

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.008

# 交通网络中心性与土地利用强度的相关性及其空间异质性研究——以青岛市主城区为例

宋成镇, 陈延斌, 殷冠文, 侯毅鸣, 陈玥莹

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358)

**摘要:** 探究路网中心性与土地利用强度的空间关系,对合理布局城市交通网络,提高城市土地利用效率,促进城市高质量发展具有重要意义。本文以青岛市主城区为研究对象,采用多中心评价模型计算了交通网络的邻近中心性、中介中心性和直达中心性。基于重分类的 POI 大数据间接表征城市功能用地类别,采用核密度估计等方法分析了路网中心性与土地利用强度的空间分布特征,最后运用 Pearson 相关系数、地理加权回归模型探究了二者的相关性及其空间异质性。研究结果表明,邻近中心性呈现明显的“核心-边缘”模式,中介中心性高值区主要集中在城市主干道,直达中心性在空间上表现为明显的多核心结构。城市路网中心性与土地利用强度存在显著的相关性。邻近中心性与土地利用强度的相关性最高,直达性次之,中介中心性最小。路网中心性对土地利用强度的影响效果存在显著的空间异质性。研究区范围内,邻近中心性、直达中心性对土地利用强度的影响效果主要以正向作用为主,中介中心性主要以负向作用为主。

**关键词:** 路网中心性; 土地利用强度; 空间异质性; 青岛市主城区

**中图分类号:** K902

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2022)02-0201-11

## Correlation and spatial heterogeneity between road network centrality and land use intensity: a case study of Qingdao City

SONG Chengzhen, CHEN Yanbin, YIN Guanwen, HOU Yiming, CHEN Yueying

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, China)

**Abstract:** To explore the spatial relationship between road network centrality and land use intensity is of great significance for rational layout of urban traffic network, improving urban land use efficiency and promoting high-quality urban development. Taking the main district of Qingdao City as the research object, this paper calculated the closeness centrality, betweenness centrality and straightness centrality of the transportation network by using the multi-center evaluation model. Based on reclassified POI data, the classification of urban functional land is indirectly represented. The spatial distribution characteristics of road network centrality and land use intensity are analyzed by kernel density estimation and other methods. Moreover, Pearson correlation coefficient and geographically weighted regression model are used to explore the correlation and spatial heterogeneity between them. The results show that the closeness centrality presents an obvious “core-edge” pattern, that the high value area of betweenness centrality is mainly concentrated in the urban main road, and that straightness centrality presents an obvious multi-core structure in space. There is a significant correlation between urban transport network centrality and land use intensity. The correlation between closeness centrality and land use intensity is the highest, straightness centrality is the second, and betweenness centrality is the least. The effect of road network centrality on land use intensity is of significant spatial heterogeneity. Within the study area, the effect of closeness centrality and straightness centrality on land use intensity is

收稿日期: 2021-06-21; 网络出版日期: 2021-12-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20211213.1016.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41601156, 41701177)

第一作者: 宋成镇, 男, 硕士生, 研究方向为城镇发展与区域规划。E-mail: 3095383044@qq.com

通信作者: 陈延斌, 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为城市地理。E-mail: ychen@sdu.edu.cn

mainly positive, while the effect of betweenness centrality is mainly negative.

**Key words:** road network centrality; land use intensity; spatial heterogeneity; main district of Qingdao City

在城市化快速发展背景下,城市在发展过程中产生了许多诸如交通拥堵<sup>[1]</sup>、城市用地盲目扩张<sup>[2]</sup>、土地利用效率低下<sup>[3]</sup>等问题,主要体现在以下两个方面。一方面,随着城市人口和商业设施不断增加,城市区域的交通需求不断提高,城市土地的有限性使得交通设施建设无法满足快速增加的交通需求,进而产生了城市交通需求与交通供给不平衡的矛盾。另一方面,随着机动车的快速发展和人们生活水平的不断提高,城市居民的机动车普及率越来越高,城市交通拥堵问题愈加突出,严重阻碍了城市居民的正常出行。这与新时代背景下的高质量发展要求相悖,亟需优化城市内部交通布局和提高城市土地利用效率,促进城市健康高质量发展。

城市交通系统作为城市基础设施的重要组成部分,对城市土地利用的规划和开发起着非常关键的作用,同时,城市土地利用的空间结构状况也引导着城市交通基础设施的规划和建设。因此,城市交通与土地利用二者是相互作用,互相影响的。近些年来,伴随着空间网络科学技术的飞速发展,极大地推动了关于城市道路网络的相关研究,这为探讨城市道路网络与土地利用的相关性研究提供了技术支持。当前比较流行的研究城市道路网络的模型主要有两种:空间句法模型<sup>[4-5]</sup>和多中心评价模型<sup>[6-7]</sup>。空间句法模型不仅能够有效测度区域局部的空间可达性,还能够测度区域整体的空间关联性,经常被用来探究城市经济活动和路网中心性两者之间的相关性<sup>[8-10]</sup>。2006年,Crucitti等<sup>[11]</sup>在空间句法理论的基础上提出了多中心性评价模型,它是将道路网络中的实际距离引入模型当中,通过测度道路网络节点的重要程度来反映道路节点的中心性的大小,因为该模型测度的是实际距离,所以得出的结果更加科学可靠。

当前,已有国内外专家学者针对城市道路网中心性与土地利用强度的相关关系开展了相关研究,主要集中在以下几个方面。①探究城市商业经济活动与路网中心性的空间分布特征及相关关系<sup>[12-17]</sup>。②探究城市人口密度<sup>[18]</sup>、就业密度<sup>[19]</sup>等社会因素与路网中心性的空间分布特征及相关性。③主要采用 Pearson 相关系数探究二者间的总体相关性<sup>[14,17]</sup>。总的来说,一方面,现有研究主要集中在探讨路网中心性与某一城市社会经济因素的相关关

系,而针对路网中心性与多种城市用地强度开展相关性的研究相对不足。另一方面,在研究方法上主要采用 Pearson 相关系数探讨两个变量之间的线性相关关系。然而,路网中心性与土地利用强度在空间上的分布是不均衡的,使得两者之间的相关性在空间上存在差异。基于此,本研究引入地理加权回归模型,探究路网中心性与不同城市土地利用强度的相关关系及其空间异质性,以期制定合理的城市交通与土地利用规划、优化城市内部空间结构和提高城市土地利用效率提供理论依据和决策参考。本文探究青岛市主城区交通路网中心性与土地利用强度的分析框架见图 1。

