

# 基于引力势力范围的郑州城市多中心空间形态识别

李 欣

(河南财经政法大学资源与环境学院 城乡协调发展河南省协同创新中心, 郑州 450046)

**摘要:** 识别和分析城市多中心结构的空間形态,对优化城市空間结构具有重要意义。对引力模型的多中心综合实力参数和距离参数测定方法进行优化,首先将能够反映居民对空間结构感知体验的空間句法可达性,与人口经济和社会活动空間分布结合构建评价体系,定量计算多中心综合实力;然后将能够表达居民出行轨迹空間特征和偏好规律的词向量相关性,作为距离参数引入引力模型;最后计算引力强度并划分势力范围,对多中心发展目标的现实演化状态进行分析和评价。通过对比实验发现:优化引力模型与传统引力模型分析的势力范围存在一定差异,經空間统计和实地调查验证,优化模型对多源数据的运用更充分,考虑的因素更全面,其空間形态分析结果较为准确;从识别与规划多中心势力范围差异看,二者在郑州市核心城区的势力范围较为相似,均为早期规划或自然演化形成的已建成多中心,而部分外围多中心的识别与规划位置不同,空間形态差异明显,为未建成多中心,还远未形成其应有的分散疏解作用。

**关键词:** 多中心;引力模型;词向量;空間句法;郑州市

DOI: 10.11821/dlxb202206012

## 1 引言

随着中国城镇化率的提高,人口不断向大中城市聚集,但城市空間承载力有限,社会保障、交通环境和职住需求等问题并未得到妥善解决,因此科学优化城市结构,已成为城市规划与地理科学领域研究的热点之一。经过多年研究,促进城市形成多中心结构,可以形成结构均衡、功能多样、关联合作和优势互补的城市形态,起到提高城市空間绩效,缓解“大城市病”问题的作用<sup>[1]</sup>。因此,通过科学的方法识别城市多中心结构的空間形态,并分析其势力范围,有利于挖掘和展现城市当前发展状态,为及时调整优化城市空間布局,促进城市协调发展奠定基础。

目前,研究城市结构的理论包括城市要素有机分散理论<sup>[2]</sup>,多职能中心划分理论<sup>[3]</sup>和中心地理论<sup>[4]</sup>等,而引力模型是对城市多中心空間形态进行分析的一种典型模型。引力模型是一种体现多个空間目标相互作用强度的模型<sup>[5]</sup>,相关研究成果如多中心交通流量预测引力强度算法<sup>[6]</sup>,基于引力模型和Newman-Girvan聚类算法的多中心空間交互结构研究<sup>[7]</sup>,基于浮动车数据的商业中心时空吸引和空間衰减规律研究<sup>[8]</sup>等,此类成果利用多类城市要素实现了就业通勤模式、购物出行规律、城市结构特征及其影响因素的分析验证,从吸引强度和势力范围角度呈现城市的空間结构特征,但在引力模型中的两个重要参数,即

收稿日期: 2020-11-16; 修订日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871159, 41771445, 41771141); 河南省重点研发与推广专项(202102310013)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41871159, No.41771445, No.41771141; The Key Research and Development and Promotion Program of Henan Province, No.202102310013]

作者简介: 李欣(1981-), 男, 河南郑州人, 博士, 副教授, 主要从事城市空間大数据挖掘与分析研究。

E-mail: lixin992319@163.com

多中心综合实力（如经济、人口等）和多中心距离（如空间距离、网络距离等）的度量 and 表达方法还有进一步的改进空间。

对于多中心综合实力参数，以往成果大多建立了城市经济建设、社会发展、生活水平和环境质量等较为宏观的评价指标体系，利用多因素加权求和的方法确定区域综合实力<sup>[9]</sup>。但此类基于统计数据计算的综合实力测度值，并未充分体现多中心在空间上的区位特点和可达性，城市动态要素对多中心空间形态的影响考虑不足，因此将其代入引力模型计算得到的多中心对人车物的吸引能力也存在一定误差。本文拟在原有的评价指标体系基础上，引入空间句法理论中的整合度，利用面向个体出行的动态大数据，挖掘居民个体对空间结构的主观感受规律，表达和测定多中心的区域可达性，弥补已有成果的不足，使得模型对多中心综合实力表达更加完整准确。空间句法是由 Bill Hillier 提出的一种通过定量标准研究空间组织结构的理论<sup>[10]</sup>，在城市结构与地价关系<sup>[11]</sup>、城市扩张分析<sup>[12]</sup>、城市交通供需分析<sup>[13]</sup>和城市区域可达性分析<sup>[14]</sup>等方面均有相关研究成果，将其用于多中心结构研究，可以体现人对空间结构的主观感受，有助于更准确的从空间可达性方面分析多中心的综合实力。

另外，多中心距离参数的取值方式包括欧式空间距离<sup>[15]</sup>、网络空间距离<sup>[16]</sup>以及衍生出的移动耗费时间等，但此类取值方式仅和多中心空间位置、路网分布及出行方式等客观信息相关，城市职住空间分布、人口密度以及出行偏好等信息并未考虑在内，因此模型分析结果的准确程度仍存在提升空间。随着大数据采集和管理技术的进步，使得海量轨迹信息的挖掘和应用成为可能，本文拟借鉴词向量理论<sup>[17]</sup>，将能够体现居民出行偏好规律的轨迹词向量相关性作为多中心距离参数，实现更为准确的多中心引力分析。词向量原本是利用词句上下文相关关系进行自然语言数据挖掘的技术，由于学者们发现轨迹段与词句可以构成类比关系，反映轨迹的分段、上下游和出行偏好规律，因此可以将其应用于交通流热点区域预测<sup>[18]</sup>、轨迹伴随模式挖掘<sup>[19]</sup>和城市功能区识别<sup>[20]</sup>，利用其分析结果作为多中心距离参数，引力分析结果将也更加准确。

因此，将空间句法和词向量理论引入引力模型，对其参数计算方法进行优化，有利于将面向个体的动态大数据与传统数据结合，挖掘居民个体对空间结构的主观感受和偏好规律，准确识别和解析城市多中心实际发展状态。本文拟基于多源大数据，结合城市人口经济空间分布、社会活动状态和空间句法可达性，对城市多中心综合实力进行测度，然后基于轨迹词向量度量多中心距离参数，通过对引力模型的参数优化，准确识别并划分多中心势力范围，呈现城市多中心实际演化状态，为及时评估城市发展进程，调整规划和相关政策提供理论和技术支撑。

## 2 研究区域与数据源

### 2.1 研究区域

郑州市作为中原地区的新一线城市，在2018年《郑州市中心城区总体城市设计》提出了多中心发展目标，包含19个城市多中心，其中一部分经过多年建设已经成型，一部分发展较晚但也初具规模，还有一部分为愿景规划刚刚起步建设，因此为准确呈现和评价城市多中心建设的现有状态，还需充分利用多源数据和科学方法进行实证分析。规划多中心设计如图1所示。

### 2.2 数据来源

研究数据包括郑州市人口和GDP空间分布数据、兴趣点POI数据、统计年鉴数据、道路数据和出行轨迹数据等。

人口和GDP空间分布数据。从中国科学院资源环境科学与数据中心下载,在全国分县统计数据的基础上,综合分析了土地类型、夜间灯光、居民点密度与人口或GDP的空间互动规律,然后通过建立关系模型,并进行栅格空间运算得来。其主要作用为在多中心综合实力评价体系中,体现人口经济指标。

