

武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式

焦利民^{1,2}, 李泽慧^{1,2}, 许刚^{1,2}, 张博恩^{1,2}, 董婷^{1,2}, 谷岩岩³

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学地理信息系统教育部
重点实验室, 武汉 430079; 3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 不同城市要素的集聚现象具有不同的空间模式, 量化研究城市要素集聚模式的差异和联系对于理解城市发展机理、合理制定城市规划具有重要意义。本文以武汉市为例, 获取不透水表面、商业服务业网点(POI)、人口、容积率、城市道路等城市要素数据; 采用核密度估计法识别城市主次中心, 从城市要素的分布形态、集聚程度、集聚模式等来研究城市要素的空间分布格局特征。研究发现, 武汉市呈现“一主七副”的多中心结构, 各城市要素从城市中心向外呈反S型的圈层递减。采用集聚度指数衡量城市要素的集聚水平, 结果显示商业POI、人口密度的集聚程度最大, 其次是容积率、道路密度、不透水表面占比。高度集聚的商业POI、人口密度呈现出点状模式与带状模式相结合的分布模式, 中度集聚的道路密度、容积率呈现点状模式、环状模式与轴状模式相结合的分布模式, 低度集聚的不透水表面密度主要表现为环状模式。城市中心的吸引、立体空间开发等促进了城市要素的向心集聚, 交通干线、稀缺景观资源的廊道效应等重塑了城市要素的空间分布形态。

关键词: 城市要素; 空间集聚; 核密度估计; 梯度分析; 反S方程; 武汉市

DOI: 10.11821/dlxb201708008

1 引言

城市是一个由基础设施、人类活动和社会联系组成的复杂动态系统^[1], 是人口、经济活动等城市要素集聚的某个空间范围^[2]。城市人口、城市经济和城市土地利用等相互影响共同作用形成城市要素系统。研究城市要素系统中各个要素的空间分布和集聚特征是认识城市要素系统的重要途径, 有利于更好地认识城市格局及演化, 有利于理解城市要素的内生发展规律, 为城市土地开发、城市规划等提供理论依据和重要参考。

众多学者研究了城市人口的空间分布与集聚特征, 建立了描述城市人口密度分布的模型, 如Clark模型、Smeed的负幂指数模型及其相关的修正模型如Tanner-Sherratt的正态密度模型、Newling的二次指数模型、加幂指数模型等^[3-6]。探索性空间数据分析(ESDA)用可视化的方式表达人口的空间分布, 常被用来揭示空间的集聚或热点模式^[7]。有研究采用集聚指数描述了流动人口集聚空间分布特征^[8]。在研究城市经济的空间分布与集聚特征方面, 产业经济是众多学者关注的焦点。学者们对制造业、生产性服务业的空间分布与集聚特征进行了深入研究。Ellison等提出的EG指数被广泛运用于衡量比较产业集聚程度^[9], Ripley K函数常用来研究不同尺度下的产业的集聚空间分布, 测定其集聚程

收稿日期: 2016-08-30; 修订日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571385) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571385]

作者简介: 焦利民(1977-), 男, 河南安阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间数据分析与建模、土地利用/覆盖变化与城市扩张方面的研究。E-mail: lmjiao027@163.com

度^[10-13]。此外,空间基尼系数、赫芬代尔系数、地理联系率等被用来反映产业的集聚程度、集聚水平、集聚一致性^[14]。集聚程度的研究是理解集聚现象的一个角度,集聚特征在全面探究产业在空间上的集聚分布规律的基础上揭示集聚现象。目前学者们对各个产业(商业)的集聚特征研究成果较为丰富。基于微观企业数据研究产业空间特征^[12],对办公空间的行业^[11]、生产服务业行业^[15-16]、汽车服务业^[17]等的研究揭示了不同类型产业的集聚空间分布特征。国内学者针对零售商业的集聚类型及集聚特征进行讨论,总结了零售业态在不同区位的差异性集聚特征^[18],并划分出了斑(点)状、条带(线)状、面状及立体状等集聚类型^[19]。还有学者研究了大型商业网点的集聚程度及特征,发现各业态类型网点空间分布差异性较大,具有不同尺度的空间集聚表现^[10]。土地作为城市人口和城市经济活动的载体,是城市中最基本的要素。土地利用结构、土地利用强度与土地利用密度反映了城市土地利用。土地利用强度可用容积率、建设密度、建筑层数等来度量。城市内的基础设施和公共服务设施密度反映了城市的土地利用密度。国内相关学者已对不同用地类型的容积率空间变化规律、同一用地类型多尺度容积率的差异的进行探讨^[20-23]。对于建设用地的集聚特征,国内相关研究采用分形模型^[24]、景观格局指数^[25]、斑块聚合度指数^[26]等模型或指标进行分析。土地利用密度方面,有学者研究了城市内的道路密度空间分布发现道路密度的空间分布呈现明显的集聚特征和地带性^[27]。Jiao于2015年提出城市不透水表面密度随到城市中心距离的增加而呈现出反S型衰减规律^[28]。

尽管国内外学者在城市要素集聚方面已开展大量研究,但已有研究多关注单一城市地理要素的分布模式和集聚程度,缺乏对城市人口、经济活动、土地利用等不同要素空间分布和集聚特征的对比分析,且在对地理要素进行集聚程度划分时,缺乏多个要素间可比较的统一集聚程度指标。

本文以典型的多中心城市武汉市为例,选取不透水表面、人口密度、兴趣点(Point Of Interest, POI)、容积率、道路密度等数据来研究城市要素的空间集聚特征,运用核密度估计法定量识别武汉市城市主次中心,结合梯度分析法划定城市圈层并计算各圈层内城市要素密度,定量拟合各圈层城市要素密度分布形态,采用集聚度指数划分各要素集聚强度类型,分析各要素空间分布和集聚特征,探讨各要素空间分布形成的机理,有助于理解城市要素集聚规律并为城市规划提供决策支持。

