网结构指标，如Wang F[6]等研究了巴吞鲁日土地利用强度与交通中心性的关系；Rui Y[7]等发现斯德哥尔摩地区道路中心性对各类土地利用的空间分布具有显著影响；沈体雁[8]等讨论了服务业区位对于交通网络的选择；吕永强[9]等解析了北京中心城区用地功能布局的交通导向特征。以往研究多集中于分析路网中心性与某一种城市用地功能的关联关系，研究尺度与城市用地功能划分单一，大多直接采用圈层、街道或格网中的某一个尺度；且城市用地功能划分粗糙，通常只考虑单一城市用地功能，对路网中心性与城市内部各区域混合用地功能类型关联关系的探讨不够充分。基于此，本文以武汉都市发展区为例，综合利用核密度估计法、多中心性评价模型和双变量相关法，比较分析了在缓冲半径为1 km的圈层尺度、街道尺度以及1 km×1 km格网尺度下，路网结构中心性指标与城市用地功能利用强度的空间分布特征和关联性，并根据分析结果为后续研究划定空间尺度，进一步分析了路网结构与城市内部混合用地功能类型之间的空间关联关系。

1 研究区概况与数据来源

本文选取武汉都市发展区为研究区（图1）。武汉市地理范围为113°41′~115°05′E、29°58′~31°22′N，是华中地区最大的工商业城市，地处长江中下游江汉平原东北部[10]，长江最大支流汉江与长江在此交汇[11]，形成汉口、武昌、汉阳三镇鼎立格局[12]。武汉都市发展区以外环高速公路附近的乡、镇行政边界为基本界线，总面积为3 261 km²，是城市功能的主要集聚区和城市空间重点拓展区[13]。

本文采用的数据包括武汉都市发展区内的矢量路网数据和兴趣点（POI）数据。矢量路网数据来源于OpenStreetMap，构建由边和节点构成的道路网络数据集，测度道路网络的节点中心性（邻近度、中介性、平直性），将每条道路两端节点的中心性值求和取均值后作为该道路的中心性值。POI数据来源于网络电子地图，共有511 909条记录。由于初始POI数据分类较多，且各类型之间性质交叉，因此需对其进行重分类。结合2011年最新版城市用地分类与规划建设用地标准，参考池娇[14]等的研究结果，将初始POI数据重新整理归纳为商业服务业设施用地功能（占比约为54.22 %）、居住用地功能（占比约为18.57 %）、工业用地功能（占比约为1.74 %）、公共管理与公共服务设施用地功能（占比约为24.44 %）、绿地与广场用地功能（占比约为0.65 %）、交通设施用地功能（占比约为0.38 %）6大类。

结合居民日常出行距离单位，本文选取缓冲半径为1 km的圈层、街道以及1 km×1 km格网作为多尺度空间研究单元，其中圈层有43个、街道有171条、格网有3 372个。

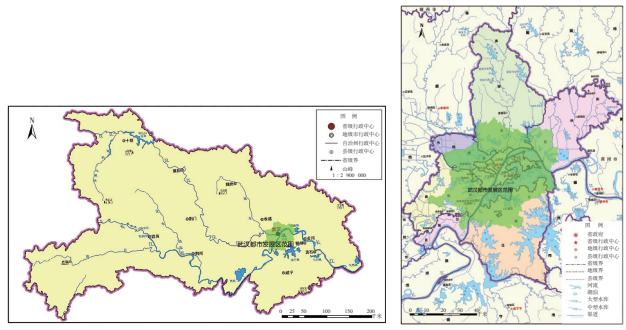


图1 武汉都市发展区概况

审图号：鄂S(2024)023号

2 研究方法

2.1 核密度估计法

核密度估计法能反映距离衰减规律[15]，是地理空间数据挖掘的非参数估计方法[16]，可表达城市空间POI点的分布模式、分布密度等特征。本文基于ArcGIS的核密度分析功能，分别对各类用地功能POI与路网中心性指标进行核密度估计，得到其空间分布。其计算公式为：

$$f(s)=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{h^2}k\left(\frac{s-c_i}{h}\right) \tag{1}$$

式中，h为距离衰减阈值；n为与位置s的距离小于等于h的要素点数量；$k(\cdot)$为空间权重函数。

2.2 多中心评价模型

多中心评价模型是中心性评价的重要方法。常用的中心性指标包括邻近度、中介性与平直性。本文通过ArcGIS平台得到武汉都市发展区道路网络的邻近度、中介性与平直性。

1）邻近度定义为某一节点到其他所有节点平均距离的倒数，平均距离越小，邻近度越大[17]，可反映路网中某一节点与其他节点之间的接近程度。其计算

公式为：

$$C_i^{\mathrm{C}}=\frac{1}{\sum_{i=1,j\neq 1}^{N} d_{ij}} \tag{2}$$

式中，N 为交通网络节点数量；d_{ij} 为节点 i 与 j 之间的最短路径距离。

2）中介性认为穿过某一节点的最短路径越多，该节点中心性就越高，最短路径连接路网任意两个节点[17]。其计算公式为：

$$C_i^{\mathrm{B}}=\sum_{j=1,k=1,j\neq k\neq i}^{N}\frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \tag{3}$$