兴趣点POI数据和统计年鉴数据。经过数据整理和空间统计,用于反映城市多中心综合实力评价体系中的社会活动指标。

道路数据。一方面用于城市结构的空间句法分析,利用基于格网单元的空间句法整合度反映城市各个区域的可达性;另一方面用于轨迹点空间位置匹配,构造分段轨迹,并利用词向量模型完整表达居民出行的空间信息和偏好规律。

出行轨迹数据。包括出租车(约6000辆)和电动自行车(约20万辆)轨迹两类,通过交管部门的综合管理系统采集,2019年初郑州市为辖区内电动自行车免费上牌并安装防盗定位设备,以实现防盗定位和交通管理功能,两类轨迹数据均为城市居民重要的通勤方式,可以在一定程度上体现居民出行规律。本文选用2020年7月1日—31日的定位点数据构造轨迹词向量语料库,以实现多中心区域相关性度量。

### 3 研究方法

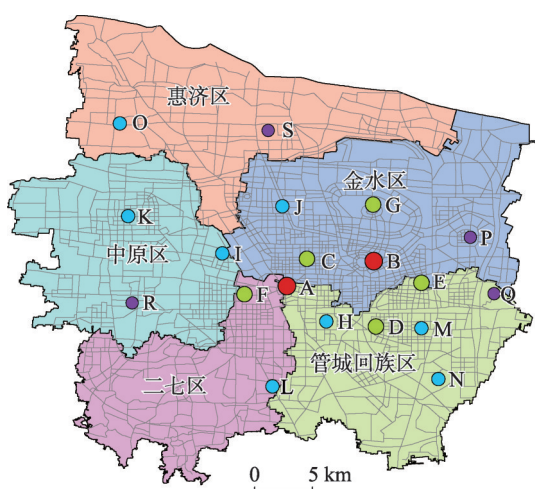
#### 3.1 引力模型及参数优化技术路线

Huff的引力模型<sup>[5]</sup>构造了居民出行的出发地与目的地间的概率计算方法,其典型实际应用就是势力范围划分,将其应用于多中心空间形态研究,可以较为准确的呈现多中心对周边区域的吸引强度和影响范围。有学者通过实证调查,验证了居民出行目的地的比例符合引力模型的规律<sup>[21]</sup>。模型公式为:

$$P_{ij} = \frac{S_j T_{ij}^{-\alpha}}{\sum_{j=1}^n S_j T_{ij}^{-\alpha}} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (2)$$

式中:  $P_{ij}$ 为区域*i*为多中心*j*的势力范围的概率;  $S_j$ 为多中心*j*的综合实力测度值;  $T_{ij}$ 为区域*i*到多中心*j*之间的距离;  $\alpha$ 为距离衰减系数,经研究验证可取其值为2.5<sup>[21]</sup>;  $n$ 为多中心数量。



图例 ● 主中心 ● 副中心 ● 区级组团 ● 特殊功能区

注: 城市多中心与组团位置根据2018年5月《郑州市中心城区总体规划》绘制,其中从行政归属上划分,郑东新区属于金水区,经济技术开发区属于管城回族区,高新技术开发区属于中原区,因此在图中将其合并至对应行政区划。A二七广场主中心,B郑东新区主中心,C花园路副中心,D福塔副中心,E东站副中心,F碧沙岗副中心,G龙湖副中心,H紫荆山路区级中心,I北站区级中心,J城北区区级中心,K高新区组团中心,L二七新城组团中心,M经开城区区级中心,N经开新区组团中心,O古荥组团中心,P大学城教育特殊功能区,Q省级市民文化特殊功能区,R市级市民文化特殊功能区,S惠济会展特殊功能区。

图1 郑州市城市规划多中心结构

Fig. 1 Urban planning polycentric structure of Zhengzhou city



本文拟对模型中包含的两个重要变量 $S_i$ 和 $T_{ij}$ 的测定方法进行优化,以期实现更加准确的都市多中心识别及其空间结构分析。研究方法分为数据处理、引力模型多中心实力参数计算、引力模型距离参数计算和多中心势力范围划分与评价4部分,技术路线如图2所示。

① 数据处理。对多源数据进行清洗、纠偏、裁剪和格式化。② 引力模型多中心综合实力参数计算。首先借鉴已有成果构建多中心综合实力评价指标体系,包含人口经济空间分布、社会活动强度和空间可达性3大类指标,其中空间可达性指标,可以利用空间句法整合度进行度量,其优点在于能够兼顾城市空间的客观拓扑结构和居民出行时的主观感受,然后利用层次分析法求得3类指标的权重后,通过空间加权叠加分析,得到研究区域的综合实力空间分布,将其分级可视化,并结合城市要素实地分布,即可进行城市多中心识别,同时完成多中心综合实力参数的定量化计算。③ 引力模型距离参数计算。多中心空间位置及其综合实力参数确定后,还需借鉴词向量理论,通过轨迹点位置匹配、训练词向量语料库、计算余弦相似度和向量范数等步骤,将可以反映轨迹空间特征和统计规律的轨迹词向量相关性,作为多中心距离参数,代入引力模型进行引力分析和势力范围划分。④ 基于引力模型的多中心势力范围划分与评价。将多中心综合实力和距离参数代入引力模型,进行城市多中心吸引强度分析,并划分势力范围,可综合呈现多中心的实际发展演变状态。同时,利用传统引力模型参数计算方法进行多中心势力范围划分,将两种分析结果进行对比,结合空间统计和实地调查,即可检验本文方法的准确性和有效性。另外,对识别和规划多中心势力范围进行对比,还可以从空间结构角度对多中心现实发展状态进行分析评价,判别规划目标的实现进度,为及时调整优化城市规划提供参考。

以下小节为技术路线中涉及的关键参数改进方法。

### 3.2 基于层次分析法和空间句法的多中心综合实力测度

对于城市多中心综合实力参数 $S_i$ 的测定方法,本文借鉴已有成果<sup>[14]</sup>并通过专家咨询确定评价指标,包括人口经济空间分布、社会活动强度和空间可达性三大类指标,通过问卷调查,并利用层次分析法求得各指标权重。其中,对于评价指标体系中的空间可达性,引入可以兼顾城市空间客观结构和居民对空间结构的主观感受的空间句法理论进行计算。所有指标的权重和取值计算完毕后,进行空间加权叠加,即可得到整个研究区域的综合实力空间分布。

综合实力评价指标通过问卷调查统计得分,共取得有效问卷851份,调查对象年龄分布均匀,职业分布广泛,利用层次分析法求得各指标权重。步骤为:① 构造评价指标体系权重判断矩阵,通过各指标调查问卷得分,两两对比计算权重;② 利用一致性检验判断是否存在显著性差异;③ 调试和修正指标权重;④ 将人口经济、社会活动和空间可达指标的分析结果进行空间加权叠加,可得整个研究区域的综合实力空间分布;⑤ 结合综合实力空间分布和城市要素的实地分布特征,对城市多中心进行识别,并利用GIS