2 研究区及数据

2.1 研究区概况

武汉市是湖北省省会,地处江汉平原东北部,位于29°58'N~31°22'N、113°41'E~115°05'E,是华中重要经济中心及区域交通枢纽。长江最大支流汉水与长江在武汉市区交汇,形成汉口、武昌、汉阳三镇鼎立的独特格局,是典型的多中心城市,现辖江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、洪山区、青山区、东西湖区、蔡甸区、江夏区、黄陂区、新洲区、汉南区共13区。

2.2 数据来源及处理

本文采用的数据有不透水表面、人口密度、兴趣点、容积率、道路密度数据。通过解译Landsat遥感影像(2010年)获得研究区不透水表面数据;人口数据为第六次人口普查(2010年)武汉市分街坊人口密度数据;POI数据为2014年网络电子地图数据,共计51.1909万条,POI数据类型划分如表1所示;容积率和道路数据为2013年数据。

表 1 POI数据类型划分
Tab. 1 POI data type classification

ID	大类	子类	比例(%)
1	居住用地	商务住宅相关, 商务住宅住宅区	6.74
2	公共用地	生活服务(人才市场), 政府机构及社会团体, 体育休闲, 科教文化服务, 医疗保健(商业服务业设施用地之外部分)、公共设施	10.06
3	商业服务业 设施用地	餐饮服务, 公司企业(公司), 购物服务, 金融保险, 汽车维修、汽车服务, 汽车销售, 生活服务, 住宿服务, 商务住宅(楼宇)、体育休闲(度假村、高尔夫、休闲场所、娱乐场所、溜冰场、赛马场)、科教文化服务(传媒机构、驾校、培训机构、科教文化场所中有部分数据)、医疗保健服务(宠物诊所、诊所)	78.26
4	工业用地	公司企业(工厂), 公司企业(冶金), 公司企业(矿工), 商务住宅(产业园)	0.53
5	交通用地	道路附属设施, 交通服务设施	3.83
6	绿地与广场用地	风景名胜用地	0.57

注: 根据《城市用地分类与规划建设用地标准》(2011) 进行分类整理。

3 研究方法

3.1 核密度估计法

核密度估计法 (Kernel Density Estimation, KDE) 是非参数的方法。核密度分析易于实现并能较好地反映地理现象空间分布中的距离衰减效应^[29]。其计算公式为:

$$f(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^nK\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$$
 (1)

式中: $f(x)$ 为核函数; h 为带宽, 即圆域的半径; $x-x_i$ 表示估值点到输出格网处的距离^[30]。本文采用 ArcGIS 10.2 中的核密度分析模块进行 POI 密度分析以识别城市主次中心。此外, 采用核密度估计法对城市要素空间分布集聚区域进行分析, 分析不同城市要素的空间集聚特征。

3.2 梯度分析法

梯度分析法包括断面法和圈层法。断面法侧重分析几个设定方向的景观格局变化, 圈层法则适于研究城市集聚分布的宏观形态。为探究圈层对各个城市要素的空间梯度影响, 选择梯度分析法中的圈层法^[31-32]。在形成的圈层结构基础上, 分别计算各圈层的各个要素值。按照公式 (2) 计算商业 POI 密度、道路密度、不透水表面的圈层密度:

$$D_i=\frac{P_i}{S_i}, \quad (i=1,2,\cdots n)$$
 (2)

式中: D_i 表示第 i 个圈层的要素密度值; S_i 为第 i 个圈层的圈层面积扣除水域面积; P_i 为第 i 个圈层的商业 POI 个数或道路总长度或不透水表面面积。

考虑到容积率、人口密度的空间单元特性, 按公式 (3) 进行圈层密度计算:

$$D_i=\frac{\sum_{j=1}^nS_jD_j}{\sum_{j=1}^nS_j}, \quad (i=1,2,\cdots n; j=1,2,\cdots n)$$
 (3)

式中: D_i 表示第 i 个圈层的平均要素值; S_j 为第 i 个圈层所包含的 j 单元的面积; D_j 为 j 单元要素值; n 为每个圈层中包含的单元总数。

3.3 反 S 型方程

Jiao 于 2015 年以全国 28 个主要城市为例, 观察到不透水表面密度随着到城市中心距离呈现反 S 型递减规律, 并提出了一种反 S 型方程对这种分布进行拟合, 效果很好^[28]。该

方程也可以用不同类型城市要素空间分布拟合。本文将运用该反S型方程对武汉市各个城市要素的圈层密度分布进行拟合分析。该方程如下:

$$f(r) = \frac{1-c}{1+e^{\alpha(2r/D)-1}} + c \quad (4)$$

式中: f 表示城市要素密度; r 表示到城市中心的距离; e 是欧拉数; α 和 D 是参数, α 是控制反S方程曲线的斜率的参数, D 表示主要城市区域半径的拟合估计值; C 表示城市边缘城市要素的密度。

根据城市不透水表面密度的反S曲线可以进行城市圈层划分, r_1 表示核心区, r_1-r_0 表示近城区, r_0-r_2 表示外城区, r_2 以外为边缘区(图1)。详细推导和计算过程参考文献[28]:

$$r_0 = \frac{D}{2} \quad (5)$$

$$r_1 = \frac{D}{2} \left(\frac{-1.316957}{\alpha} + 1 \right) \quad (6)$$

$$r_2 = \frac{D}{2} \left(\frac{1.316957}{\alpha} + 1 \right) \quad (7)$$

密度分布曲线的形态直观地反映了集聚要素的集聚形态。曲线斜率越大, 表示要素越向中心集聚, 要素密度随着距中心距离的增加而快速下降; 曲线斜率越小, 则表示要素集聚程度较低, 呈现密度缓慢下降的蔓延分布特征。