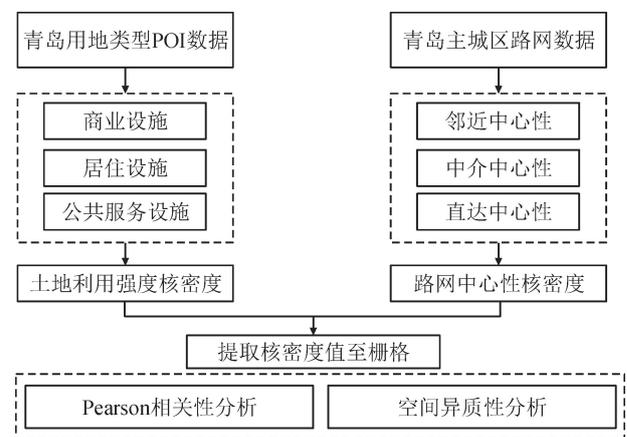


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

## 1 研究区概况、研究方法与数据来源

### 1.1 青岛市概况

青岛市地处我国华东地区、山东半岛东南部地区、东濒黄海,是山东省的经济中心、国家重要的现代海洋产业发展先行区、也是一带一路新亚欧大陆桥经济走廊主要的节点城市和海上合作战略的重要支点。作为山东省的副省级城市、国家计划单列市,是国务院批复确定的我国沿海重要中心城市和滨海度假旅游城市,也是重要的国际性港口城市。截至 2019 年,青岛市下辖市南区、市北区、李沧区、崂山区、青岛西海岸新区、城阳区和即墨区 7 个区,又代管胶州市、平度市和莱西市 3 个县级市,总面积为 11 293 km<sup>2</sup>,建成区面积为 758.16 km<sup>2</sup>,常住人口约 949.98 万人,常住人口城镇化率达到 74.12%。在近些年的城市发展和扩张过程中,青岛市主城区

面临着城市交通拥堵和土地利用效率低下等问题,严重影响了城市居民出行质量和城市社会经济高质量发展。基于青岛市的社会经济发展状况以及自然地理环境等因素,最终选取的研究区域包括市北区、市南区、李沧区以及崂山区的中韩街道,主要分布着李村商圈、新都心商圈、崂山商圈、台东商圈、中山路商圈、东部商圈等主要商圈(图2)。

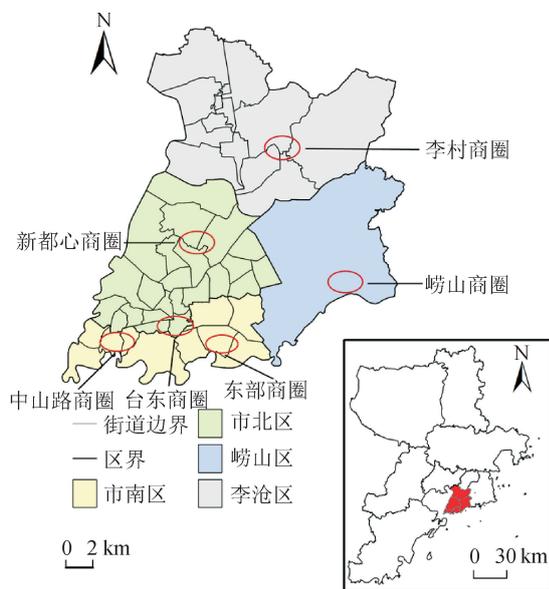


图2 研究区域  
Fig. 2 Study area

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 多中心评价模型

本研究以多中心性评价模型<sup>[20-21]</sup>为基础,基于ArcGIS软件平台,运用城市网络分析工具测度青岛市主城区道路网络的中心性。多中心性评价模型已在相关研究领域中得到广泛使用,它是把城市道路作为网络的边,将道路与道路的交叉点和道路的端点作为网络节点,通过计算实际道路节点间的距离来测算城市交通网络的中心性<sup>[20,22]</sup>。本文选取邻近中心性、中介中心性和直达中心性三个指标<sup>[12,20]</sup>对青岛市主城区的道路网络中心性进行定量化测度。

邻近中心性  $C^C$  表示一个道路节点与道路网络中的其他所有节点邻近的程度,反映了该节点在网络中的可达性大小。道路节点  $i$  的邻近中心性计算公式为:

$$C_i^C = \frac{N-1}{\sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}} \quad (1)$$

式中: $N$ 为道路网络中的节点数量; $d_{ij}$ 表示道路节点  $i$  与道路节点  $j$  之间的最短距离。邻近中心性表

现为某一道路节点到其他道路节点的平均距离的倒数。道路节点间的平均距离越小,那么邻近中心性也就越强。

中介中心性  $C^B$  反映了道路节点在道路网络中的中转能力。经过某个道路节点的最短路径的道路数量越多,道路节点的中介中心性越强,也反映了该道路节点在整个道路网络中所起的枢纽作用越明显。道路节点  $i$  的中介中心性计算公式为:

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j=1, k=1, j \neq k \neq 1}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (2)$$

式中: $N$ 为道路网络中的节点数量; $n_{jk}$ 为道路节点  $j$  与道路节点  $k$  之间的最短路径数量; $n_{jk}(i)$ 为道路节点  $j$  与道路节点  $k$  之间的最短路径中,通过道路节点  $i$  的最短路径的数量。

直达中心性  $C^S$  通过计算道路节点与其他道路节点之间的最短路径距离与道路节点间的直线距离比值的平均值得出该道路节点的重要程度。如果两个道路节点间的路径距离越接近两者间的直线距离,那么道路节点的直达中心性越强,通行效率也就越强。道路节点  $i$  的直达中心性计算公式为:

$$C_i^S = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}} \quad (3)$$

式中: $N$ 表示道路网络中的道路节点数量; $d_{ij}^{Eucl}$ 表示道路节点  $i$  与道路节点  $j$  间的欧氏距离; $d_{ij}$ 表示道路节点  $i$  道路节点  $j$  间的最短距离。

### 1.2.2 核密度估计

本文选用 ArcGIS 软件中的核密度估计方法对城市路网中心性与城市土地利用强度进行数据平滑,并得到连续的空间分布图。

核密度估计法是通过计算某特定窗口内分布的点的密度,将窗口内的所有点密度之和作为网格中心的核密度值<sup>[17]</sup>(见图3):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (4)$$

式中: $K$ 表示核函数; $h$ 表示阈值; $n$ 表示阈值范围内的点数量; $d$ 表示数据维数。

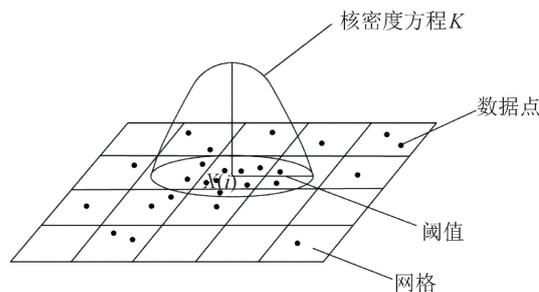


图3 核密度估计

Fig. 3 Kernel density estimation

首先,本文利用 ArcGIS 中的核密度分析工具计算了不同带宽(默认带宽、1 km、2 km、3 km)下的交通路网中心性与土地利用强度的核密度。在综合考虑数据的平滑程度与反映数据详细程度后,最后选取的带宽为 1 000 m,输出的核密度结果图的空间分辨率为 100 m。