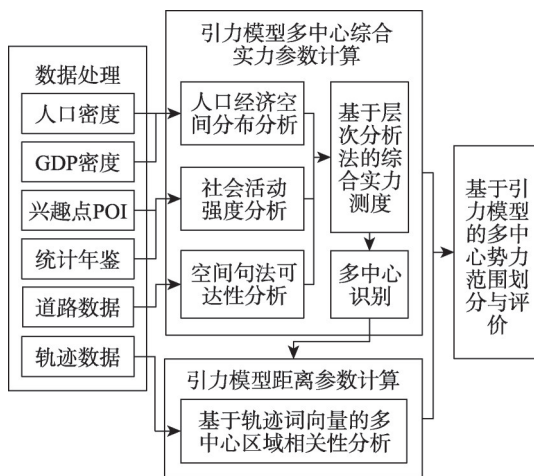


图2 多中心引力分析技术路线

Fig. 2 Technical route of multi-center gravity analysis

计算多中心邻域空间综合实力均值,即可求得多中心综合实力测度值。表1为多中心综合实力评价指标及其权重。人口经济指标和社会活动指标主要利用POI和统计年鉴数据,经过空间统计方法进行计算,而空间可达指标是本文的改进重点。

传统的空间可达性研究<sup>[22-24]</sup>,大多基于最短距离、交通成本、机会可达性和时间距离等度量区域的可通达程度,但此类方法仅从出行方式、拓扑关系和道路状态等客观信息进行研究,并未考虑人对空间结构的主观感受。而居民出行时选择道路的依据,除了路径最短之外,还与道路空间结构密切相关,例如道路等级(优先选择主干道和快速路),路径中的转弯次数(距离相近的几种路径中优先选择转弯次数少的)。空间句法理论基于城市空间拓扑结构,兼顾居民出行时对空间结构的感知体验,构造了连接值、深度值、选择度和整合度等指标<sup>[25]</sup>,将其用于空间可达性分析,继而进行多中心的综合实力评价,其结果将更加符合实际的区域可达性分布规律。

整合度是空间句法理论中的重要概念,表达的含义为某区域到交通网络内其他区域最短路径之和的倒数。研究验证<sup>[12-13]</sup>整合度体现了拓扑空间内,某区域与其他区域连接的复杂程度,也直接影响了该区域的可达性,整合度高的区域交通流量大、设施密集、空间利用率高,因此可以利用其度量城市多中心的空间可达性。拓扑空间中某区域整合度 *Integration* 公式为:

$$Integration = \frac{n \left( \log_2 \frac{n+2}{3} + 1 \right)}{(MD-1)(n-1)} \quad (3)$$

式中: *MD* 为该区域平均深度值(拓扑空间中两相邻区域的深度值计为1); *n* 为拓扑空间中区域总数; *Integration* 为城市路网中某条路段的整合度。

在路段整合度的基础上,再考虑空间可达性的表达。某区域的可达性通常由合围该区域的几条道路的可达性决定,因此对研究区域进行格网划分,并根据格网单元与周边道路距离,以及道路本身的等级和属性信息,即可计算该格网单元的空间句法可达性 *SSA* (Space Syntax Accessibility)。公式为:

$$SSA = \max \left( Integration_i^{1 - \frac{d_{ij}}{D_i}} \right) \quad (4)$$

式中:  $Integration_i$  为路段 *i* 的整合度值;  $d_{ij}$  为格网单元 *j* 与路段 *i* 的距离;  $D_i$  为路段 *i* 的影响半径,根据道路等级和周边城市要素聚集程度,通过加权计算得到。

图3为路段对格网单元可达性影响示意图。整个研究区域内所有格网单元的空间句法整合度计算完毕后,再与人口经济指标和社会活动指标进行空间加权叠加,可得整个研究区域的空间综合实力空间分布,同时结合城市要素的实地分布特征,对城市多中心进行识别,并利用GIS计算多中心邻域空间综合实力均值,即为该多中心的空间综合实力测度值。

表1 多中心综合实力评价指标及其权重

Tab. 1 The comprehensive strength evaluation indexes of multi-centers and their weights

一级指标	二级指标	权重
人口经济指标	人口空间分布	0.1565
	GDP空间分布	0.1768
社会活动指标	餐饮和购物服务	0.0620
	科教文化服务	0.0375
	旅游和体育休闲服务	0.0126
	公共和交通设施	0.0397
	公司企业和金融保险服务	0.0700
	酒店和住宿服务	0.0354
	生活和医疗保健服务	0.0554
	政府机构和社会团体	0.0207
空间可达指标	空间句法可达性	0.3333

3.3 基于轨迹词向量的多中心距离参数计算

计算引力模型多中心距离参数 $T_{ij}$ 时，可以引入词向量理论对海量轨迹数据隐含的空间信息进行挖掘，不但能够借助轨迹词向量表达研究区域与多中心在空间上的距离远近，同时还能将居民出行的统计规律和偏好信息考虑在内，因此将轨迹词向量相关性作为多中心距离参数 $T_{ij}$ ，有利于更准确的利用引力模型呈现多中心的吸引强度。

词向量技术可以通过训练构建语料库，在向量空间中表达词句及其上下文相关关系，从而实现计算机程序对自然语义的理解。将其引入城市多中心研究时，可以将移动目标轨迹段类比为单词，轨迹类比为语句，实现区域相关性分析，同时轨迹段（单词）的出现频度与居民出行偏好密切相关<sup>[19]</sup>，因此利用词向量可以更加准确的反映轨迹数据体现出的城市多中心间的相关关系。轨迹段词向量相关性示意图如图4所示。

图4中的箭头代表路段，方向代表交通流运行方向，粗细代表轨迹数量多少。路段A为路段B、C和D的下游路段，且路段A的主要流量来源于路段C，少量来源于路段B和D；同时路段A为路段E、F和G的上游路段，且其轨迹流量主要流向路段G，少量流向路段E和F。可以看出路段C、A和G在轨迹中作为上下游路段出现的频率更高，其相互影响作用也高于其他路段，此种轨迹上下游相关关系与词向量上下文关系一致。训练轨迹词向量语料库时，首先按照路网拓扑关系将所有轨迹切分为子轨迹段集合，并建立其上下游关系链接，根据海量子轨迹段在路段中出现的频率，及其上下游关系，即可使用Python工具包Gensim训练语料库。基于轨迹词向量的区域相关性度量方法，流程如图5所示。

（1）定位点生成轨迹，并训练轨迹词向量语料库。首先将轨迹点匹配至路网，按照定位时序生成轨迹，然后按照路网拓扑结构对轨迹分段，将轨迹段类比为词，整条轨迹类比为语

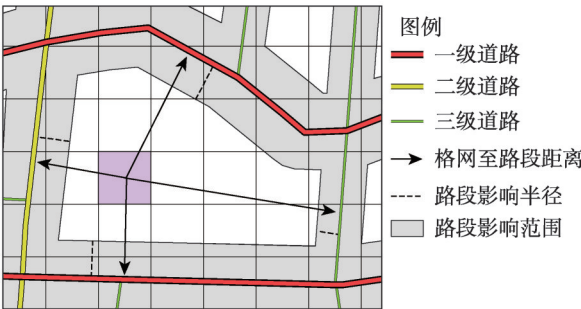


图3 路段对格网单元可达性影响示意图  
Fig. 3 The influence of road section on the accessibility of grid cells