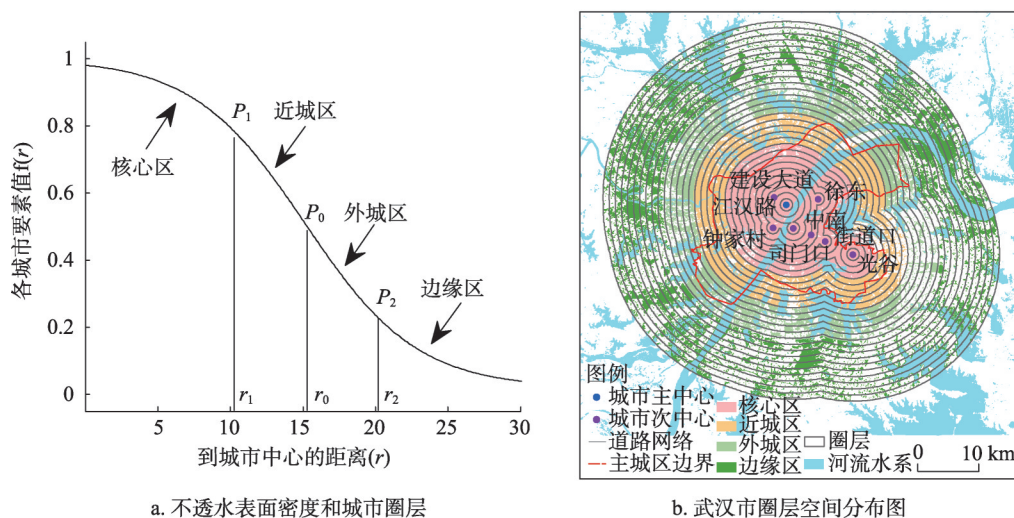


图1 武汉市圈层区域划分

Fig. 1 The partitioning of urban area of Wuhan city

3.4 城市要素集聚度指数

基于上述密度拟合方程, 建立集聚度指数 (Concentration Degree Index, CDI) 描述城市要素集聚水平, 定义为城市要素密度分布半径和城市半径的比值。城市半径由不透水表面密度拟合后的参数 D 值 (D_{city}) 决定, 各要素分布半径由各要素拟合后的参数 D 值 ($D_{elements}$) 决定。集聚度指数越小, 表示城市要素集聚程度越高, 城市要素倾向于高密度集聚。比值越大, 表示城市要素集聚程度相对越小, 呈现低密度蔓延。表达式为:

$$CDI = D_{elements} / D_{city} \quad (8)$$

式中: $D_{elements}$ 表示城市各个要素密度分布曲线定义的集聚区半径; D_{city} 表示由不透水表面密度分布曲线定义的城市半径。

4 城市要素空间分布拟合

4.1 城市中心识别与圈层划分

国内外学者对城市中心的识别主要基于就业密度或人口密度数据，运用就业或人口密度峰值、阈值法、参数法和半参数法识别城市中心。在大数据背景下，也有基于位置的社交网络数据进行城市中心识别^[33-38]。本文采用核密度估计法，对主城区内全部POI数据进行核密度分析，采用自然分段法（Natural Break）将核密度分析结果划分为10级，选取核密度高值的7~10级作为城市中心候选区域。结合城市规划及武汉市社会经济发展情况最终确定“一主七副”的城市主次中心，1个主中心（江汉路），7个副中心分别为司门口、钟家村、中南路、街道口、光谷、徐东、建设大道（图2）。对识别出的城市中心进行梯度分析（图3）。第一步，确定各次中心与主中心间不透水表面密度最低点位置。用直线连接主中心与次中心，对该直线进行1 km的缓冲分析（图3a）。对主中心以1 km为半径做缓冲分析（覆盖到次中心），将主中心的缓冲区与直线的缓冲区进行相交处理，通过式（2）计算区域每个环状片段的不透水表面密度值（扣除水域面积），求得不透水表面密度最低的位置（图3b）。其中，中南路、街道口、光谷次中心近似处于城市主中心的放射性轴线上，首先确定主中心和最近的副中心中南路的密度最低点，然后确定中南路和街道口副中心之间的密度最低点，最后确定街道口和光谷的密度最低点。第二步，依次对主、次中心分别以1 km为递增间隔建立系列缓冲区，将确定的密度低点作为缓冲圈层融合点，对此后的圈层进行融合使之形成一个整体（图3c），最终形成“一主

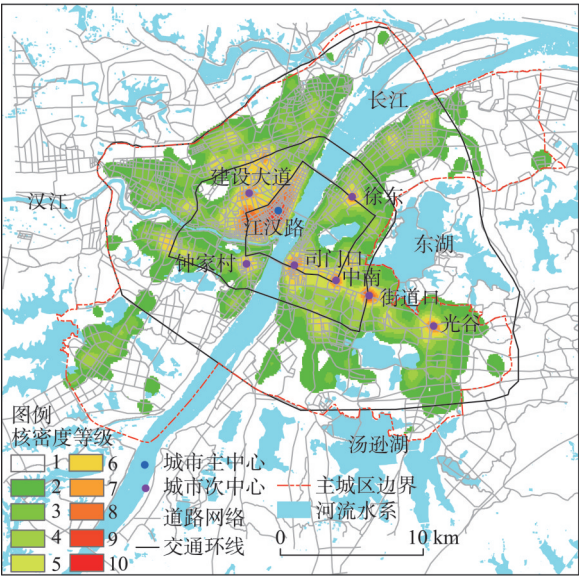


图2 武汉市POI核密度分析结果与多级城市中心
Fig. 2 The results of KDE of POI and the city centers in Wuhan city