式中，n_{jk} 为节点 j 与 k 之间最短路径数量；$n_{jk}(i)$ 为节点 j 与 k 之间最短路径中穿过节点 i 的最短路径数量。

3）平直性可衡量路网中两个节点间最短路径与直线路径的偏离程度，偏离程度越小，平直性越好，交通效率越高[17]。其计算公式为：

$$C_i^{\mathrm{S}}=\sum_{j=1,j\neq k}^{N}\frac{d_{ij}^{\mathrm{Eucl}}}{d_{ij}} \tag{4}$$

式中，d_{ij}^{Eucl} 为节点 i 与 j 之间的欧氏距离。

2.3　双变量相关分析

Pearson相关系数可度量两个变量之间的线性相关性，其值介于1和–1之间，越接近于1或–1，相关度越强；越接近于0，则相关度越弱。本文将路网结构中心性指标分别与城市用地功能利用强度进行双变量相关分析，比较其相关方向和程度。其计算公式为[18]：

$$r=\frac{\sum\left(X-\bar{X}\right)\left(Y-\bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum\left(X-\bar{X}\right)^2\sum\left(Y-\bar{Y}\right)^2}} \tag{5}$$

式中，X、Y 为两个不同变量，本文中 X 为路网结构中心性，Y 为城市用地功能利用强度。

2.4　空间自相关分析

空间自相关分析用于度量空间单元属性值的集聚程度，反映空间单元属性值与其邻域属性值是否存在空间关联性，可揭示空间变量区域分布的内在联系与结构形态。空间自相关包括全局空间自相关与局部空间自相关。全局空间自相关主要用于描述连续分布地理现象的区域空间特征以及衡量区域之间整体的空间关联和空间差异程度，通过比较邻近空间单元属性值的相似或相异程度来分析地理现象的空间分布模式及其显著性[19]。采用全局Moran's I指数进行分析，数值大小表示空间邻近单元属性值的相似程度[20]，计算公式为[21]：

$$I=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{6}$$

式中，n 为研究区空间单元数量；x_i、x_j 分别为空间变量在单元 i、j 上的属性值；$\bar{x}$ 为所有研究对象属性的平均值；w_{ij} 为空间单元 i、j 的权重。I 指数的取值在–1~1之间，若大于0且越接近1，表示相似的空间变量分布趋于集聚；若小于0且越接近–1，表示相似的空间变量分布趋于分散；若 I 为0，则表示研究对象的空间分布不存在相关性或呈随机分布。

局部空间自相关用于进一步度量每个地域单元与其邻近空间单元属性值之间的相关性[22]，可确定区域空间聚集过程并识别其空间集聚模式[23]，采用空间关联的局部指标集聚图（LISA图）进行表征[21]。局部空间自相关的计算公式为：

$$I_i=\frac{(x_i-\bar{x})}{S^2}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_j-\bar{x}) \tag{7}$$

本文结合全局Moran's I指数与LISA图，分析路网结构中心性与城市用地功能的整体空间分布模式与关联程度以及两个变量的局部空间聚合模式，挖掘其空间关联特征。

3　研究结果与分析

3.1　路网结构与城市用地功能多尺度空间分布特征

在缓冲半径为1 km的圈层、街道和1 km×1 km格网3种尺度下，路网结构中心性指标空间分布见图2~4，可以看出，邻近度、中介性和平直性在不同尺度下的空间分布特征具有相似性与分异性，不同尺度下邻近度和中介性整体呈从中心城区到外围城区逐渐衰减的趋势，平直性高值区处于部分中心城区与外围城市干道；邻近度在圈层尺度下与实际情况吻合度最高，格网尺度下细节显示最多；中介性和平直性则是在格网尺度下与实际最吻合，在圈层尺度下与实际差距较大。

通过对POI数据进行筛选重分类，并结合核密度估计法得到武汉都市发展区在缓冲半径为1 km的圈层、街道和1 km×1 km格网3种尺度下的城市用地功能强度空间分布（图5~10），可以看出，不同城市用地功能在不同尺度下的空间分布特征同样具有相似性与分异性，除工业用地功能外，其他各类城市用地功能总体上集聚分布在中心城区，集聚程度从中心城区向外围逐渐衰减，部分用地功能在外围城区有零散集聚点，工业用地功能布局较分散，相对集中于外围城