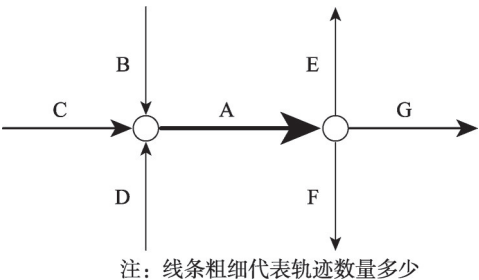


图4 轨迹段词向量相关性示意图  
Fig. 4 Word vector correlation of trajectory segments

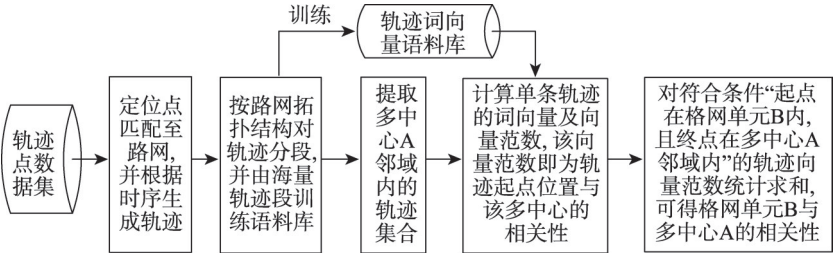


图5 基于轨迹词向量的区域相关性度量方法  
Fig. 5 Regional correlation measurement method based on trajectory word vector



句,使用Python工具包Gensim即可通过海量轨迹段训练语料库,其中记录了所有利用路网拓扑截取的轨迹段标识及其实数向量。

(2) 利用语料库计算轨迹起讫点相关性。基于轨迹词向量语料库,即可求得任意一条轨迹段的词向量,以及与其他轨迹段的词向量余弦相似度,相似度高则两个单词作为上下文出现的概率高,轨迹段之间的上下游关系密切。对某条轨迹包含的子轨迹段词向量求和,可得整条轨迹的语句向量,计算其向量范数(数学意义上的向量长度),即为轨迹起讫点之间的相关性,它不但体现了轨迹的方向和长度等空间特征,还可以通过对轨迹上下游的相似度运算,反映居民出行的偏好,轨迹信息的表达更加完整准确。

(3) 多中心区域相关性度量。对符合条件“起点在格网单元 $j$ 内,且终点在多中心 $i$ 邻域内”的轨迹向量范数统计求和,可得格网单元 $j$ 与多中心 $i$ 的相关性,即多中心距离参数 $T_{ij}$ 。基于多中心的综合实力参数 $S_j$ 和多中心距离参数 $T_{ij}$ ,即利用Huff的引力模型计算城市各个区域属于某个多中心的概率,按照概率最大原则,可以对其势力范围进行划分,同时再引入绝对势力范围的概念<sup>[26]</sup>,即概率高于0.27才表示该格网单位的居民主要出行方向为对应多中心,通过势力范围划分并结合城市实地特征进行多中心空间结构实际演化状态的分析与评价,可以为及时调整城市规划和相关政策提供参考依据。

## 4 实验与分析

### 4.1 多中心综合实力参数测定

基于层次分析法计算的三大类指标及其权重,可以对多中心综合实力参数进行定量计算。图6a和6b为郑州市人口和GDP空间分布,对应多中心综合实力评价指标体系中的人口经济指标。图6c为社会活动强度分布,按照多中心综合实力评价指标体系对POI

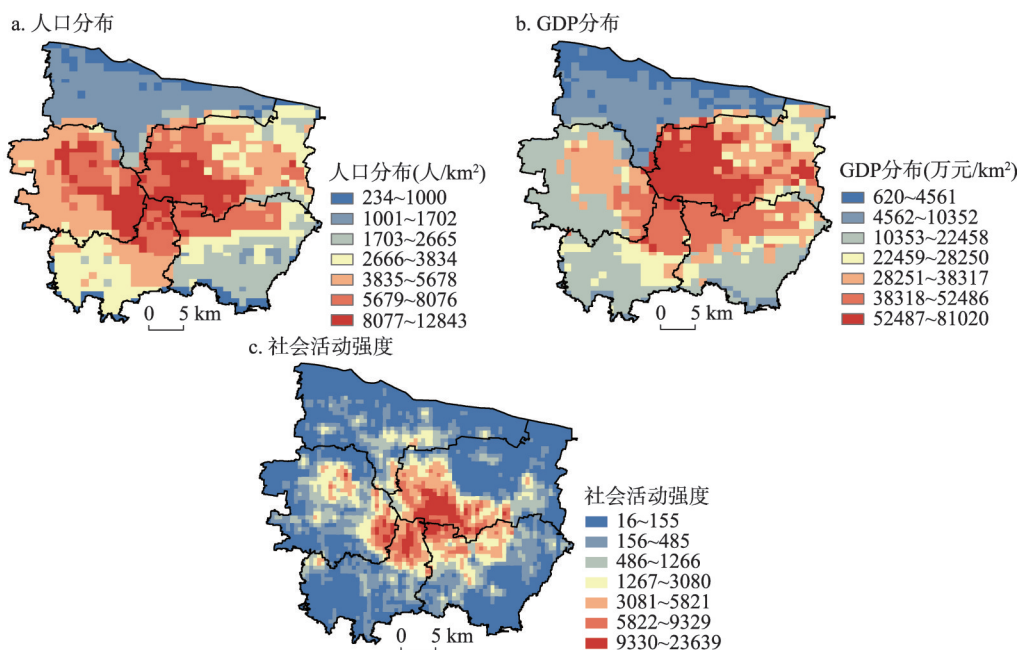


图6 郑州市多中心综合实力评价指标空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of multi-center comprehensive strength evaluation index in Zhengzhou

要素进行分类, 结合指标权重, 即可利用空间加权叠加工具, 计算社会活动强度, 该结果对应多中心综合实力评价指标体系中的社会活动指标。

对于空间可达指标, 本文首先构建城市路网拓扑结构, 使用DepthmapX软件, 进行空间句法整合度分析, 利用ArcGIS对整合度进行分级可视化。从图7a可以看出, 城市主干道、快速路, 以及路网密集的核心城区整合度较高, 次级道路和外围城区道路的整合度相对较低。然后构建覆盖郑州市的规则格网, 根据格网单元与周边路段的距离、路段等级、路段属性和路段整合度, 计算格网单元的空间句法可达性SSA, 经过分级可视化, 此分析结果对应多中心综合实力评价指标体系中的空间可达指标。从图7b可以看出, 郑州市的空间可达性, 以核心城区中心, 向外围逐步降低, 并且较为平直的主干道周边可达性更高, 经过轨迹流量空间统计验证, 区域可达性高低与实测轨迹流量大小一致性较高, 较充分的反映了居民出行对城市空间结构的主观感受, 因此可以将其作为多中心综合实力评价指标参与后续分析。