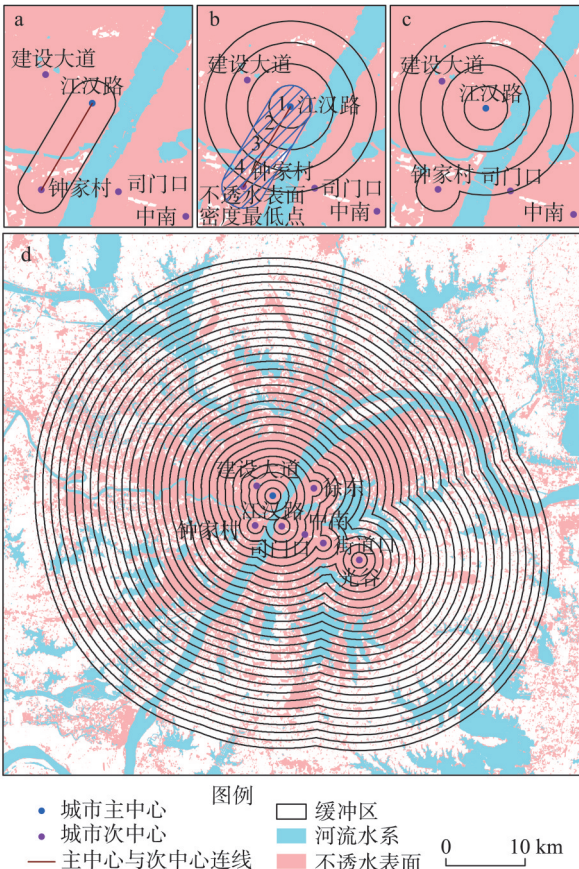


图3 武汉市城市圈层划分过程
Fig. 3 The procedure of gradient partitioning in Wuhan city

七副”的圈层结构。第三步,将该圈层结构继续进行缓冲半径为1 km的缓冲,最终形成由内到外的30个圈层(图3d)。

4.2 城市要素空间分布拟合

选取不透水表面、商业POI、人口密度、容积率、道路密度5类要素,运用公式(2)、(3)计算各个城市要素相应的圈层密度值并进行离差标准化,在Matlab 2014中进行反S方程拟合(表2,图4)。

从表2中可以看出,反S方程拟合决定系数 R^2 均较高,除道路密度外其余城市要素的 R^2 值均大于0.9,反S方程能够很好地拟合不透水表面、POI商业服务设施、容积率、人口、道路的空间分布。依据不透水表面密度将武汉市划分为核心区、近城区、外城区、边缘区。依据反S方程中的计算公式有:核心区在0~10.06 km处,10.06~15.14 km处为近城区,15.14~20.23 km处为外城区,20.23 km外为边缘区。

从图4可以看出,城市要素均从城市中心向外呈现反S型递减的趋势,且各个要素的下降形态存在差异。商业POI密度分布曲线斜率最大,人口密度分布曲线斜率次之,二者均呈现出随中心距离的增加而快速下降的形态,直观表现了商业POI向心集聚性最大,其次是人口密度。道路密度分布曲线整体上呈现相对平缓下降的分布形态,反映出其向心集聚较低。容积率、不透水表面密度呈现出先缓慢下降后快速下降的下降形态。容积率、道路密度等要素在城市中心不同距离处出现局部凸起的起伏形态特征,反映出道路密度、容积率在城市中心和次中心之外存在局部集聚现象。

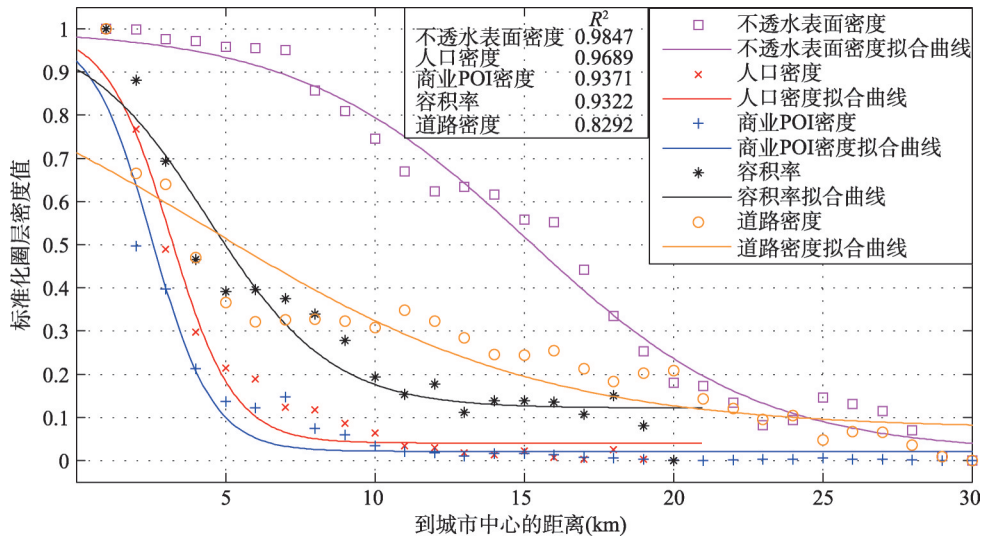


图4 武汉市城市要素反S方程拟合曲线图

Fig. 4 The curves of fitted inverse S-shaped functions of urban elements in Wuhan city