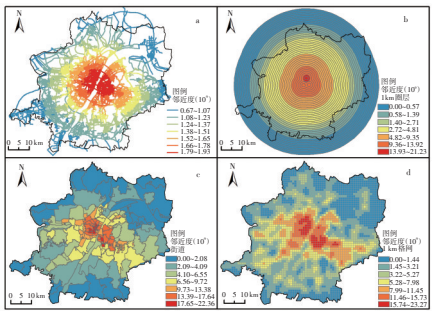


图2　路网邻近度及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

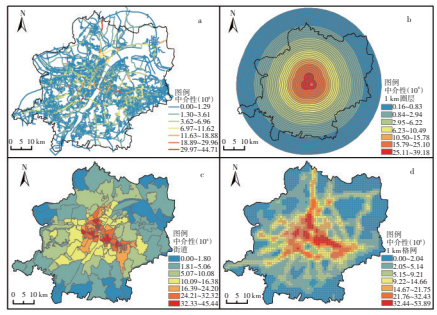


图3　路网中介性及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

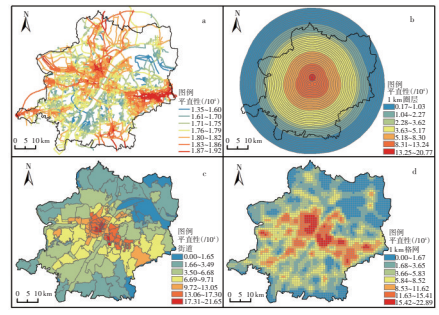


图4　路网平直性及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

区；不同城市用地功能在圈层尺度下的空间分布均与实际差别较大，在格网尺度下的空间分布细节显示最突出，在街道尺度下的空间分布与实际大致吻合，但对细节的刻画不足。基于上述对路网结构与城市用地功能多尺度空间分布特征的分析，展开对二者关联关系的探讨。

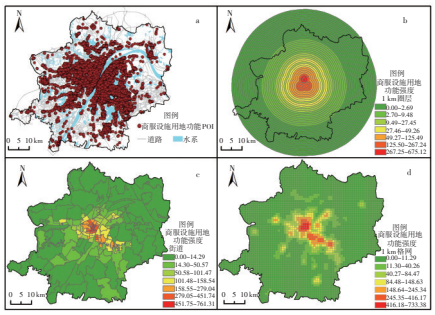


图5　商业服务业设施用地功能POI及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

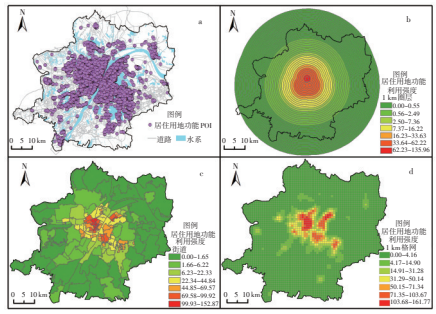


图6　居住用地功能POI及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

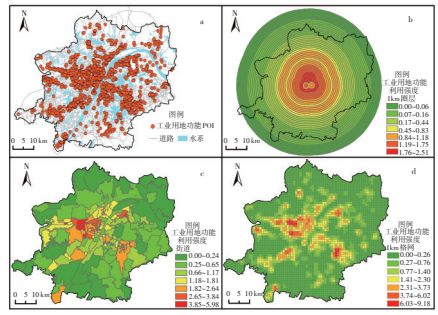


图7　工业用地功能POI及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

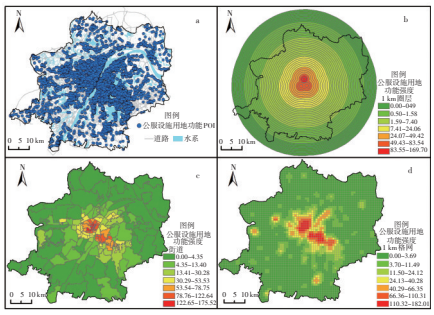


图8　公共管理与公共服务设施用地功能POI及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

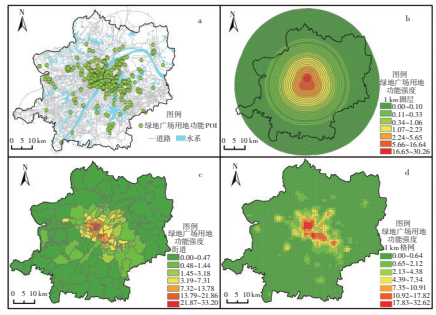


图9　绿地与广场用地功能POI及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

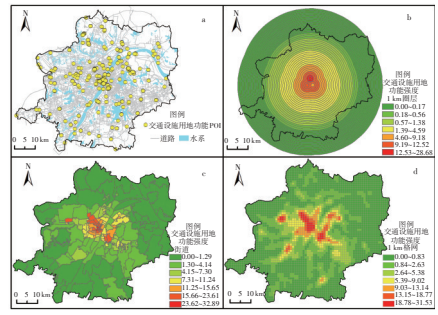


图10　交通设施用地功能POI及其不同尺度下的空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

3.2　路网结构与城市用地功能多尺度关联关系

在圈层、街道和格网尺度下，采用Pearson相关系数度量武汉都市发展区路网结构中心性指标与不同城市用地功能的关联关系（表1），结果表明，二者在3个空间尺度下均呈现显著正相关关系。

从路网结构中心性指标来看，在圈层、街道尺度下，邻近度、平直性与各类城市用地功能利用强度的相关程度高于中介性；在格网尺度下，邻近度、中介性与各类城市用地功能利用强度的相关程度高于平直性。在不同尺度下，相较于平直性和中介性，邻近度与各类城市用地功能利用强度的相关系数均最高，说明邻近度在不同尺度下比平直性和中介性更能反映对各类城市用地功能空间分布的影响。

从各类城市用地功能来看，不同尺度下交通设施用地、公共管理与公共服务设施用地的功能利用强度总体与路网结构中心性指标的相关程度较高，说明这两类用地功能空间分布对路网结构中心性具有较强的依赖性。交通设施用地功能主要包括收费站、服务区