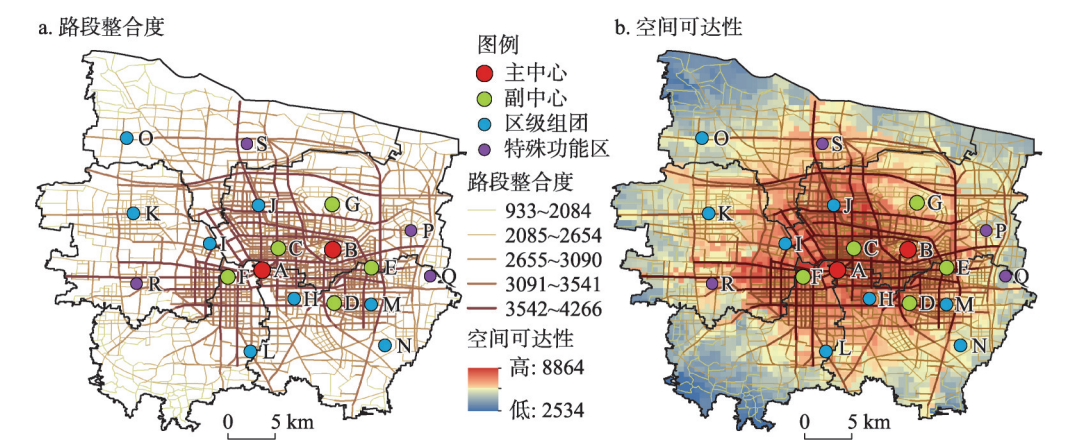


图7 郑州市基于空间句法的可达性分析

Fig. 7 Accessibility analysis based on spatial syntax in Zhengzhou

对以上人口经济、社会活动和空间可达指标的分析结果进行空间加权叠加, 可得整个研究区域的综合实力空间分布。结合城市要素的实地分布特征对城市多中心进行识别, 共得到20个识别多中心(图8a)。城市区域综合实力空间分布与规划多中心如图8b。识别多中心和规划多中心邻域内的综合实力均值(表2)。

通过对比可以发现, 识别出的多中心有13个与规划多中心空间位置一致或接近。从整体上看, 金水区综合实力最强, 而其他4个区邻近金水区的位置, 受其带动和影响, 也呈现出较强的综合实力。结合城市要素实地特征分析发现, 一级和二级的多中心大多集中在核心城区, 空间位置较为接近, 且识别出的位置与规划基本吻合, 此类多中心周边城市要素密集, 交通设施完善, 整体综合实力较强。而三级多中心在外围分散分布, 且部分规划中心并未被识别出来(如N、O和R等), 原因在于它们均为近期规划的承担特殊功能的外围城市多中心, 涉及其核心功能的基础和配套设施还处于建设状态, 加上空间位置偏远, 因此还远未形成规模聚集效应, 综合实力较弱。

通过综合实力分析和多中心识别, 实现了人口经济、社会活动和空间可达性等多种数据的综合运用, 定量化的计算了城市多中心的综合实力参数 $S_i$ 。通过实地调查, 识别出的20个多中心均为城市中人车物较为集中的居住中心、就业中心、商业中心、物流中心和金融中心等, 因此利用此方法识别出的多中心空间位置具有较高的准确性。



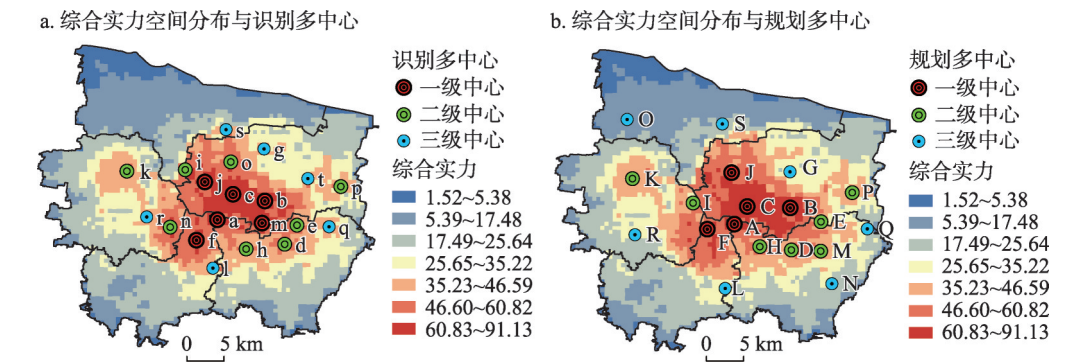


图8 郑州市城市区域综合实力分析与多中心识别

Fig. 8 Urban regional comprehensive strength and identification of multi-centers in Zhengzhou

表2 郑州市多中心综合实力等级

Tab. 2 Comprehensive strength level of multi-centers in Zhengzhou

识别多中心	综合实力	等级	规划多中心	综合实力	等级
a 二七广场	64.60	1	A 二七广场主中心	64.60	1
b 郑东新区	67.44	1	B 郑东新区主中心	65.11	1
c 花园路东凤路	76.88	1	C 花园路副中心	77.23	1
d 航海路第三大街	47.49	2	D 福塔副中心	45.90	2
e 东风南路商都路	49.02	2	E 东站副中心	42.53	2
f 大学路陇海路	59.01	1	F 碧沙岗副中心	53.12	1
g 龙湖中环路龙源路	35.58	3	G 龙湖副中心	30.62	3
h 中州大道航海路	42.99	2	H 紫荆山路区级中心	47.26	2
i 北三环南阳路	48.77	2	I 北站区级中心	44.45	2
j 东风路丰庆路	60.78	1	J 城北区区级中心	58.18	1
k 科学大道瑞达路	42.48	2	K 高新区组团中心	39.57	2
l 京广快速路南三环	37.46	3	L 二七新城组团中心	28.77	3
m 中州大道郑汴路	66.55	1	M 经开区区级中心	39.28	2
n 中原路嵩山路	55.05	2	N 经开新区组团中心	23.87	3
o 花园路三全路	54.55	2	O 古荥组团中心	13.15	3
p 平安大道明理路	40.52	2	P 大学城教育特殊功能区	39.43	2
q 明理路陇海路	37.97	3	Q 省级市民文化特殊功能区	23.32	3
r 西三环建设路	36.98	3	R 市级市民文化特殊功能区	26.32	3
s 花园路开元路	32.78	3	S 惠济会展特殊功能区	19.91	3
t 东三环北三环	35.64	3			

注: 表2中的字母与图8中的多中心位置对应

4.2 多中心距离参数计算

按照基于轨迹词向量的多中心距离参数计算方法, 构建20个识别多中心与所有格网单元的词向量相关性矩阵, 相关性度量值即为引力模型中的距离参数 $T_{ij}$ 。图9选取较为典型的识别多中心a、g、k和p(分别对应规划多中心A、G、K和P)为例, 利用词向量表达其空间相关性。

从分析结果可以看出: ① 不同等级的多中心空间相关性差异较大, 且多中心综合实力等级越高, 其与周边区域的相关性度量值越大, 说明综合实力与区域相关性存在正相关性; ② 多中心词向量空间相关性总体上呈内高外低的环状分布, 并且由于受到城市要