### 1.3 Pearson 相关性分析

Pearson 相关系数<sup>[23-24]</sup>可以反映两个变量之间线性相关程度,其数值大小范围为[-1,1]。Pearson 相关系数的数值的绝对值越大,表明两个变量的相关性越强,数值越接近 0,表明两个变量的相关性越弱。

### 1.4 地理加权回归分析

地理加权回归(geographically weighted regression,GWR)模型认为空间数据具有非平稳性,影响因素的回归系数会随着空间位置的变化而变化,也就是说影响因素的作用效果在不同区位是不同的<sup>[25]</sup>。因此,GWR 模型计算得出的结果更加符合现实情况。本文利用 GWR 模型分析城市路网中心性对土地利用强度影响程度。模型的表达式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \epsilon_i \quad (5)$$

式中: $\beta_0$ 表示常数项; $(u_i, v_i)$ 表示第  $i$  个空间单元的地理坐标; $\beta_k$ 表示第  $i$  个空间单元、第  $k$  个自变量的回归参数; $\epsilon_i$ 为第  $i$  个空间单元的随机误差项。

该模型中研究单元  $i$  的回归参数和  $\beta$  估计值会伴随着  $W(u_i, v_i)$  的变化而发生变化,但仍可以通过空间单元  $i$  与其他空间单元之间距离的大小来确定  $W(u_i, v_i)$ ,然后选择加权最小二乘法计算参数  $\beta$ ,表达式为:

$$\beta(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) y \quad (6)$$

式中: $\beta(u_i, v_i)$ 表示模型估计参数; $X$ 表示自变量解释值的矩阵; $y$ 表示因变量; $X^T$ 表示矩阵  $X$  的转置; $W(u_i, v_i)$ 表示空间权重矩阵。

为了进一步计算参数  $\beta(u_i, v_i)$ ,选择高斯函数法作为权重函数,其表达式为:

$$W_{ij} = \exp\left(-\left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right) \quad (7)$$

式中: $b$ 表示带宽; $d_{ij}$ 表示空间单元  $i$  与空间单元  $j$  间的距离。

## 1.5 数据来源

### 1.5.1 交通路网数据

青岛市交通网络数据来源于国家地理信息公共

服务平台。青岛市主城区的交通网络数据采集于 2020 年 10 月 21 日。经处理后的交通网络见图 4。交通网络有 5 092 个节点,7 360 条边。各级道路的长度从 1.0 m 到 3 297 m 不等,平均长度为 219.5 m。青岛市主城区的路网密度为 4.0 km/km<sup>2</sup>。较短的道路集中分布在市南区和市北区,较长的道路主要分布在研究区的西部和东部边缘区。

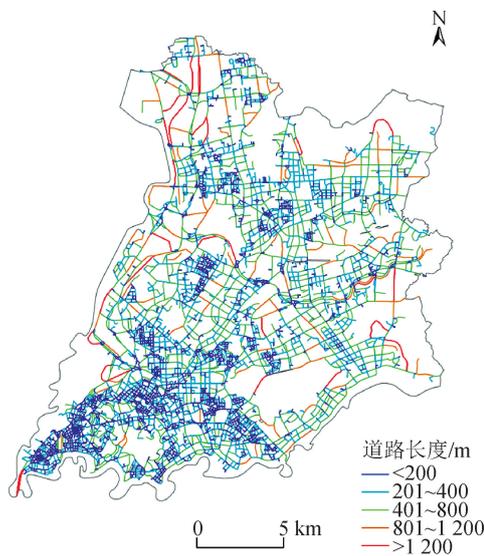


图 4 研究区各级道路交通网络分布  
Fig. 4 Distribution of road traffic network at all levels in the study area

### 1.5.2 城市功能用地数据

随着网络信息技术的快速发展,地理大数据的类型更加多元化、大数据获取的渠道和应用领域日益广泛,为城市地理和城市规划等领域的相关研究提供了更多新的研究方法和技术手段。兴趣点(point of interest,POI)作为新兴的大数据之一,具有覆盖范围广、数据信息量庞大、获取方式简单等独特优势,可以有效反映城市的功能特征和地表的社会经济属性。从城市用地功能角度来看,当前城市最主要的土地利用类型是商业用地、居住用地和公共服务用地。因此,我们主要提取了三大类 POI 数据,即商业设施服务、住宅设施服务和公共设施服务。首先,在 2020 年 10 月,我们基于高德地图 API 收集了青岛市的 POI 大数据,然后对获取的 POI 数据进行整理分类,筛选出所需要的 POI 类别数据。最后,利用 ArcGIS 软件工具裁剪出所需要研究区域范围内的 POI 数据,共计 140 365 条记录。这些 POI 数据分为 3 个主要类别和 11 个子类别。表 1 显示了研究区 POI 数据的种类、数量和比例。

表1 青岛市主城区 POI 种类、数量及比例  
Tab.1 Type, quantity and proportion of POI in Qingdao main urban area

一类	二类	POI 数量	百分比/%
商业设施服务	餐饮服务	24 979	17.8
	购物服务	47 491	33.8
	金融保险服务	2 937	2.1
	生活服务	29 654	21.1
住宅设施服务	住宿服务(酒店、旅馆)	5 999	4.3
	商务住宅服务(小区、居民楼)	4 200	3.0
公共设施服务	公共设施服务	1 460	1.0
	科教文化服务	10 087	7.2
	政府机构及社会团体	4 008	2.9
	医疗保健服务	6 557	4.7
	体育休闲服务	2 993	2.1

## 2 路网中心性与土地利用强度的空间分布特征

### 2.1 路网中心性的空间分布特征

首先,运用 ArcGIS 软件提取道路交叉点、端点作为交通网络节点。然后,运用城市网络分析工具计算得到青岛市主城区交通网络的节点中心性。将网络节点的中心性值赋给道路,每条道路的中心性值为道路两端节点的中心性值加和的平均值。青岛市主城区交通网络的邻近中心性、中介中心性与直达中心性的空间分布,以及选择 1 km 搜索半径得出中心性的 KDE 结果。

从图 5 可以看出,邻近中心性呈现明显的“核心-边缘”模式,邻近中心性呈环状从研究区的中心地区向外围地区逐渐递减,符合地理学中的距离衰减规律。

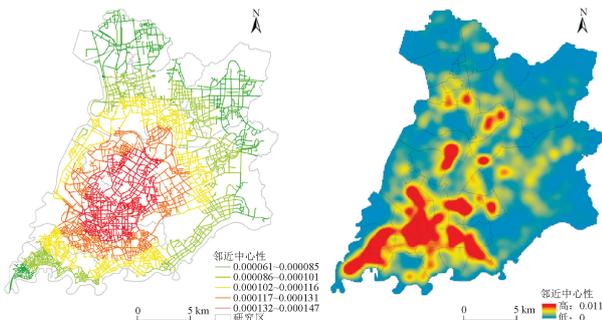


图5 邻近中心性与核密度估计结果  
Fig.5 Estimation results of closeness centrality and kernel density