等道路附属设施以及飞机场、火车站、汽车站等交通服务设施，多沿道路设置或选址在可达性好、交通流量大的地区，对路网结构依赖性较强。公共管理与公共服务设施用地功能包括公共设施、科教文化、体育休闲、医疗保健与政府机构等，主要面向公众提供服务，多位于可便捷到达且交通流量较大的地区，因此与路网结构中心性的相关性较强，对路网结构依赖程度较高。

从研究尺度来看，总体上路网结构中心性指标与各类城市用地功能利用强度间的相关性强度为圈层尺度>街道尺度>格网尺度。圈层尺度对指标的概括性最强，融合了指标空间分布的细节差异，因此在该尺度下路网结构中心性指标与各类城市用地功能利用强度间的相关性最强；街道尺度显示了指标空间分布上的部分细节特征，概括性稍逊于圈层尺度，相关系数在3个尺度里居中；而格网尺度对路网结构中心性与城市用地功能各指标的空间分布细节信息刻画得最细致，增加了“噪声”的影响，因此相关性最低，但仍属于高度显著相关。由上述分析可知，路网结构与城市用地功能多尺度空间分布特征在格网尺度下与实际最相符，而在圈层尺度下与实际最不相符，这与不同尺度的相关性强度排序相反，因此不能仅凭Pearson相关分析简单地判定路网结构与城市用地功能关联性最强的尺度，还需结合二者的空间差异与变化，进一步分析路网结构与城市各区域混合用地功能类型的关联关系，进而选择合适的研究尺度。

表1　不同尺度路网结构中心性指标与城市用地功能利用强度Pearson相关分析

研究尺度	中心性	商服设施用地功能	居住用地功能	工业用地功能	公服设施用地功能	绿地广场用地功能	交通设施用地功能
圈层	邻近度	0.849**	0.930**	0.946**	0.905**	0.852**	0.939**
	中介性	0.799**	0.896**	0.918**	0.862**	0.816**	0.911**
	平直性	0.827**	0.908**	0.951**	0.882**	0.827**	0.923**
街道	邻近度	0.843**	0.873**	0.610**	0.896**	0.829**	0.898**
	中介性	0.731**	0.788**	0.550**	0.805**	0.734**	0.755**
	平直性	0.814**	0.855**	0.632**	0.867**	0.797**	0.884**
格网	邻近度	0.724**	0.730**	0.568**	0.747**	0.686**	0.794**
	中介性	0.675**	0.662**	0.521**	0.696**	0.640**	0.702**
	平直性	0.640**	0.649**	0.563**	0.666**	0.601**	0.731**

注：**表示在0.01水平（双侧）上显著相关。

采用空间自相关分析路网结构中心性指标与各类城市用地功能的双变量空间关联特征，全局空间自相关分析结果见表2，可以看出，在不同尺度下路网结构中心性指标与各类城市用地功能利用强度的全局Moran’s I指数均为正值，且均通过显著性检验，其中格网、街道尺度下的置信度水平整体高于圈层尺度，表明不同尺度下路网结构中心性指标与各类城市用地功能利用强度均呈显著空间正相关性，二者的空间分布呈集聚态势，即各类城市用地功能集聚分布在路网结构中心性高值区附近，且格网、街道尺度下的显著性高于圈层尺度。

综合比较上述结果，从路网结构中心性指标来看，在不同尺度下邻近度与各类城市用地功能利用强度的全局Moran’s I指数最高，说明邻近度更能反映对各类城市用地功能空间集聚程度的影响；从城市用地功能来看，在不同尺度下工业用地利用强度与路网中心性指标的全局Moran’s I指数最低，说明工业用地功能的空间分布对路网结构中心性的依赖性较弱；从研究尺度来看，全局Moran’s I指数及其Z值在格网尺度下取值最大、街道次之、圈层最小，说明在格网尺度下二者的空间正相关性最强，空间集聚特征最显著，在街道尺度下二者的空间正相关性适中，在圈层尺度下二者的空间正相关性较弱，空间集聚程度较低。

路网结构中心性指标与各类城市用地功能的双变量局部空间自相关分析结果见图11~13，可以看出，不同尺度下路网结构中心性指标与各类城市用地功能利用强度局部空间集聚特征明显，主要呈现高—高集聚与低—低集聚的空间关联模式；在圈层尺度下二者的主要局部空间关联模式为中心城区的高—高集聚和外围城区的低—高集聚，其中外围城区的低—高集聚与二者空间分布特征矛盾；在街道、格网尺度下的空间集聚特征较明显，主要呈现中心城区的高—高集聚和外围城区的低—低集聚，说明中心城区道路密集、交通流量大、效率高的路网结构中心性高值区附近各类城市用地功能利用强度相应较高，分布较集聚，外围城区路网结构中心性低值区则相反，这与前述研究中路网结构与城市用地功能的空间分布特征及其相关性结果大致吻合。然而，在街道尺度下还呈现过渡地区的低—高集聚，这与路网结构和各类用地功能的空间分布存在偏差，且对研究区西南江夏区等外围城区