5 城市要素空间集聚特征分析

5.1 城市要素集聚程度类型划分

城市要素的集聚程度采用CDI指标表示(公式(8))。高度集聚的城市要素对应较

低的 *CDI* 值, 且城市要素集聚程度越大, 其 *CDI* 值越小。将 *CDI* 值划分为 3 种类型: 高度集聚 ($CDI < 0.25$)、中度集聚 ($0.25 < CDI < 0.5$)、低度集聚 ($CDI > 0.5$)。从表 3 中可看出, 人口密度、商业 *POI* 的 *CDI* 值均小于 0.25, 高度集中分布, 集聚区域主要分布在城市核心区。相对于不透水表面, 容积率和道路密度呈现中度集聚。

5.2 城市要素集聚空间模式与特征

进一步采用核密度分析法研究不同集聚程度的要素的空间集聚模式, 得到武汉市 5 个城市要素的核密度分析结果 (图 5), 各要素的空间集聚分布模式表现为:

(1) 环状模式: 该模式是从城市中心向外呈现圈层递减分布。从图 5 可看出, 不透水表面密度从城市中心向外呈现出圈层递减的分布, 在城市主城区不透水表面密度核密度值最高, 随着到城市中心距离的增加, 不透水表面密度核密度值不断降低。道路密度从城市主中心呈距离递减分布, 与不透水表面密度的距离递减分布具有较高的一致性。相对一、二环的道路密度值, 三环线的道路密度值最低, 三环线外道路密度值逐渐降低。

(2) 点状模式: 该模式在商业 *POI*、人口密度、容积率、道路密度等城市要素的空间分布中均有发生, 主要在城市次中心及城市组团中心点状集聚表现明显。商业 *POI*、人口密度、容积率、道路密度均在江汉路主中心核密度值最高, 集聚显著。人口密度在中南、钟家村等城市次中心呈现点状集聚。商业 *POI* 在司门口、中南、街道口等城市次中心形成各自的点状集聚, 由此也形成了相应的商圈, 其点状集聚的分布与城市中心结构相对应。容积率在钟家村、司门口等城市次中心以及部分城市组团区域呈现点状集聚。

表 3 武汉市城市要素集聚程度
Tab. 3 The concentration degrees of urban elements in Wuhan city

要素类型	CDI	集聚程度	集聚区域
商业 POI	0.17	高度集聚	核心区
人口密度	0.21	高度集聚	核心区
容积率	0.29	中度集聚	核心区
道路密度	0.30	中度集聚	核心区
不透水表面	1	低度集聚	

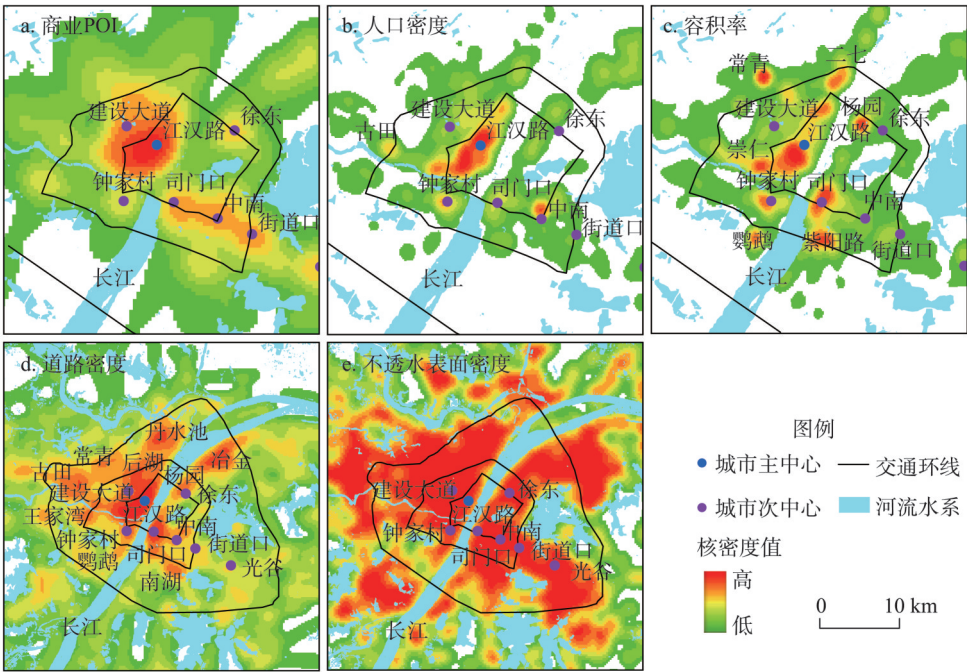


图 5 武汉市 5 个城市要素的空间分布
Fig. 5 The spatial distribution of five urban elements in Wuhan city

(3) 轴状/带状模式: 该模式主要是依托城市交通干线和城市河流等形成带状或轴状分布。从图5中可以看出, 商业POI密度形成了以江汉路主中心为核心, 沿东西方向在武珞路的司门口、中南、街道口多个中心的垂江商务带状轴线。容积率的空間分布整体上呈现南北方向的长江左岸二七、江汉路、钟家村、鹦鹉轴状与长江右岸的杨园、司门口、紫阳路轴状分布模式。

从表4和图6中可看到, 商业POI、人口密度均高度集聚于城市核心区, 集聚模式主要是点状模式和带状模式相结合, 中心指向性高。中度集聚的容积率和道路密度主要呈现以点状模式、轴状模式及环状模式相结合的集聚分布模式。低度集聚的不透水表面密度呈现以环状模式为主的分布模式。

城市要素的集聚程度与集聚模式有一定的对应联系。高度集聚的城市要素是点状模式与带状模式相结合的分布模式。该模式是要素向心集聚最为明显的集聚分布, 以点状集聚模式为基础, 整体上形成带状模式。中度集聚的城市要素是点状模式、环状模式与轴状模式相结合的分布模式。该模式不仅对城市主次中心和次中心依赖明显, 对城市的交通干线及景观资源等依赖较大。低度集聚的城市要素其分布模式是环状模式, 以蔓延扩散的密度衰减为主。