核密度估计结果显示,核密度高值区主要集中在中山路商圈、台东商圈、新都心商圈、东部商圈等主要商圈分布的区域。这些区域的节点到交通网络中所有节点的平均距离均较小。邻近中心性的空间分布特征表明青岛市主城区的交通可达性呈现多中心结构的特征。

中介中心性的空间分布特征与邻近中心性、直达中心性具有很大的不同(见图 6)。中介中心性高值区主要集中在四流北-南路、重庆路、黑龙江路等城市主干道,且中介中心性值沿着三大主干道路向两侧逐渐递减。而研究区内大部分道路的中介中心性值均较低,表明只有城市主要交通干道才具有较高的中介中心性。中介中心性核密度估计显示,高值区域呈现东北-西南方向的狭长带状分布形态,覆盖了青岛市主城区的三大主要交通干道。中介中心性高值区集中于城市交通主干道,表明城市主要交通干道上的节点在整个城区交通网络中起到的桥梁或枢纽作用最明显。

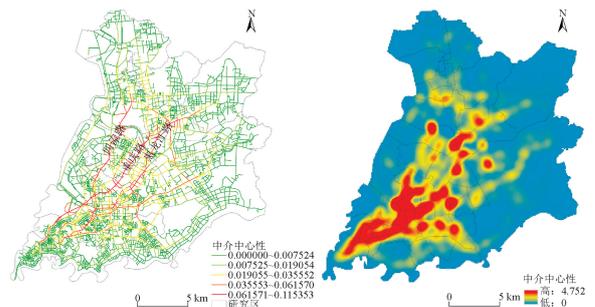


图6 中介中心性与核密度估计结果  
Fig.6 Estimation results of betweenness centrality and kernel density

直达中心性的空间分布特征表现为明显的多核心结构(见图 7)。青岛市主城区的直达中心性总体较高,高值区主要集中在市北区西南部、市南区西部、崂山区西南部以及李沧区的西北部等地区,其他区域的直达中心性相对较低。表明青岛市主城区道路节点的直达性总体较高,交通通达效率总体较高。

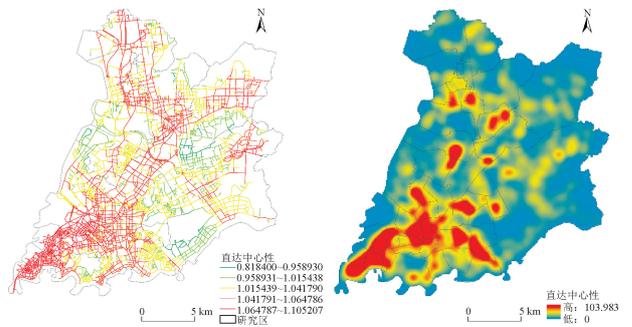


图7 直达中心性与核密度估计结果  
Fig.7 Estimation results of straightness centrality and kernel density

直达中心性的核密度估计结果显示,高值区域呈现明显的多核心分布格局,其中人口和商业实施密度最高的市南区西部和北部、市北区西南部成为直达中心性核密度高值集聚区。

青岛市主城区 7 360 条道路的路网中心性统计分布情况见图 8。通过量化路网中心性频率分布情况可以识别各类别路网中心性的数量分布情况,横轴表示路网中心性的类别,纵轴表示路网中心性分布的频率。从图 8 中可以看出,邻近中心性、中介中心性与直达中心性的频率分布存在明显的差异,邻近中心性的频率呈现递增的幂律分布特征,邻近中心性较低的道路数量分布较少,邻近中心性较高的道路数量远远多于邻近中心性低的道路数量,这可能是由于青岛市主城区作为人口、经济的集聚区域,

道路交通网络密度较大,道路节点与节点之间的平均距离较小,城市道路交通网络节点的邻近中心性总体较高。中介中心性的频率呈现出递减的指数分布,这可能是由于发挥中转和枢纽作用较强的道路节点一般分布在城市内部主要交通干道上,而城市交通主干道在城市内部所有道路中的比重相对较低,这使得中介中心性较高的节点数量相对较低,因而呈现递减指数的分布形态。直达中心性的频率分布基本符合高斯分布,整体上表现为围绕平均值的对称分布特征,大部分道路节点的直达中心性数值在 5 100~5 500,直达中心性数值小于 5 100 或大于 5 500 的占比很小,说明区域内直达中心性很高和很低的道路节点数量分布相对较少。

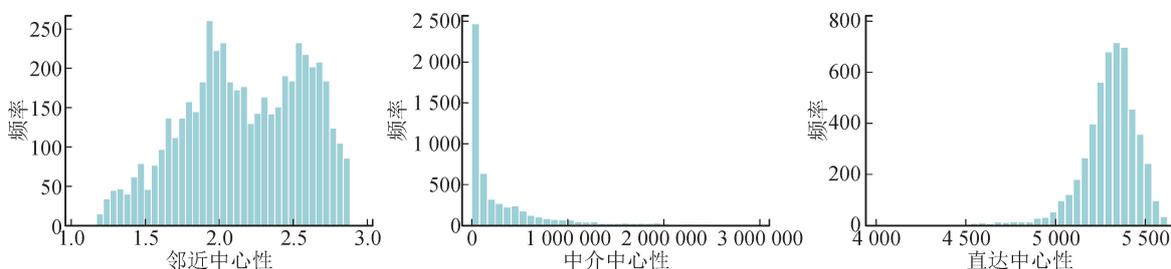


图 8 青岛市主城区交通路网中心性的频率分布

Fig. 8 Frequency distribution of traffic network centrality in the main urban area of Qingdao

## 2.2 土地利用强度的空间分布特征

我们使用重新分类的 POI 数据来间接表征以下三种类型的城市土地利用:商业用地、居住用地和公共服务用地。城市功能用地设施的 POI 分布以及核密度分布结果见图 9。商业设施、居住设施和公共服务设施的 POI 在市南区和市北区分布最为密集,这与市南区、市北区作为青岛市人口、商业最密集,经济发展水平最高的现状相吻合。核密度分布呈现多核心分布格局,市南区、市北区以及李村商圈等区域成为商业设施、居住设施以及公共服务设施 POI 核密度分布的高值集聚区域。

将城市功能用地设施的核密度结果进行栅格化处理,通过创建渔网,运用面域网格的空间插值方法,计算 1 km 栅格内 POI 的核密度均值来表征城市土地利用强度,见图 10。其中,横轴代表土地利用强度,纵轴代表土地利用强度的分布频率。总体上来看,三类城市用地设施的土地利用强度的频率均呈现递减的指数曲线,表明当前青岛市主城区土地利用强度低的功能用地设施数量较多,而土地利用强度高的功能用地设施数量较少,反映出青岛市主城区的土地利用强度总体上表现为偏低。这可能是由于一方面青岛市主城区内分布着众多的山地和

丘陵,受自然地理环境条件约束,这些土地难以实现高效集约化利用,进而导致土地利用强度总体较低。另一方面,经济发展水平最高的市南区分布着较多的特色历史建筑,这些建筑的楼层相对较低,主要以旅游观光目的为主,难以进行商业设施、居住设施和公共服务设施的开发和建设,这可能会导致主城区土地利用强度总体较低。