表2　不同尺度路网结构中心性指标与城市用地功能利用强度全局Moran's I分析结果

研究尺度	中心性	利用强度	商服设施用地功能	居住用地功能	工业用地功能	公服设施用地功能	绿地广场用地功能	交通设施用地功能
圈层	邻近度	Moran's I	0.314 8	0.219 9	0.117 2	0.220 6	0.261 0	0.201 1
		$Z(I)$	7.006 7	4.751 1	2.523 3	4.866 7	5.860 7	4.347 4
		P值	0.002	0.003	0.021	0.004	0.003	0.006
	中介性	Moran's I	0.249 8	0.165 4	0.079 54	0.165 9	0.203 3	0.148 0
		$Z(I)$	5.776 3	3.735 8	1.853 1	3.286 7	4.726 6	3.374 6
		P值	0.003	0.008	0.041	0.009	0.007	0.01
	平直性	Moran's I	0.312 7	0.219 6	0.115 9	0.220 5	0.259 9	0.200 8
		$Z(I)$	6.942 8	4.736 5	2.489 9	4.852 7	5.834 5	4.330 2
		P值	0.002	0.002	0.02	0.003	0.003	0.004
街道	邻近度	Moran's I	0.534 4	0.576 2	0.467 1	0.590 3	0.502 9	0.600 2
		$Z(I)$	12.846 2	13.852 0	12.215 1	13.844 1	13.105 7	14.449 4
		P值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	中介性	Moran's I	0.548 9	0.571 1	0.433 9	0.599 3	0.521 6	0.596 2
		$Z(I)$	13.850 1	14.031 1	11.551 5	14.658 2	13.890 7	15.304 0
		P值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	平直性	Moran's I	0.509 2	0.548 8	0.466 4	0.562 5	0.471 7	0.577 6
		$Z(I)$	12.424 4	13.311 4	12.214 3	13.372 2	12.575 3	14.003 3
		P值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
格网	邻近度	Moran's I	0.683 5	0.675 1	0.533 9	0.711 0	0.621 4	0.751 6
		$Z(I)$	59.488 0	59.921 8	51.864 0	60.729 5	57.628 7	65.492 5
		P值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	中介性	Moran's I	0.642 1	0.621 9	0.493 1	0.666 7	0.592 4	0.669 3
		$Z(I)$	58.969 0	57.248 2	47.901 8	59.563 5	56.199 0	62.369 6
		P值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	平直性	Moran's I	0.598 2	0.593 7	0.522 9	0.627 9	0.533 2	0.684 2
		$Z(I)$	53.992 2	55.012 6	50.969 4	55.556 2	51.792 6	61.322 1
		P值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

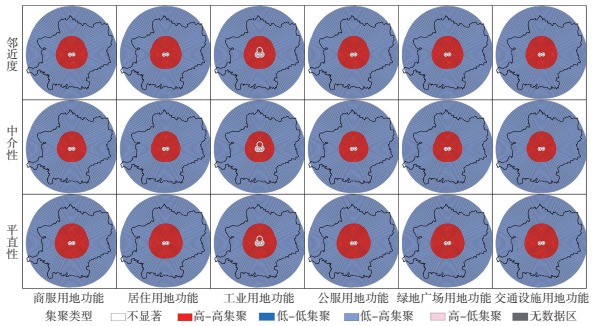


图11　圈层尺度下路网结构中心性指标与城市用地功能空间集聚图

审图号：鄂S(2024)023号

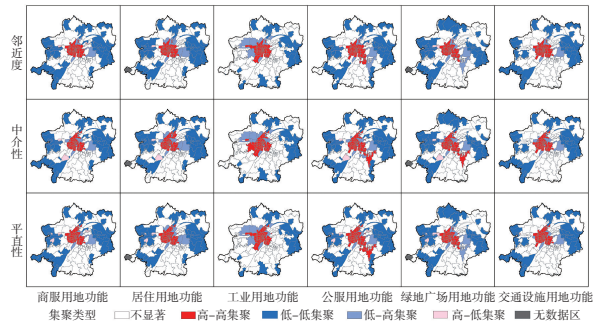


图12　街道尺度下路网结构中心性指标与城市用地功能空间集聚图

审图号：鄂S(2024)023号

空间集聚的识别较差；但格网尺度则能较清晰地表示局部空间的相关细节信息。

3.3　多尺度关联关系综合比较与尺度选择

综上所述，在1 km×1 km格网尺度下对路网结构与城市用地功能关联关系的刻画相对清晰细致，与二者的实际空间分布最吻合，适合作为进一步分析路网结构与城市内部混合用地功能类型关系的研究尺度。利用1 km×1 km格网尺度单元内城市用地功能POI的核密度占比对城市各区域混合用地功能类型进行分区识别，将混合不同用地功能类型的城市格网单元划分为单一功能型区域和混合功能型区域两大类。本文设定在格网单元内若有某一类城市用地功能POI的核密度最大且占比大于50%，则该类用地功能在格网单元内占据主导地位，该格网单元属于单一功能型区域，功能区利用强度为该