5.3 不同要素集聚的空间分布形成机理

(1) 城市中心的吸引力作用是城市要素向心集聚的重要基础。城市要素以不同的集

表4 武汉市不同城市要素空间集聚度与模式

Tab. 4 Concentration degrees and distribution patterns of different urban elements in Wuhan city

	商业POI	人口密度	容积率	道路密度	不透水表面密度
集聚程度	高度集聚	高度集聚	中度集聚	中度集聚	低度集聚
集聚模式	点状+带状	点状	点状+轴状+环状	环状	环状
中心指向性	极高	高	较高	中	低

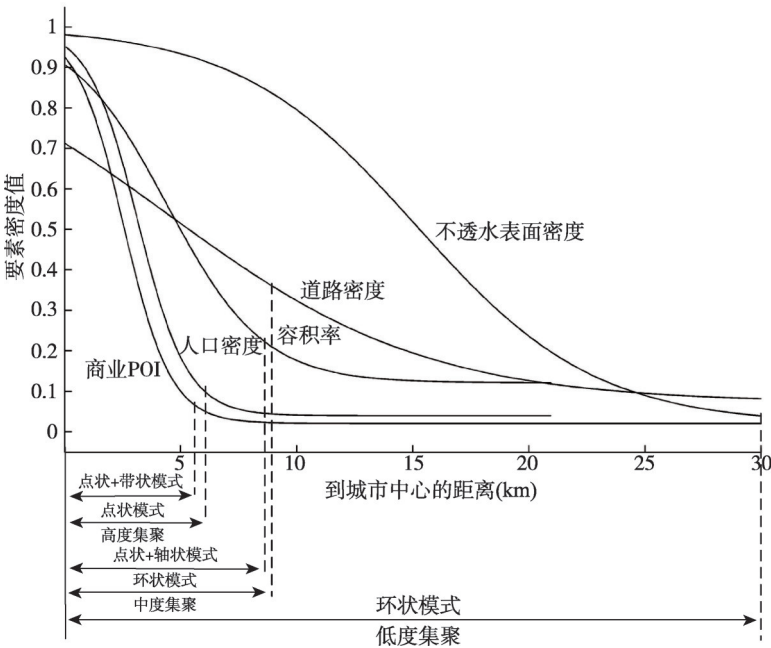


图6 武汉市不同城市要素密度曲线、空间集聚度与模式

Fig. 6 Density curves, concentration degrees and distribution patterns of urban elements in Wuhan city

聚程度集聚在城市主中心、城市次中心及城市规划组团中心的现象揭示了城市中心对不同的城市要素具有不同程度的吸引力作用。城市主中心的吸引力最大,在江汉路主城市中心的吸引力作用下,城市人口、城市经济与城市土地利用集聚显著发生。商业POI、人口密度、容积率、道路密度等在主中心周边形成核心集聚。城市次中心吸引了一定程度的商业POI、人口、容积率及道路密度的集聚,如商业POI、人口等在中南次中心集聚,道路密度、容积率在司门口次中心、徐东次中心集聚。城市规划组团中心吸引力最低,商业POI、人口在低层级的组团中心区域集聚不明显,但容积率、道路密度有不同程度的集聚发生,如容积率在二七、常青等组团中心集聚,道路密度在冶金、古田等组团中心较高。

(2) 城市立体空间开发促进了城市要素的向心集聚。不透水表面密度、道路密度表现了平面土地利用状况。城市人口、城市经济等依托城市建筑的城市要素则反映了城市的立体空间开发状况。随着武汉市的城市建设不断发展,城市中心的基础设施与公共服务设施不断完善,城市人口、商业活动不断涌入中心城区,城市中心的土地利用日益紧张,城市土地平面利用向立体空间开发不断发展。中心城区出现了众多容积率较高的集聚区域,如中山大道与崇仁路交汇处两侧、友谊路两侧区域。

(3) 交通干线对城市要素密度形态的重塑促进了带状模式和环状模式形成。轴向城市干道、交通环线重塑了城市要素的集聚形态。交通干线沿线土地的可达性较强,依据阿伦索的地租理论,商业用地、居住用地等按照自己的区位选择与付租能力在道路两侧沿线进行布局^[39]。中山大道两侧4个城市要素均明显集聚,武珞路、珞瑜路、建设大道、京汉大道两侧商业POI集聚,中南路、汉阳大道两侧人口密度集聚,鹦鹉大道、解放路、复兴路、常青一路两侧容积率较高。轨道交通1号线、2号线、3号线、4号线、6号线的建设开通也大大推动了轨道沿线的土地立体空间的利用。城市交通环线是城市要素呈现从城市中心向外呈环状递减的重要影响因素,进一步重塑了道路密度、不透水表面密度的环状模式。

(4) 稀缺景观资源在城市要素集聚中显现了廊道效应。“江、湖、山、城”是武汉市的自然生态格局,长江和汉江交汇、大小湖泊成为城市独特景观资源。稀缺的景观资源促进了其周边土地利用的“向上发展”。本文中容积率的沿江轴状布局的空间分布模式直观地反映了长江景观带对城市建设发展的影响。

6 结论与讨论

空间集聚是城市要素分布的基本特征。本文针对城市不透水表面、道路、商业、人口、容积率等多种城市要素,采用核密度分析、梯度分析、函数拟合等方法,研究了城市要素集聚的程度和模式,并初步探讨了其形成机理。研究发现,多种城市要素的密度分布总体上符合反S型圈层递减规律。商业、人口呈现高度集聚,容积率、道路密度表现为中度集聚,不透水表面密度的集聚程度最低。要素集聚的空间模式可以划分为点状模式、带状/轴状模式与环状模式,高度集聚的城市要素分布主要表现为点状模式与带状模式,中度集聚的城市要素分布呈现点状、环状与轴状模式相结合,低度集聚的城市要素主要表现为环状模式。城市中心的吸引、立体空间开发等促进了城市要素的向心集聚,交通干线、稀缺景观资源的廊道效应等重塑了城市要素的空间分布形态。