## 3 路网中心性与土地利用强度的相关性及其空间异质性分析

### 3.1 Pearson 相关性分析

选择 Pearson 相关系数分析城市路网中心性与土地利用强度的整体相关性。首先,计算路网中心性与土地利用强度的核密度值,然后将核密度值进行网格化处理,最后将提取出的网格数据导入 SPSS 软件,即可通过计算相关系数矩阵得到邻近中心性  $C^C$ 、中介中心性  $C^B$ 、直达中心性  $C^S$  与商业用地强度 (Comm #)、居住用地强度 (Resi #)、公共服务用地强度 (Publ #) 的 Pearson 相关系数。见表 2。特别地,路网中心性与土地利用强度的 Pearson 相关系数均在 1% 的水平下通过了显著性检验,表明城市路网中心性与土地利用强度存在显著的相关性。

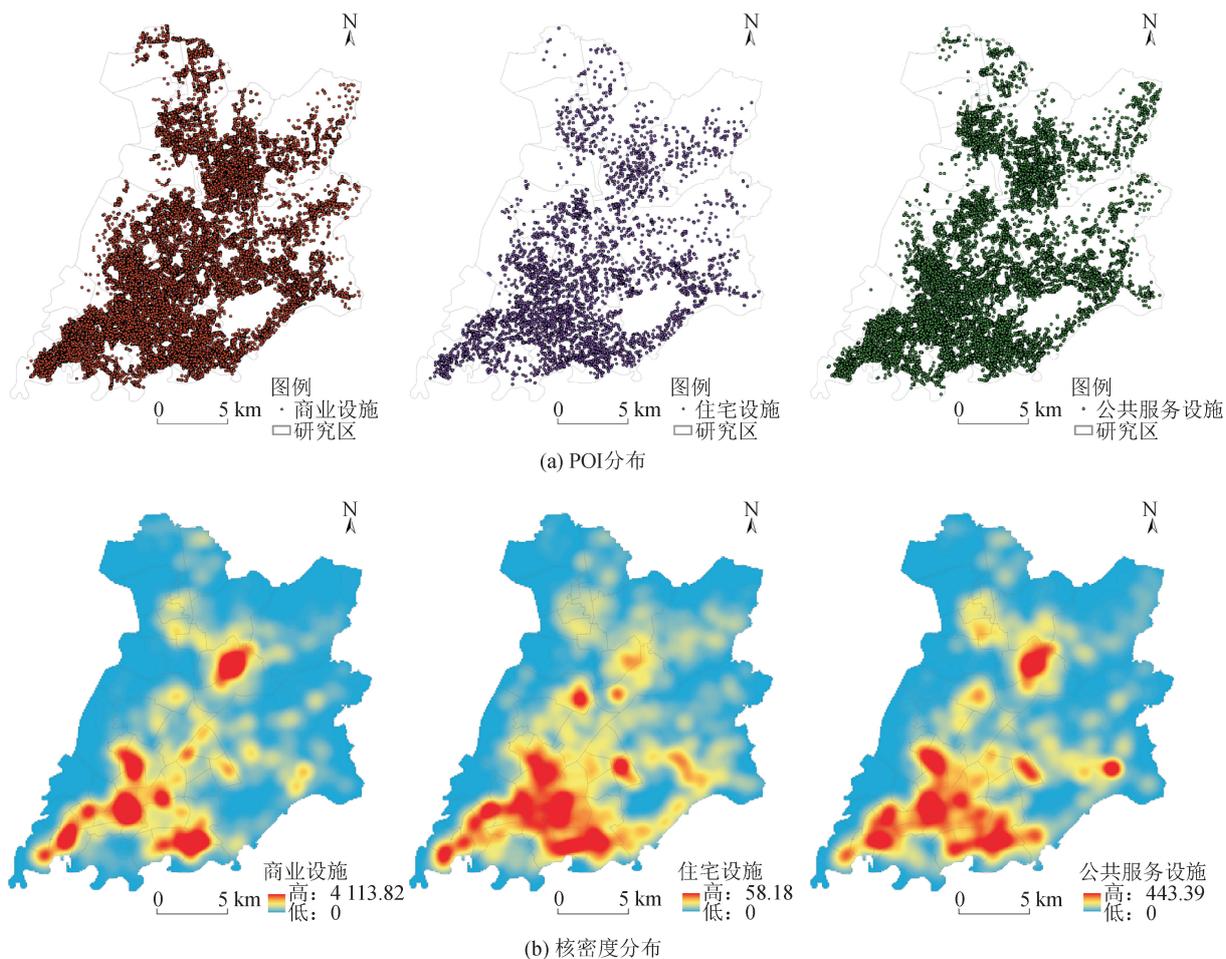


图9 城市功能用地设施的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of urban functional land facilities

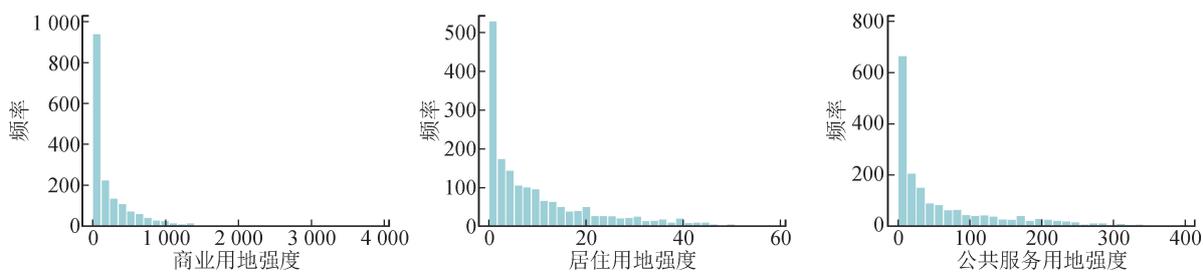


图10 城市土地利用强度的频率分布

Fig. 10 Frequency distribution of urban land use intensity

表2 青岛市主城区路网中心性与土地利用强度的 Pearson 相关系数

Tab. 2 Pearson correlation coefficient between road network centrality and land use intensity in the main urban area of Qingdao

中心性	Comm #	Resi #	Publ #	ln(Comm #)	ln(Resi #)	ln(Publ #)
$C^C$	0.797 2	0.715 2	0.712 3	0.586 0	0.545 8	0.508 8
$C^B$	0.608 3	0.604 2	0.594 1	0.518 5	0.477 4	0.401 3
$C^S$	0.665 4	0.671 9	0.670 8	0.571 9	0.485 1	0.441 4
ln( $C^C$ )	0.622 3	0.591 1	0.572 6	0.650 1	0.612 3	0.594 7
ln( $C^B$ )	0.579 6	0.541 3	0.513 3	0.621 0	0.582 0	0.543 1
ln( $C^S$ )	0.598 0	0.550 8	0.543 7	0.631 8	0.588 6	0.572 4