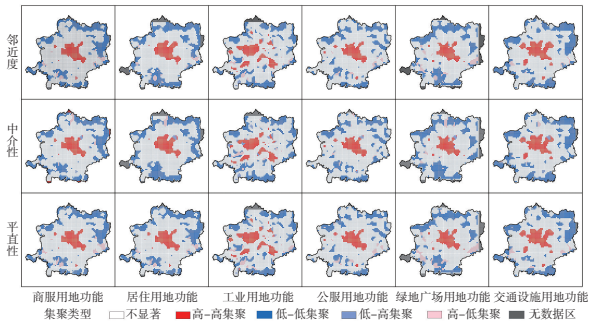


图13　格网尺度下路网结构中心性指标与城市用地功能空间集聚图

审图号：鄂S(2024)023号

类用地功能POI的核密度；若没有任何一类用地功能POI的核密度占比大于50%，则该格网单元属于混合功能型区域，核密度较大且占比之和大于50%的几类城市用地功能POI在格网单元内占据主导地位，这几类城市用地功能POI的核密度即为功能区利用强度。根据上述原则，划定武汉都市发展区格网尺度下单一功能型区域与混合功能型区域，并细化其具体类型。单一功能型区域的格网单元数量为1 738个，占比约为52%，主要包括5种具体类型；混合功能型区域的格网单元数量为1 229个，占比约为37%，主要包括9种具体类型（图14）。总体来看，单一功能型区域在武汉都市发展区中的占比略高于混合功能型区域，二者差距不大，共同承担各项城市活动，其中商服设施用地功能和公服设施用地功能比较突出，占据主导地位，居住与交通设施用地功能次之，工业与绿地广场用地功能处于弱势，且由于绿地广场用地功能在研究区内处于次要地位，在极少部分区域中与其他用地功能共同发挥主导作用，未能形成单一的绿广功能型区域。

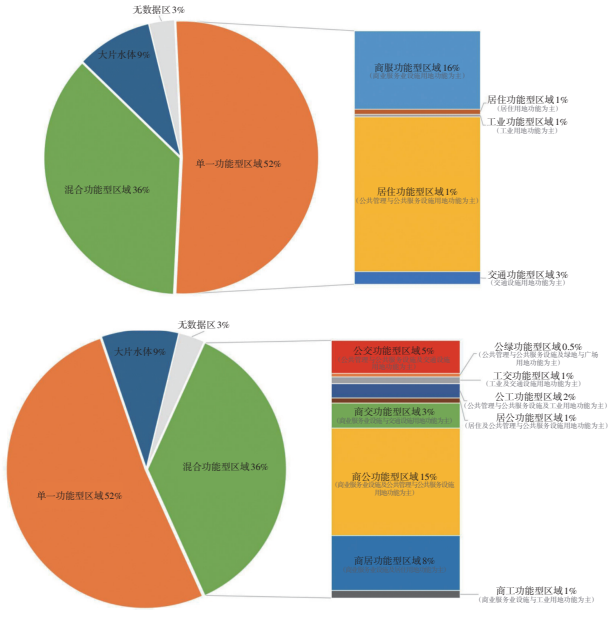
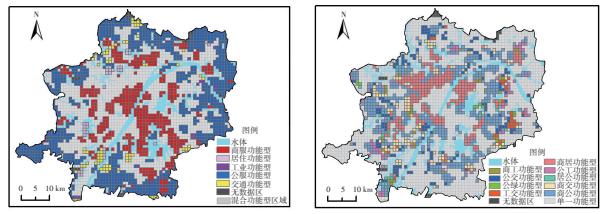


图14　城市用地功能区域分类与占比

从空间分布来看（图15），单一功能型区域整体分布在武汉都市发展区的中心城区和外围城区边缘部分，另有少部分散布在中心城区与外围城区交界的过渡地带，其中商服功能型区域主要呈现“大集中、小分散”的多组团分布特征，在城市中心区域形成最大核心组团，并围绕主核心在过渡地带形成多个分散的次级组团，包括餐饮服务、购物服务等商业服务业设施；公服功能型区域主要沿外围城区边缘成片分布，主要包括乡镇政府机构、乡镇医院等公共管理公共服务设施；居住、交通与工业功能型区域则零散分布在外围城区。混合功能型区域整体分布在中心城区核心区域和外围城区边缘区域之间，其中商公功能型区域在外围城区呈多组团广泛分布；商居功能型区域紧紧围绕商服功能型区域呈环状分布；公交功能型区域与商交功能型区域在外围城区呈环状分布；其他混合功能型区域零星分布在外围城区。



a 单一功能型　　b 混合功能型

图15　单一功能型和混合功能型区域空间分布

审图号：鄂S(2024)023号

3.4　路网结构与城市各区域混合用地功能类型关联关系分析

相关分析结果显示（表3），工业功能型区域与路网结构中心性指标不具有显著相关性，其他单一功能型区域与路网结构中心性指标均呈显著正相关关系，说明除工业功能型区域外，邻近度、中介性与平直性对其他单一功能型区域利用强度均有显著影响，其他单一功能型区域的布局依赖于路网结构中心性。从路网结构中心性指标来看，邻近度与单一功能型区域利用强度的相关程度最高，平直性和中介性较低，说明邻近度更能反映对单一功能型区域利用强度的影响。从具体类型来看，路网结构中心性指标与单一功能型