后续研究需要进一步深入,如:除本文涉及的要素以外的其他要素的空间集聚模式,小尺度上要素集聚的空间异质性特征,以及城市要素集聚的时空过程机理等。

参考文献(References)

- [1] Jacobs J. The Death and Life of Great American Cities. New York: Random House, 1961.
- [2] Li Jinyan. Urban agglomeration: Theory and evidence [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. [李金艳. 城市集聚: 理论与证据[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.]
- [3] Batty M, Kim K S. Form follows function: Reformulating urban population density functions. *Urban Studies*, 1992, 29(7): 1043-1069.
- [4] Clark C. Urban population densities. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1951, 114(4): 490-496.
- [5] Cheng Lin. Regional population density function and spatial patterns of economic growth in China [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2014. [程林. 中国区域人口密度模型及经济增长的空间模式[D]. 长春: 东北师范大学, 2014.]
- [6] Feng Jian. Modeling the spatial distribution of urban population density and its evolution in Hangzhou. *Geographical Research*, 2002, 21(5): 635-646. [冯健. 杭州市人口密度空间分布及其演化的模型研究. *地理研究*, 2002, 21(5): 635-646.]
- [7] Chen Gangqiang, Li Xun, Xu Xueqiang. Spatial agglomeration and evolution of urban population in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(10): 1045-1054. [陈刚强, 李郇, 许学强. 中国城市人口的空间集聚特征与规律分析. *地理学报*, 2008, 63(10): 1045-1054.]
- [8] Luo Renchao, Wang De. An analysis on characteristics of floating population distribution in Shanghai by means of accumulation index. *Urban Planning Forum*, 2008(4): 81-86. [罗仁朝, 王德. 基于聚集指数测度的上海市流动人口分布特征分析. *城市规划学刊*, 2008(4): 81-86.]
- [9] Ellison G, Glaeser E L. Geographic concentration in U.S. manufacturing industries: A Dartboard approach. *Journal of Political Economy*, 1997, 105(5): 889-927.
- [10] Wang Shijun, Hao Feilong, Jiang Lili. Locations and their determinants of large-scale commercial sites in Changchun, China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(6): 893-905. [王士君, 浩飞龙, 姜丽丽. 长春市大型商业网点的区位特征及其影响因素. *地理学报*, 2015, 70(6): 893-905.]
- [11] Zhang Jingqiu, Chen Yelong. Industrial distribution and clusters of urban office space in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(10): 1299-1308. [张景秋, 陈叶龙. 北京城市办公空间的行业分布及集聚特征. *地理学报*, 2011, 66(10): 1299-1308.]
- [12] Li Jiaming, Zhang Wenzhong, Li Yejin, et al. The characteristics of industrial agglomeration based on micro-geographic data. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 95-107. [李佳谔, 张文忠, 李业锦, 等. 基于微观企业数据的产业空间集聚特征分析: 以杭州市区为例. *地理研究*, 2016, 35(1): 95-107.]
- [13] Marcon E, Puech F. Evaluating the geographic concentration of industries using distance-based methods. *Journal of Economic Geography*, 2003, 3(4): 409-428.
- [14] Qiu Ling, Fang Chuanglin. Comprehensive assessment on the spatial agglomeration of producer services in Beijing. *Geographical Research*, 2013, 32(1): 99-110. [邱灵, 方创琳. 北京市生产性服务业空间集聚综合测度. *地理研究*, 2013, 32(1): 99-110.]
- [15] Huallicháin B. Agglomeration of services in American metropolitan areas. *Growth and Change*, 1989, 20(3): 34-49.
- [16] Han S S, Qin B. The spatial distribution of producer services in Shanghai. *Urban Studies*, 2009, 46(4): 877-896.
- [17] Zhen Feng, Yu Yang, Wang Xia, et al. The spatial agglomeration characteristics of automotive service industry: A case study of Nanjing. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(10): 1200-1208. [甄峰, 余洋, 汪侠, 等. 城市汽车服务业空间集聚特征研究: 以南京市为例. *地理科学*, 2012, 32(10): 1200-1208.]
- [18] Chen Weishan, Liu Lin, Liang Yutian. Retail center recognition and spatial aggregating feature analysis of retail formats in Guangzhou based on POI data. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 703-716. [陈蔚珊, 柳林, 梁育填. 基于POI数据的广州零售商业中心热点识别与业态集聚特征分析. *地理研究*, 2016, 35(4): 703-716.]
- [19] Fang Xiangyang, Chen Zhongnuan. Agglomerate types of retail business around urban subway station: Taking Guangzhou as an example. *Economic Geography*, 2005, 25(4): 525-527. [方向阳, 陈忠暖. 城市地铁站口零售商业集聚类型划分的探讨: 以广州为例. *经济地理*, 2005, 25(4): 525-527.]
- [20] Yang Yongchun, Wu Junhui, Yang Xiaojuan, et al. Spatial variation and its mechanism of Lanzhou's capital density from 1949 to 2005. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(2): 189-201. [杨永春, 伍俊辉, 杨晓娟, 等. 1949年以来兰州城市资本密度空间变化及其机制. *地理学报*, 2009, 64(2): 189-201.]
- [21] Yan Yongtao, Feng Changchun. Research on spatial structure of urban land use intensity of Beijing. *China Land Science*, 2009, 23(3): 37-43. [闫永涛, 冯长春. 北京市城市土地利用强度空间结构研究. *中国土地科学*, 2009, 23(3):