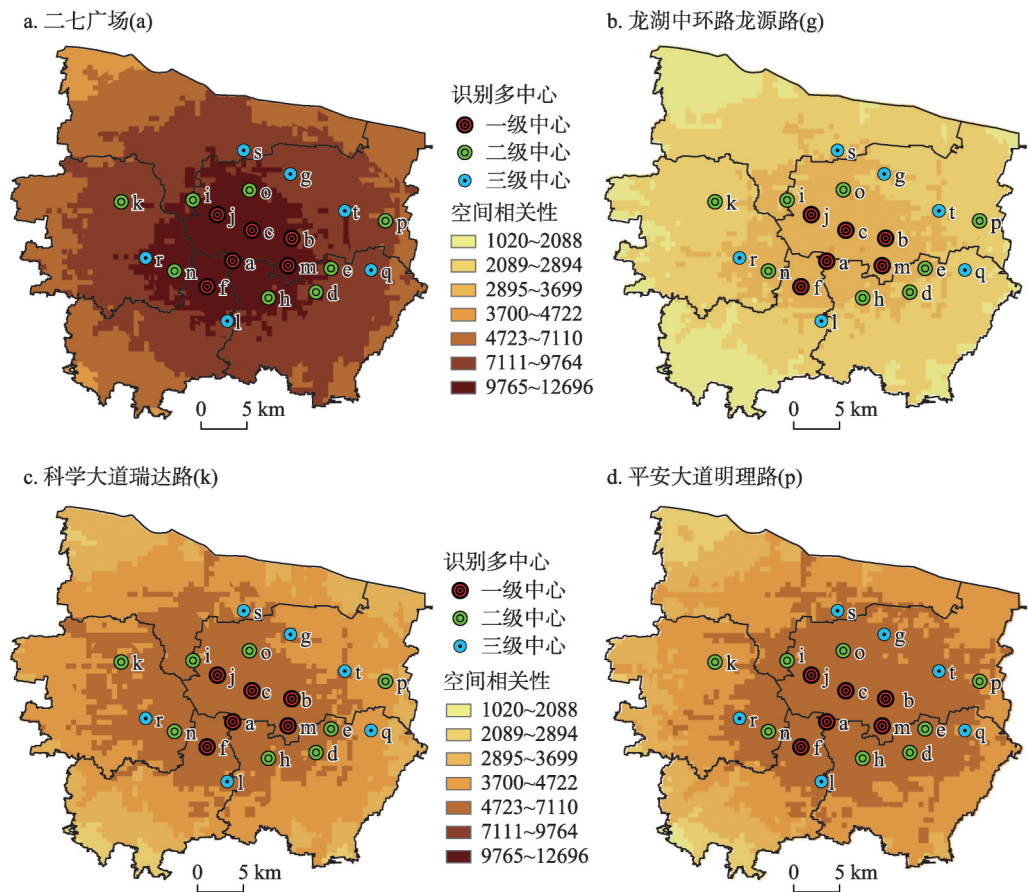


图9 郑州市多中心区域相关性  
Fig. 9 Regional correlation of multi-centers in Zhengzhou

素分布的影响，高值区域呈现出从目标多中心向核心城区倾斜的趋势，说明了城市空间联系的主要方向仍然是核心至外围。

通过分析20个多中心的词向量相关性，可得每个格网单元的相关性度量值。此方法不但较为准确的描述了移动轨迹的分段结构和上下游特征，而且也利用轨迹段出现频度表达了居民的出行偏好，同时通过词向量范数求和计算的相关性还具备数学上的长度（距离）含义，因此将其作为引力模型中的距离参数 $T_{ij}$ 能够有效实现更为准确的多中心引力分析。

4.3 多中心势力范围划分和评价

多中心综合实力参数 $S_i$ 和距离参数 $T_{ij}$ 计算完毕后，利用引力模型综合呈现各个多中心的实际影响范围。图10a和10c为利用优化参数后的引力模型计算并划分的识别多中心与规划多中心势力范围，图10b和10d为利用传统引力模型划分的多中心势力范围，与优化模型的区别在于多中心综合实力参数中的可达性指标使用了最短交通距离模型<sup>[23]</sup>，通过构建最短距离矩阵和可达性系数进行计算，而多中心距离参数则在划分格网的基础上，按照多中心与格网单元中心的路网距离进行计算。

首先，对比优化模型与传统模型分析结果的异同之处，验证本文方法的有效性和准确性。优化与传统引力模型势力范围较为相似，以传统引力模型为基准，识别多中心有

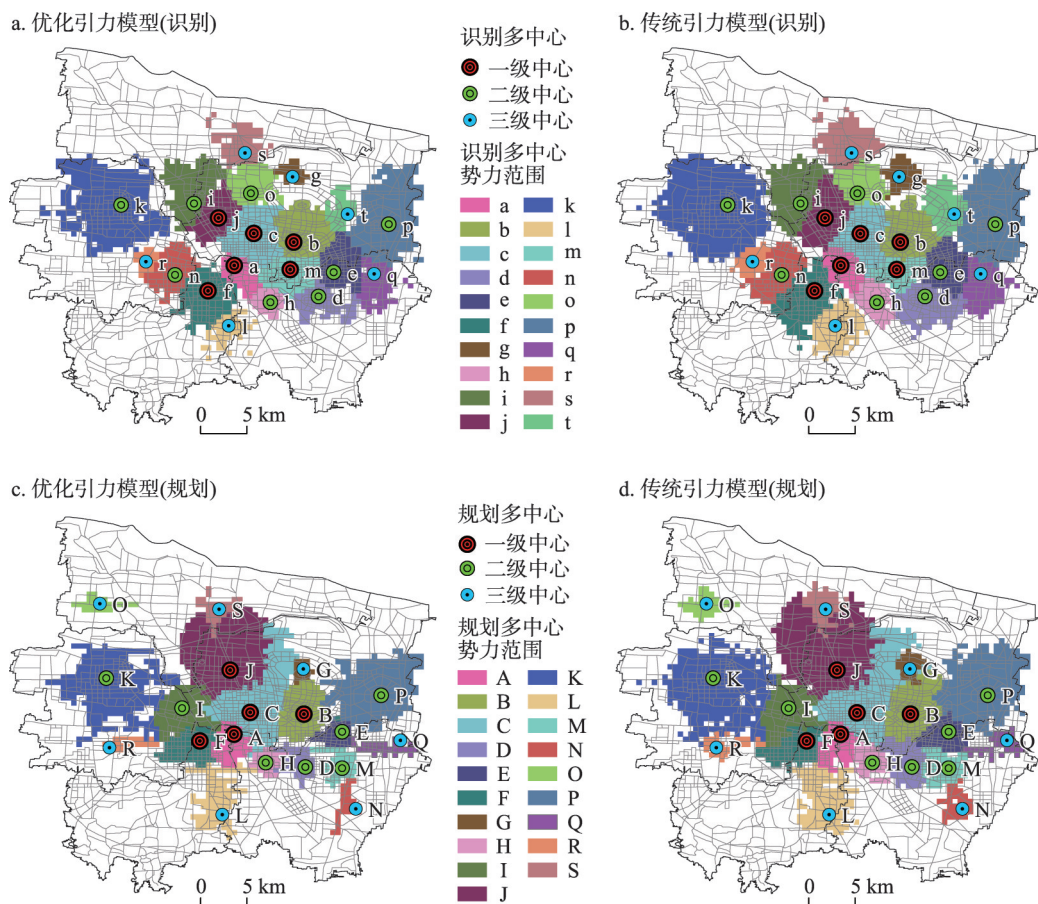


图10 郑州市多中心势力范围

Fig. 10 Spheres of influence of multi-centers in Zhengzhou

约81.39%的格网单元所属势力范围一致,而规划多中心一致比例约为79.02%,结合对城市静态和动态要素的空间统计,以及实地调查结果,可以认为引力势力范围分析较为准确的呈现了城市多中心结构的形态。优化与传统模型分析结果的差异主要在于传统模型引力势力范围更大,且相互挤压程度较轻的外围多中心势力范围空间形态更趋近于圆形。原因在于,传统模型中计算参数时使用的最短交通距离和格网中心路网距离,均是基于路网的客观拓扑结构计算得来,虽然通过人口经济和社会活动要素的静态分布特征对多中心综合实力参数进行了补充,以反映多中心结构的形态规律,但并未将轨迹数据体现的动态规律,以及居民对空间结构的主观感受和偏好考虑在内。而优化模型的考虑则更加全面,例如前文图7b利用空间句法呈现了居民出行时对空间结构的主观感受,更偏向选择较为平直的高等级主干道和快速路出行,其周边的可达性也较高,图9则体现了多中心综合实力等级影响其空间相关性高低的规律,以及外围多中心的空间相关性高值区域向核心城区倾斜的趋势,此种形态与传统模型中多中心距离参数的以某多中心为核心的环形形态存在一定差异,因此也最终体现在了势力范围的差异上。由于优化模型对于动态信息以及居民主观偏好规律考虑的更加充分,并且经过空间统计和实地调查验证,因此可以认为其具有更高的准确性,能够为城市多中心结构评价和优化提供参考依据。