表3　路网中心性与单一功能型区域利用强度Pearson相关分析结果

中心性	商服功能型区域	居住功能型区域	工业功能型区域	公服功能型区域	交通功能型区域
邻近度	0.817**	0.644**	0.280	0.461**	0.513**
中介性	0.726**	0.364*	0.172	0.399**	0.453**
平直性	0.779**	0.566**	0.322	0.377**	0.493**

注：*表示在0.05水平（双侧）上显著相关；**表示在0.01水平（双侧）上显著相关。

区域利用强度的正相关性强度为商服功能型区域>居住功能型区域>交通功能型区域>公服功能型区域>工业功能型区域。商服功能型区域承担了城市大部分的经济活动，竞租能力强并提供了主要就业岗位，因此区位布局通常在道路可达性高、通勤方便的区域，对路网结构中心性的依赖性强；受职住分离的影响，为方便居民日常通勤，居住功能型区域布局需尽量选择路网结构中心性高的交通便利区域；交通功能型区域多为依附于道路的车站、服务区等交通服务与附属设施，公服功能型区域往往需要面向公众，这两类功能区一般布局在方便到达的地方。与商服功能型区域相比，居住、交通与公服功能型区域的布局虽然要求较高的路网结构中心性，但受竞租水平的限制，与路网结构中心性的相关程度略低；而工业功能型区域数量较少且散布于外围城区，无需公众频繁到访，对交通流量与效率的要求较低。

相关分析结果显示（表4），除商工、公绿和工交功能型区域外，路网结构中心性指标与各类混合功能型区域利用强度的相关系数均呈现显著正相关关系，说明除上述3类区域外，邻近度、中介性和平直性对其他混合功能型区域利用强度均有显著影响，其他混合功能型区域的布局倾向于选择路网结构中心性高值区。从路网结构中心性指标来看，邻近度、平直性与混合功能型区域利用强度的相关程度较高，中介性较低，说明邻近度、平直性对混合功能型区域利用强度的影响更大，道路密集、连接性好且交通效率高的地区更易吸引混合功能型区域布局。从具体功能区类型来看，路网结构中心性指标与混合功能型区域利用强度的正相关性强度为商居功能型区域>商公功能型区域≈居公功能型区域>商交功能型区域>公交功能型区域>公工功能型区域>工交功能型区域>公绿功能型区域>商工功能型区域。商居、商公、居公、商交功能型区域的利用强度与路网结构中心性指标的相关性较强，Pearson相关系数在0.5~0.8之间；公交、公工功能型区域次之，Pearson相关系数在0.3~0.6之间。商居、商公、居公和商交功能型区域主要包括大量商服、公服和居住用地功能，与居民工作生活息息相关，且毗邻商服和公服功能型区域，往往布局在路网连通性好、通勤效率高的路网结构中心性高值区；公交和公工功能型区域主要布局在外围城区，且包含较多工业活动，对路网交通中心性的要求较低。商工功能型区域利用强度与路网结构中心性指标不具有显著相关性；公绿功能型区域利用强度仅在0.05置信度水平下与中介性显著正相关；工交功能型区域利用强度与邻近度、平直性显著正相关，与中介性的相关性则不显著。这几类混合功能型区域的数量较少且分布分散，主要包括工厂、产业园区等工业用地功能，收费站、服务区等交通设施用地功能，村委会等级别较低的公共管理公共服务设施用地功能以及区域性的社区公园、生态园等绿地与广场用地功能，多位于外围城区且无需与城市其他区域有频繁的交流，对路网交通效率与流量的要求较低。

表4 路网结构中心性与混合功能型区域利用强度Pearson相关分析结果

中心性	商工	公绿	商居	商公	商交	公工	公交	居公	工交
邻近度	0.189	0.346	0.739**	0.678**	0.631**	0.473**	0.526**	0.695**	0.601**
中介性	0.282	0.607*	0.533**	0.602**	0.500**	0.318**	0.498**	0.520**	0.330
平直性	0.171	0.134	0.708**	0.598**	0.555**	0.490**	0.512**	0.614**	0.617**

注：*表示在0.05水平（双侧）上显著相关；**表示在0.01水平（双侧）上显著相关。

4 结 语

本文以武汉都市发展区路网结构与城市用地功能为研究对象，分析比较了缓冲半径为1 km的圈层尺度、街道尺度以及1 km×1 km格网尺度下路网结构中心性与城市用地功能利用强度的空间分布特征与关联关系。根据路网结构与城市用地功能关联关系的多尺度比较结果确定了后续研究的空间尺度，进一步探讨了路网结构中心性与城市混合用地功能之间的具体关联方向和关联程度。研究结果可为城市重要项目区位选择和土地利用规划布局提供参考与指导。

不同尺度下的路网结构中心性指标与各类城市用地功能关联关系具有相似性，均表现为显著正相关关系，且局部空间集聚特征明显，主要呈现高—高集聚和低—低集聚的空间关联模式。不同尺度下的路网结构中心性指标与各类城市用地功能空间关联具有分异性，缓冲半径为1 km的圈层尺度概括力强，但空间分析结果与实际分布特征差异较大；街道尺度形状通常不规则且划分主观性强，可大致展示路网结构与用地功能的空间关联性，但往往融合许多细节；1 km×1 km格网尺度对路网结构与城市用地功能关联关系的刻画更加清晰细致，与二者的实际空间分布最相符，更加适合作为进一步分析城市内部路网结构与详细用地功能关系的研究尺度。在不同尺度下，邻近度更能反映路网结构