从中心性角度来看,路网中心性对土地利用强度的影响程度存在差异。其中,邻近中心性对土地

利用强度的影响系数最大,直达中心性次之,中介中心性最小。这表明青岛市主城区邻近中心性与土地

利用强度的相关性最高,直达性次之,中介中心性最小。一方面,反映出土地利用强度与土地在交通网络中的区位、交通效率存在很高的相关性。另一方面,也表明区位是衡量城市土地利用强度最有效的指示器。从土地利用类型来看,商业用地强度、居住用地强度和公共服务用地强度与中心性均存在较强的相关性。其中,商业用地强度与路网中心性的相关系数最大,居住用地强度次之,公共服务用地强度最小。这表明青岛市主城区商业设施用地与路网中心性的相关性最强,居住设施用地次之,公共服务设施用地与路网中心性的相关性最弱。

### 3.2 地理加权回归分析

Pearson 相关系数在分析城市路网中心性与土

地利用强度的相关性时没有考虑空间位置的影响,而城市路网中心性与土地利用强度的核密度值在空间上存在明显的集聚特征,即空间数据具有非平稳性,因而可能导致二者之间的相关关系存在空间差异。基于此,本文利用 GWR 模型探索路网中心性与城市土地利用强度相关性的空间异质性。同时,本研究还计算了普通最小二乘(ordinary least squares, OLS)模型的相关参数进行对比,以确定选择 GWR 模型是否更具有解释力。由表 3 可知, GWR 模型比 OLS 模型具有更低的 Akaike 信息量准则 AICc 和更高的调整后拟合优度  $R^2$ ,说明 GWR 模型的拟合结果显著优于 OLS 模型,因此选择 GWR 模型进行分析具有更强的解释力。

表 3 GWR 模型和 OLS 模型描述性统计

Tab. 3 Descriptive statistics of GWR model and OLS model

因变量	解释变量	OLS		GWR	
		AICc	调整后的 $R^2$	AICc	调整后的 $R^2$
商业用地强度	$C^C$	3 674.961	0.505	1 753.225	0.855
	$C^B$	4 036.708	0.390	2 766.678	0.842
	$C^S$	3 814.754	0.464	1 770.358	0.854
居住用地强度	$C^C$	3 789.552	0.471	1 027.674	0.905
	$C^B$	4 033.645	0.391	1 158.119	0.897
	$C^S$	3 789.552	0.471	1 027.674	0.905
公共服务用地强度	$C^C$	3 579.300	0.532	1 199.729	0.895
	$C^B$	4 073.029	0.377	1 275.296	0.890
	$C^S$	3 756.293	0.482	1 213.712	0.894

由于空间所限,本文不能通过地图展示所有的 GWR 模型的相关参数,仅通过  $\beta$  系数的空间分布探讨路网中心性与城市土地利用强度相关性的空间异质性,其中,红色表示相关性最强,绿色表示相关性最弱(见图 11)。

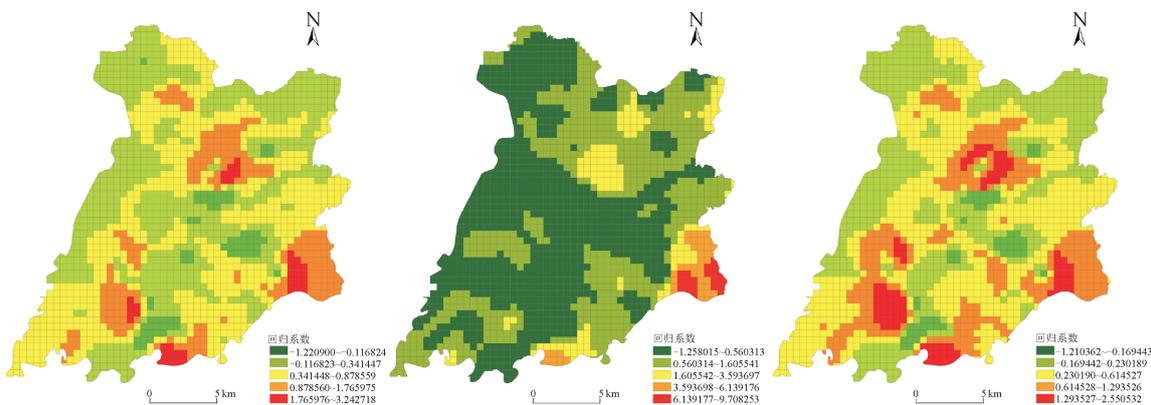
1) 商业用地强度与邻近中心性、中介中心性、直达中心性的 GWR 回归结果见图 11(a)。研究区内,邻近中心性、直达中心性对商业用地强度的影响效果以正向作用为主,中介中心性以负向作用为主。具体来看,邻近中心性对商业用地强度的影响效果在东部商圈、台东商圈、李村商圈、崂山商圈表现为较强正向作用,影响效果以这些区域为核心向周边地区逐渐减弱,反映出商圈区域内道路节点的可达性越高,商业用地利用强度越高。中介中心性对商业用地强度的影响效果在崂山商圈和东部商圈表现为较强正向作用,表明该区域道路节点的中转和衔接功能越强,商业用地强度越高,而在其他大部分区域表现为负向作用。直达中心性对商业用地

强度的影响效果在东部商圈、新都心商圈、中山路商圈、台东商圈、李村商圈以及崂山商圈内表现为较强正向作用,该区域道路节点的通行效率越高,商业用地强度越高,其影响强度以这些区域为核心向四周逐渐降低,形成明显的“中心-外围”空间格局。

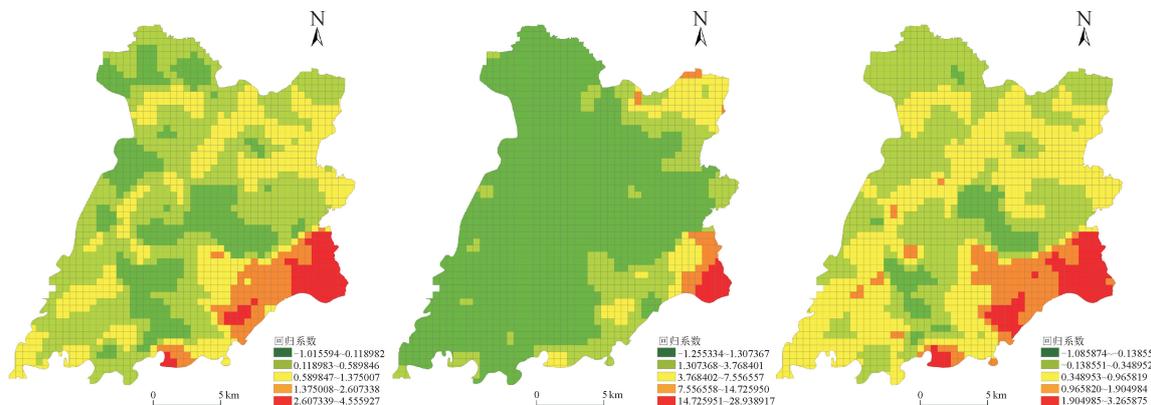
2) 居住用地强度与邻近中心性、中介中心性、直达中心性的 GWR 回归结果见图 11(b)。研究区内,邻近中心性、直达中心性对居住用地强度的影响效果以正向作用为主,中介中心性以负向作用为主。具体来看,邻近中心性对居住用地强度的影响效果在东部商圈和崂山商圈区域范围表现为较强正向作用,表明该区域范围内道路节点的可达性越高,居住用地利用强度越高,而在其他区域的影响效果相对较弱。中介中心性对居住用地强度的影响效果在崂山商圈区域范围内表现为强烈正向作用,表明该区域道路节点的中转和衔接功能越强,居住用地强度越高,而在其他大部分区域则表现为负向作用。直达中心性对居住用地强度的影响效果与邻近