然后,对比识别多中心与规划多中心势力范围,总结城市实际空间结构状态与规划指定的多中心呈现出的空间规律差异。可以发现:①从总体上看,识别多中心的空间位置均为通过规划建设或城市长期自然演化形成,其势力范围更加符合地理学三大定律中的邻近相关性原则,虽然有些格网单元受到多中心综合实力差异的影响,并未属于空间距离最近的多中心势力范围,但这也恰恰反映了城市发展过程中的空间局域异质性,人口、产业和城市要素的聚集程度等因素均会对多中心空间吸引力产生影响;而规划多中心的位置,可以认为是根据现阶段城市发展状态和未来需求人为指定的,并非城市当前真正实际状态,因此利用引力模型分析的势力范围也存在片面和不合理之处,例如图10c中多中心J的势力范围几乎将S半包围,此类现象在城市外围综合实力较低的区域尤为明显,这也从反面说明本文识别出的多中心空间位置具有较高的准确性。②从局部看,识别和规划多中心中有13个空间位置一致或接近,其势力范围面积和空间形态也较为相似,主要包括位于核心城区的一级中心(如a、b和f等),以及外围区域相对独立的二级中心(如k和p等),a、b和f等多中心得益于较高的综合实力和空间可达性,已形成对周边区域较强的吸引能力,但由于空间位置较近,其势力范围相互挤压,而k和p等多中心空间位置相对独立,挤压效应较小,而且基于其城市功能定位和相关政策支持,已形成了大面积的势力范围,以上多中心均为早期规划或自然演化而来,建设成熟,因此形成了相对固定的势力范围,可归类为已建成的城市多中心;而另外一些规划多中心(如G、L、Q和S等)与其对应的识别多中心空间位置较远,甚至未识别出对应多中心(如N、O和R),它们的势力范围面积较小,呈现沿路网延伸的形态,而且表2中其综合实力值远低于其他多中心,说明其仅对有限的邻域内产生吸引作用,还远未实现预期的吸引聚集能力,因此可以归类为未建成的城市多中心。

## 5 结论与讨论

本文针对多源大数据,设计了基于引力势力范围的城市多中心空间形态识别和分析方法,对引力模型中的多中心综合实力和空间距离参数的计算方法进行了改进:①对于多中心综合实力参数,建立了人口经济空间分布、社会活动强度和空间可达性三大类评价指标,并重点利用空间句法理论对空间可达性指标的计算方法进行改进,综合运用多源数据,兼顾城市客观结构和居民对空间的主观感受,实现了对城市区域综合实力测度值的定量表达,并借此完成了较为准确的多中心识别。②对于空间距离参数,利用轨迹与词句的类比关系,引入词向量理论度量多中心与城市其它区域的相关性,不但充分表达了轨迹的方向、长度、分段和上下游等空间特征,反映了居民的出行偏好,同时此向量范数相关性还具备数学意义上的长度(距离)含义,因此将其作为引力模型的距离参数,有利于实现更加准确的多中心引力势力范围分析。③将改进后的参数代入引力模型,划分势力范围,并与传统引力模型势力范围做对比验证,发现二者空间结构虽存在一定差异,但原因可解释,且引力模型对多源数据的运用更充分,考虑的因素更全面,结合实地调查结果,可认为此方法具有较高的准确性和有效性。

优化引力模型与传统引力模型的对比实验可验证本文方法的有效性,同时通过识别多中心与规划多中心势力范围的对比,还可对城市规划多中心发展目标的现实演化状态进行分析和评价,为准确把握城市发展进程,及时优化调整城市规划提供依据,具有一定的理论意义和应用价值。结论如下:从识别与规划多中心势力范围差异看,其中位于核心城区的综合实力较高的一级和二级多中心势力范围相对一致,它们为早期规划或自

然演化形成的已建成多中心,而部分位于城市外围的多中心,识别与规划位置不同,势力范围较小,空间形态差异明显,此类规划多中心为未建成或正在建设的城市多中心,它们还远未形成分散城市功能、疏解城市压力的作用。

因此,提出的规划建议为:①加强城市多中心的产业规划和配套设施建设,基于外围多中心的功能定位给予政策支持,增强聚集效应,促进其综合实力提升,实现其分散疏解作用。②加强交通基础设施建设,提高外围区域可达性,利用交通纽带增强多中心的产业向外辐射和资源向内吸引能力,实现优势互补、良性互动发展的城市体系结构。

后续还应重点研究以下方面:①体现城市多中心综合实力的指标体系,暂时还没有公认的标准,各类社会、自然、人文要素均可能对综合实力产生影响,因此还应深入探索城市要素与多中心综合实力之间的联系及对应权重,建立科学合理的评价方法和指标体系;②居民出行轨迹数据除了出租车和电动自行车数据之外,还包括公共交通、私家车和手机信令等,不同数据反映的移动规律也存在时间和距离等方面的差异,因此还应研究多类轨迹数据的综合分析方法,多中心区域相关性分析的准确程度还有提升空间。

## 参考文献(References)

- [1] Wang Xuhui, Sun Bindong. The economic performance of the polycentric spatial structure of mega-cities: Based on the models of urban economics. *Urban Planning Forum*, 2011(6): 20-27. [王旭辉, 孙斌栋. 特大城市多中心空间结构的经济绩效: 基于城市经济模型的理论探讨. *城市规划学刊*, 2011(6): 20-27.]
- [2] Saarinen E. *City: Its Growth, Its Decay, Its Future*. Gu Qiyuan, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986. [沙里宁. 城市: 它的发展、衰败与未来. 顾启源, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.]
- [3] Harris C D, Ullman E L. The nature of cities. *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 1945, 242(1): 7-17.
- [4] Zhang Dawei. Christaller and central place theory. *Human Geography*, 1989, 4(4): 68-72. [张大卫. 克里斯塔勒与中心地理论. *人文地理*, 1989, 4(4): 68-72.]
- [5] Huff D L, Haggerty J W. Determination of intra-urban retail trade areas. *Revista Salud Uninorte*, 1962, 28(3): 411-418.
- [6] Calabrese F, Lorenzo G D, Liu L, et al. Estimating origin-destination flows using mobile phone location data. *IEEE Pervasive Computing*, 2011, 10(4): 36-44.
- [7] Gao S, Liu Y, Wang Y L, et al. Discovering spatial interaction communities from mobile phone data. *Transactions in GIS*, 2013, 17(3): 463-481.
- [8] Zhou Suhong, Hao Xinhua, Liu Lin. Validation of spatial decay law caused by urban commercial center's mutual attraction in polycentric city: Spatio-temporal data mining of floating cars' GPS data in Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1810-1820. [周素红, 郝新华, 柳林. 多中心化下的城市商业中心空间吸引衰减率验证: 深圳市浮动车GPS时空数据挖掘. *地理学报*, 2014, 69(12): 1810-1820.]
- [9] Peng Fangmei. Economic spatial connection and spatial structure of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay and the surrounding area cities: An empirical analysis based on improved gravity model and social network analysis. *Economic Geography*, 2017, 37(12): 57-64. [彭芳梅. 粤港澳大湾区及周边城市经济空间联系与空间结构: 基于改进引力模型与社会网络分析的实证分析. *经济地理*, 2017, 37(12): 57-64.]
- [10] Hillier B. *Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture*. Yang Tao, Zhang Ji, Wang Xiaojing, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. [比尔·希利尔. 空间是机器: 建筑组构理论. 杨滔, 张洁, 王晓京, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.]
- [11] Qin Tao. The relation of the city traffic network and the land prices based on the space syntax: For Xuzhou. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(1): 55-59. [秦涛. 基于空间句法的徐州市道路结构与地价关系分析. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(1): 55-59.]
- [12] Zhang Anqi, Wang Haijun, Xia Chang. A novel method for the function of road accessibility based on space syntax. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(3): 108-113. [张安琪, 王海军, 夏畅. 基于空间句法的道路通达度作用分计算. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(3): 108-113.]
- [13] Wang Haijun, Xia Chang, Zhang Anqi, et al. Space syntax expand intensity index and its applications to quantitative analysis of urban expansion. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1302-1314. [王海军, 夏畅, 张安琪, 等. 基于空间