对城市用地功能布局的影响。公共管理与公共服务设施用地功能、交通设施用地功能的利用强度对路网结构中心性的依赖性更强，工业用地功能对路网结构中心性的依赖性较弱。在格网尺度下，商业服务业设施、公共管理与公共服务设施以及居住用地功能的单元数量较多，且与路网结构中心性指标具有显著正相关关系；而工业和绿地广场用地功能的单元数量较少，且与路网结构中心性指标的正相关性不显著，对路网结构的依赖倾向不明显。根据不同用地功能POI的核密度占比，研究单元可划分为单一功能型区域和混合功能型区域，其中单一功能型区域布局受邻近度的影响程度最大，混合功能型区域布局对邻近度和平直性的依赖性更强。

受资料与数据收集限制，本文仅从空间角度上对路网结构与城市用地功能的关联关系进行横向分析，缺乏时间角度的纵向比较。后续可将上述问题作为重点进行深化研究，为进一步揭示城市交通与土地利用的关联关系提供支持。

参考文献

[1] 国际现代建筑学会，清华大学营建学系. 雅典宪章：1933年8月国际现代建筑学会拟订于雅典[J]. 城市科学普及，2007(5):123-126

[2] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science，1999，286(5 439):509-512

[3] 张邻. 城市交通与居住地选择之间关系[D]. 成都:西南交通大学，2010

[4] 徐鹏. 城市功能布局与路网一体化分析研究[D]. 重庆:重庆交通大学，2016

[5] 王文奇. 基于城乡一体化的道路交通与土地利用整合研究[D]. 成都:西南交通大学，2008

[6] Wang F, Antipova A, Porta S. Street Centrality and Land Use Intensity in Baton Rouge, Louisiana[J]. Journal of Transport Geography，2011，19(2):285-293

[7] Rui Y, Ban Y. Exploring the Relationship Between Street Centrality and Land Use in Stockholm[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(7): 1 425-1 438

[8] 沈体雁，周麟，王利伟，等. 服务业区位选择的交通网络指向研究:以北京城市中心区为例[J]. 地理科学进展，2015，34(8):947-956

[9] 吕永强，郑新奇，周麟. 路网中心性与城市功能用地空间分布相关性研究:以北京城市中心区为例[J]. 地理研究，2017，36(7):1 353-1 363

[10] Zhong J, Liu J, Jiao L, et al. Assessing the Comprehensive Impacts of Different Urbanization Process on Vegetation Net Primary Productivity in Wuhan, China, from 1990 to 2020[J]. Sustainable Cities and Society，2021，75:236-249

[11] Jiao L, Mao L, Liu Y. Multi-order Landscape Expansion Index: Characterizing Urban Expansion Dynamics[J]. Landscape and Urban Planning，2015，137:30-39

[12] Xu G, Jiao L, Zhao S, et al. Examining the Impacts of Land Use on Air Quality from a Spatio-temporal Perspective in Wuhan, China[J]. Atmosphere，2016，7(5):62

[13] 薛东前，王传胜. 城市群演化的空间过程及土地利用优化配置[J]. 地理科学进展，2002，21(2):95-102

[14] 池娇，焦利民，董婷，等. 基于POI数据的城市功能区定量识别及其可视化[J]. 测绘地理信息，2016，41(2):68-73

[15] 李胜男，刘亚静. 基于多源数据的城市职能中心与空间结构识别[J]. 地理空间信息，2023，21(6):89-92

[16] 贺青，张俊飚. 粮食主产区农业碳排放的动态演进及驱动因素研究[J]. 生态经济，2023，39(6):123-128

[17] 周立新，吕永强，孙英君. 莒南县路网中心性对建设用地时空格局的影响[J]. 测绘科学，2021，46(7):158-164

[18] 焦利民，张博恩，许刚，等. 气溶胶光学厚度与$PM_{2.5}$浓度相关关系的时空变异[J]. 干旱区资源与环境，2016，30(12):34-39

[19] 刘聪粉，柯大钢，张瑞荣. 基于Geoda095i的陕西省人口分布空间统计分析[J]. 西北人口，2008，29(6):7-11

[20] 梅林，郭艳花，陈妍. 吉林省人口老龄化时空分异特征及成因[J]. 地理科学进展，2018，37(3):352-362

[21] 姜萍，潘新民，彭艳梅，等. 新疆地区空气质量时空分布特征分析[J]. 地理空间信息，2020，18(7):85-89

[22] 万鲁河，王绍巍，陈晓红. 基于GeoDA的哈大齐工业走廊GDP空间关联性[J]. 地理研究，2011，30(6):977-984

[23] Nikolova S P, Small E, Campillo C. Geo-social and Health Disparities Among Persons with Disabilities Living in Monterrey, Nuevo Leon and Dallas, Texas[J]. Disability and Health Journal，2015，8(3):434