中心性相似,在东部商圈和崂山商圈区域范围内表现为较强正向作用,其他区域的正向影响效果相对

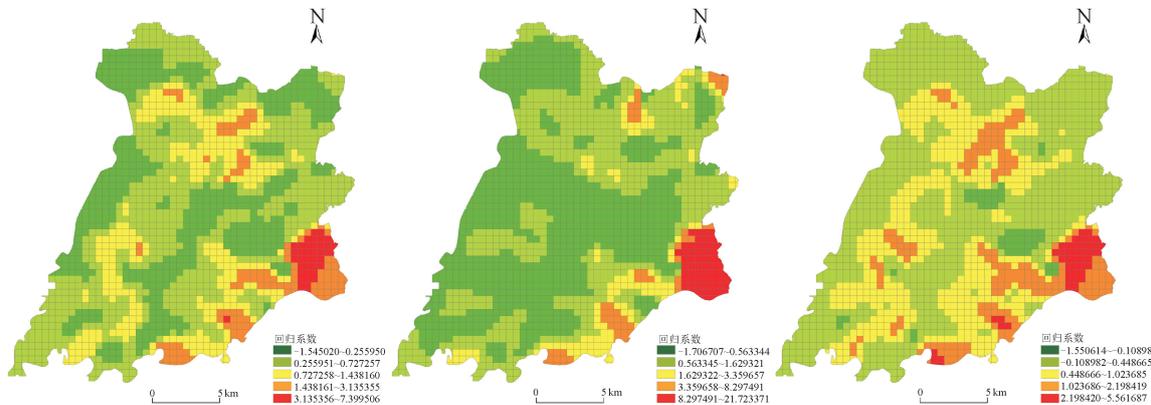
较弱,表明该区域道路节点的通行效率越高,居住用地强度越高。



(a) 商业用地强度与邻近中心性、中介中心性、直达中心性的GWR回归结果



(b) 居住用地强度与邻近中心性、中介中心性、直达中心性的GWR回归结果



(c) 公共服务用地强度与邻近中心性、中介中心性、直达中心性的GWR回归结果

图 11 路网中心性与土地利用强度的 GWR 结果

Fig. 11 GWR results of road network centrality and land use intensity

3) 公共服务用地强度与邻近中心性、中介中心性、直达中心性的 GWR 回归结果见图 11(g)~(i)。研究区范围内,邻近中心性、直达中心性对公共用地强度的影响效果以正向作用为主,中介中心性以负向作用为主。具体来看,邻近中心性对公共服务用地强度的影响效果在东部商圈、李村商圈以及崂山商圈东部邻近区域范围内表现为较强的正向作用,表明该区域范围内道路节点的可达性越高,公共用

地利用强度越高,其他区域的正向作用强度相对较弱,少部分区域表现为负向作用。中介中心性对公共服务用地强度的影响效果在崂山商圈东部邻近区域以及东部商圈范围内表现为较强的正向作用,表明该区域道路节点的中转和衔接功能越强,公共服务用地强度越高,而在其他区域则主要表现为负向作用。直达中心性与公共服务用地强度存在较强正向相关性的区域主要分布在崂山商圈和李沧商圈的

区域范围,表明该区域道路节点的通行效率越高,公共服务用地强度越高,而在其他区域的正向作用强度相对较弱,少部分区域表现为负向作用。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文基于多中心评价模型、核密度估计等方法,分析了青岛市主城区交通网络的邻近中心性、中介中心性和直达中心性的空间分布特征与统计特征。并采用 Pearson 相关系数、地理加权回归模型等方法探讨了路网中心性与城市内部主要功能用地强度的相关关系及其空间异质性。主要研究结论为如下。

1) 邻近中心性呈现明显的“核心-边缘”模式,中介中心性高值区主要集中在城市主干道,直达中心性的空间分布表现为明显的多核心结构。商业设施、居住设施和公共服务设施的 POI 在市南区和市北区分布最为密集。青岛市主城区土地利用强度低的功能用地设施 POI 数量较多,而土地利用强度高的功能用地设施 POI 数量较少,反映出青岛市主城区的土地利用强度总体偏低。

2) 城市路网中心性与土地利用强度存在显著的相关性。从中心性角度来看,路网中心性对土地利用强度的影响程度存在差异。其中,邻近中心性与土地利用强度的相关性最高,直达性次之,中介中心性最小。从土地利用类型来看,商业用地强度、居住用地强度和公共服务用地强度与中心性均存在较强的相关性。其中,商业用地强度与路网中心性的相关性最强,居住用地强度次之,公共服务用地强度最弱。

3) 路网中心性对土地利用强度的影响效果存在显著的空间异质性。研究区范围内,邻近中心性、直达中心性对土地利用强度的影响效果主要以正向作用为主,中介中心性主要以负向作用为主。路网中心性对土地利用强度的影响效果在崂山商圈均表现为显著的、稳定的正向作用。

### 4.2 讨论

1) 邻近中心性与直达中心性表现出较为明显的多中心特征,意味着在出行便捷度与交通效率方面满足了不同区位的居民出行需求。中介中心性的单中心特征表明交通流量集中在城市核心区的城区交通主干道,增大了城区的交通压力。商业设施、居住设施和公共服务设施的 POI 在市南区和市北区分布最为密集,这与市南区、市北区作为青岛市人口、商业最密集,经济发展水平最高的现状相符合。