- 句法的扩张强度指数及其在城镇扩展分析中的应用. 地理学报, 2016, 71(8): 1302-1314.]
- [14] Wu Yizhou, Chen Xuewei, Zhu Jiayi. Study on the characteristics of supply and demand of urban rail transit based on space syntax and GIS: A case on Hangzhou rail way line one. *Geomatics World*, 2014, 21(2): 13-21. [吴一洲, 陈雪玮, 朱嘉伊. 基于空间句法-GIS的城市轨道交通供需特征研究: 以杭州市为例. 地理信息世界, 2014, 21(2): 13-21.]
- [15] Gan Lin, Cao Guangzhong, Feng Changchun. Measuring the potential of city location and picturing regional dual-nuclei structure with gravity model: Evidence from Jinan-Qingdao in Shandong province. *Areal Research And Development*, 2016, 35(5): 60-66. [甘霖, 曹广忠, 冯长春. 基于引力模型的城市区位潜力测度与区域双核结构刻画: 以山东省济南双核结构为例. 地域研究与开发, 2016, 35(5): 60-66.]
- [16] Xu Peiyuan, Ye Liyun. Spatial patterns of Xia-Zhang-Quan metropolis based on gravity model. *Areal Research And Development*, 2015, 34(2): 56-61. [许培源, 叶丽云. 基于引力模型的厦漳泉大都市区城市空间结构研究. 地域研究与开发, 2015, 34(2): 56-61.]
- [17] Bengio Y, Ducharme R, Vincent P, et al. A neural probabilistic language model. *Journal of Machine Learning Research*, 2003, 3: 1137-1155.
- [18] Liu Kang, Qiu Peiyuan, Liu Xiliang, et al. Measuring traffic correlations in urban road system using word embedding model. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(12): 2032-2040. [刘康, 仇培元, 刘希亮, 等. 利用词向量模型分析城市道路交通空间相关性. 测绘学报, 2017, 46(12): 2032-2040.]
- [19] Li Xin. Trajectory accompanying patterns mining method based on spatial-time segmentation and word vector similarity. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2019, 58(5): 17-25. [李欣. 基于时空切分和词向量相似性的轨迹伴随模式挖掘. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(5): 17-25.]
- [20] Li Xin. Urban polycentric recognition and spatial interaction analysis based on word vector data field trajectory gravity. *Geographical Research*, 2021, 40(1): 230-246. [李欣. 基于词向量数据场轨迹引力的多中心识别和空间交互分析. 地理研究, 2021, 40(1): 230-246.]
- [21] Ding Liang, Niu Xinyi, Song Xiaodong. Validating gravity model in multi-centre city: A study based on individual mobile trajectory. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(2): 268-285. [丁亮, 钮心毅, 宋小冬. 基于个体移动轨迹的多中心城市引力模型验证. 地理学报, 2020, 75(2): 268-285.]
- [22] Lee K, Lee H Y. A new algorithm for graph-theoretic nodal accessibility measurement. *Geographical Analysis*, 1998, 30(1): 1-14. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1998.tb00385.
- [23] Wang Chengjin, Wang Wei, Zhang Mengtian, et al. Evolution, accessibility of road networks in China and dynamics: From a long perspective. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1496-1509. [王成金, 王伟, 张梦天, 等. 中国道路网络的通达性评价与演化机理. 地理学报, 2014, 69(10): 1496-1509.]
- [24] Li Yiman, Xiu Chunliang, Sun Pingjun. Analyzing spatial pattern and accessibility of comprehensive transport in Zhejiang province. *Human Geography*, 2014, 29(4): 155-160. [李一曼, 修春亮, 孙平军. 基于加权平均旅行时间的浙江省交通可达性时空格局研究. 人文地理, 2014, 29(4): 155-160.]
- [25] Jiang Bin, Huang Bo, Lu Feng. *Spatial Analysis and Geovisualization in GIS*. Beijing: Higher Education Press, 2002. [江斌, 黄波, 陆锋. GIS环境下的空间分析和地学可视化. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [26] Ding Liang, Niu Xinyi, Song Xiaodong. A study on spatial characteristics of commercial centers in the Shanghai central city. *Urban Planning Forum*, 2017(1): 63-70. [丁亮, 钮心毅, 宋小冬. 上海中心城区商业中心空间特征研究. 城市规划学刊, 2017(1): 63-70.]



## Recognition of Zhengzhou urban multi-center spatial form based on influence sphere of gravity

LI Xin

(College of Resource and Environment, Collaborative Innovation Center of Urban-Rural Coordinated Development in Henan, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** It is of great significance to identify and analyze the spatial form of urban polycentric structures for the optimization of urban spatial structure. In this paper, the measurement methods of the comprehensive strength parameters and the distance parameters of the gravity model in multi-centers are optimized. Firstly, the accessibility of the spatial syntax which can reflect the perceptions of the residents on spatial structures is combined with the spatial distribution of the population, economic and social activities to build an evaluation system and quantitatively calculate the comprehensive strength of the multi-centers. Then, the word vector correlations, which can express the spatial characteristics and preference rules of the travel trajectory of the residents, are introduced into the gravity model as a distance parameter. Finally, the gravity strength is calculated and the influence sphere is divided to analyze and evaluate the realistic evolution state of the multi-center development goals. Furthermore, comparative experiments revealed that there are some differences in the influence sphere between the optimized gravity model and the traditional gravity model. Verified by spatial statistics and field investigation, the modified model optimizes the use of multi-source data and considers more comprehensive factors, thus providing more accurate spatial morphology analysis results. Findings revealed that there are differences between the spheres of influence of the identified and planned multi-centers, and their spheres of influence in the core urban area of Zhengzhou are very similar. And these centers are multi-centers previously formed through planning or natural evolution. Additionally, the location and spatial form of some peripheral identified multi-centers differ significantly from those of the planned centers. These multi-centers have not been built yet. Hence, they do not satisfy the needs of dispersing and relieving urban pressure.

**Keywords:** polycentric structure; gravity model; word vector; spatial syntax; Zhengzhou city