2) 青岛市主城区邻近中心性与土地利用强度的相关性最高,直达性次之,中介中心性最小,反映

出土地利用强度与土地在交通网络中的区位、交通效率存在很高的相关性。路网中心性对土地利用强度的影响作用存在较强的空间异质性,这主要是由于交通网络与城市土地利用在不同区位上的特殊性,其实质是城市系统在演化过程中的空间分异。因此,应当因地制宜,不断优化道路交通规划与城市功能用地布局,提高城市功能用地利用效率,改善城市空间结构,促进城市健康可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 戴晓峰, 欧思嘉, 陈方, 等. 快速城市化地区公共交通的空间剥夺特征研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(6): 33-38.  
JI Xiaofeng, OU Sijia, CHEN Fang, et al. Spatial deprivation characteristics of public transportation in rapid urbanization area[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(6): 33-38.
- [2] 刘书畅, 叶艳妹, 钟水清. 中国城市建设用地扩张与经济增长重心迁移与脱钩关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2563-2571.  
LIU Shuchang, YE Yanmei, ZHONG Shuiqing. Research on shift route of gravity center and decoupling relationship between urban land expansion and economic growth in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2020, 29(12): 2563-2571.
- [3] 仇振宇, 朱记伟, 解建仓, 等. 西安市土地利用效益与城镇化耦合协调关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 308-316.  
ZHANG Zhenyu, ZHU Jiwei, XIE Jiancang, et al. Coupling coordination between land use benefits and urbanization in Xi'an City[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 308-316.
- [4] 梁宇, 郑新奇, 白书建. 利用空间句法模型研究京津冀路网的通达性[J]. 测绘通报, 2016(10): 101-105, 132.  
LIANG Yu, ZHENG Xinqi, BAI Shujian. The accessibility research of Jing-Jin-Ji Road Network using space syntax model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(10): 101-105, 132.
- [5] 韩雅敏, 邹明亮, 王文倩, 等. 基于空间句法的兰州市公共自行车需求量预测模型研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 113-118.  
HAN Yamin, ZOU Mingliang, WANG Wenqian, et al. A study on the demand prediction model of public bicycle based on spatial syntax in Lanzhou City[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2018, 54(1): 113-118.
- [6] 陈晨, 修春亮. 基于交通网络中心性的长春市大型综合医院空间可达性研究[J]. 人文地理, 2014, 29(5): 81-87.  
CHEN Chen, XIU Chunliang. Spatial accessibility of large general hospitals in Changchun City center based

- on street network centrality[J]. *Human Geography*, 2014,29(5): 81-87.
- [7] 陈晨, 修春亮, 程林. 基于多中心性评价模型的大城市避灾绿地-交通网络-人口匹配性空间分异——以沈阳市中心城区为例[J]. *灾害学*, 2016,31(2):219-225.  
CHEN Chen, XIU Chunliang, CHENG Lin. Matching score of disaster prevention green space-street network-population in large city based on multiple centrality analysis model: a case study of Shenyang [J]. *Journal of Catastrophology*, 2016,31 (2): 219-225.
- [8] KIM H K, SOHN D W. An analysis of the relationship between land use density of office buildings and urban street configuration: case studies of two areas in Seoul by space syntax analysis [J]. *Cities*, 2002, 19 (6): 409-418.
- [9] SCOPPA M D, PEPONIS J. Distributed attraction: the effects of street network connectivity upon the distribution of retail frontage in the City of Buenos Aires[J]. *Environment and Planning B*, 2015, 42(2): 354-378.
- [10] OMER I, GOLDBLATT R. Spatial patterns of retail activity and street network structure in new and traditional Israeli cities[J]. *Urban Geography*, 2016, 37 (4): 629-649.
- [11] CRUCITTI P, LATORA V, PORTA S. Centrality in networks of urban streets [J]. *Chaos*, 2006, 16 (1):015113.
- [12] 银超慧, 刘艳芳, 危小建. 武汉市多尺度道路网络中心性与社会经济活动点空间分布关系分析[J]. *人文地理*, 2017,32(6):104-112.  
YIN Chaohui, LIU Yanfang, WEI Xiaojian. Study on the multi-scale relationship between road network centrality and social economic activities distribution in Wuhan[J]. *Human Geography*, 2017,32(6):104-112.
- [13] LIN Geng, CHEN Xiaoxuan, LIANG Yutian. The location of retail stores and street centrality in Guangzhou, China [J]. *Applied Geography*, 2018, 100: 12-20.
- [14] 陈晨, 王法辉, 修春亮. 长春市商业网点空间分布与交通网络中心性关系研究[J]. *经济地理*, 2013, 33 (10):40-47.
- [15] ZHANG Yuyang, YANG Bowen, ZHANG Mengcai, et al. Exploring location pattern of commercial stores in Shichahai, Beijing from a street centrality perspective[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(3): 503-516.
- [16] 周璐瑶, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 多中心视角下的武汉市路网与经济活动空间关系分析[J]. *测绘地理信息*, 2020,45(2):8-14.  
ZHOU Luyao, LIU Yanfang, LIU Yaolin, et al. Analysis of the spatial relationships between road network and economic activities from the polycentric perspective in Wuhan[J]. *Journal of Geomatics*, 2020,45 (2): 8-14
- [17] 陈晨, 程林, 修春亮. 沈阳市中心城区路网中心性及其与第三产业经济密度空间分布的关系[J]. *地理科学进展*, 2013,32(11):1612-1621.  
CHEN Chen, CHENG Lin, XIU Chunliang. Distribution of centrality of traffic network and its relationship with economic density of tertiary industry in Shenyang [J]. *Progress in Geographical*, 2013, 32 (11): 1612-1621
- [18] AL-SAAIDY H J E, ALOBAYDI D. Studying street centrality and human density in different urban forms in Baghdad, Iraq[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2020, 12910:1111-1121.
- [19] 李元坤, 叶霞飞. 城市轨道交通线网规模与人口和岗位密度之间的关系[J]. *城市轨道交通研究*, 2017, 20 (7):1-5.  
LI Yuankun, YE Xiafei. Relationship between urban rail transit network scale and population/job density [J]. *Urban Rail Transit Research*, 2017,20 (7): 1-5.
- [20] 银超慧, 鄢昱, 刘艳芳, 等. 湖北省道路网络中心性与土地利用景观格局关系分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017,26(9):1388-1396.  
YIN Chaohui, QIE Yu, LIU Yanfang, et al. Relationship between road centrality and landscape in Hubei province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(9): 1388-1396.
- [21] WANG Fahui, CHEN Chen, XIU Chunliang, et al. Location analysis of retail stores in Changchun, China: a street centrality perspective[J]. *Cities*, 2014, 41 (A): 54-63.
- [22] PORTA S, LATORA V, WANG Fahui, et al. Street centrality and the location of economic activities in Barcelona[J]. *Urban Studies*, 2012, 49(7): 1471-1488.
- [23] TIMOTHÉE P, NICOLAS L B, EMANUELE S, et al. A network based kernel density estimator applied to Barcelona economic activities [M]//*Computational Science and Its Applications-ICCSA 2010*: 32-45.
- [24] 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):1353-1363.  
LÜ Yongqiang, ZHENG Xinqi, ZHOU Lin. Relationships between street centrality and spatial distribution of functional urban land use: a case study of Beijing central city[J]. *Geographical research*, 2017, 36(7): 1353-1363.
- [25] 王少剑, 高爽, 陈静. 基于GWR模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究[J]. *地理研究*, 2020, 39(3):651-668.  
WANG Shaojian, GAO Shuang, CHEN Jing. Spatial heterogeneity of driving factors of urban haze pollution in China based on GWR model [J]. *Geographical research*, 2020, 39(3): 651-668.

(责任编辑 王绪迪)