- 37-43.]
- [22] Li Shaoying, Wu Zhifeng, Li Biying, et al. The spatial and temporal characteristics of residential floor area ratio in metropolitan at multi-scales based on Internet real estate data: Case study of Guangzhou. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 770-780. [李少英, 吴志峰, 李碧莹, 等. 基于互联网房产数据的住宅容积率多尺度时空特征: 以广州市为例. *地理研究*, 2016, 35(4): 770-780.]
- [23] Yang Yongchun, Li Xinjue. The spatial change of urban capital density and its mechanism in China: A case study of Lanzhou. *Geographical Research*, 2009, 28(4): 933-946. [杨永春, 李欣珏. 中国城市资本密度空间变化与机制: 以兰州市为例. *地理研究*, 2009, 28(4): 933-946.]
- [24] Kuang wenhui, Zhang Shuwen. Analyzing the information entropy and fractal dimension of urban land use spatial evolving process from 1900 to 2004 in Changchun City. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2007, 24(1): 73-80. [匡文慧, 张树文. 长春市百年城市土地利用空间结构演变的信息熵与分形机制研究. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(1): 73-80.]
- [25] Lv Xiaofang, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Spatial concentration characteristics of urban land use along highways in rapidly urbanized region of Shenzhen. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(8): 845-855. [吕晓芳, 王仰麟, 彭建, 等. 深圳快速城市化地区公路沿线土地利用空间集聚. *地理学报*, 2008, 63(8): 845-855.]
- [26] Zhang Jing, Li Chenggu, Zhou Guolei, et al. The evolution pattern and mechanism of public service facilities lands in Changchun. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1939-1952. [张婧, 李诚固, 周国磊, 等. 长春市公共服务设施用地演变格局与机制. *地理学报*, 2015, 70(12): 1939-1952.]
- [27] Fan Kehong, Li YangBing, Feng Yongli. Spatial distribution of road density in Chongqing based on GIS. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(3): 365-371. [范科红, 李阳兵, 冯永丽. 基于 GIS 的重庆市道路密度的空间分异. *地理科学*, 2011, 31(3): 365-371.]
- [28] Jiao L M. Urban land density function: A new method to characterize urban expansion. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139: 26-39.
- [29] Yu Wenhao, Ai Tinghua, Yang Min, et al. Detecting "Hot Spots" of facility POIs based on Kernel Density Estimation and spatial autocorrelation technique. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(2): 221-227. [禹文豪, 艾廷华, 杨敏, 等. 利用核密度与空间自相关进行城市设施兴趣点分布热点探测. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(2): 221-227.]
- [30] Flahaut B, Mouchart M, San M E, et al. The local spatial autocorrelation and the kernel method for identifying black zones: A comparative approach. *Accident Analysis & Prevention*, 2003, 35(6): 991-1004.
- [31] Jiao Limin, Xiao Fengtao, Xu Gang, et al. Spatial-temporal response of green land fragmentation patterns to urban expansion in Wuhan metropolitan area. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1650-1660. [焦利民, 肖丰涛, 许刚, 等. 武汉都市区绿地破碎化格局对城市扩张的时空响应. *资源科学*, 2015, 37(8): 1650-1660.]
- [32] Jiao Limin, Zhang Xin. Characterizing urban expansion of main metropolises in China based on built-up densities in concentric rings. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(10): 1721-1728. [焦利民, 张欣. 基于圈层建设用地密度分析的中国主要城市扩张的时空特征. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(10): 1721-1728.]
- [33] Yu W H, Ai T H, Shao S W. The analysis and delimitation of Central Business District using network kernel density estimation. *Journal of Transport Geography*, 2015, 45: 32-47.
- [34] Leslie T F. Identification and differentiation of urban centers in phoenix through a multi-criteria kernel-density approach. *International Regional Science Review*, 2010, 33(2): 205-235.
- [35] Cladera J R, Duarte C R M, Moix M. Urban structure and polycentrism: Towards a redefinition of the Sub-centre concept. *Urban Studies*, 2009, 46(13): 2841-2868.
- [36] Veneri P. The identification of sub-centres in two Italian metropolitan areas: A functional approach. *Cities*, 2013, 31 (343): 177-185.
- [37] Sun Y R, Fan H C, Li M, et al. Identifying the city center using human travel flows generated from location-based social networking data. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2015, 43(3): 480-498.
- [38] Tresserra J M. Does employment density death? Towards a new integrated methodology to identify and characterize sub-centres//52nd Congress of the European Regional Science Association: "Regions in Motion - Breaking the Path", August 21-25, 2012. Bratislava, Slovakia, 2012.
- [39] Ma Zuopeng, Li Chenggu, Zhang Jing, et al. The relationship between different types of traffic route and functional urban land use in Changchun. *Geographical Research*, 2016, 35(9): 1687-1700. [马佐澎, 李诚固, 张婧, 等. 长春市各级交通路线对城市功能用地变化的作用效应关系研究. *地理研究*, 2016, 35(9): 1687-1700.]

The characteristics and patterns of spatially aggregated elements in urban areas of Wuhan

JIAO Limin^{1,2}, LI Zehui^{1,2}, XU Gang^{1,2}, ZHANG Boen^{1,2}, DONG Ting^{1,2}, GU Yanyan³

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Different urban elements may exhibit various aggregation patterns. It is of great significance to quantitatively investigate the disparity and connection among various aggregation patterns of urban elements for understanding the mechanism of urban development and supporting urban planning. Taking Wuhan city, Central China, as a case, we collected five types of urban elements, namely, impervious surface, population density, Point of Interest (POI), plot ratio, and road network, to explore their spatial distribution and characteristics of aggregation patterns. We first used Kernel Density Estimation (KDE) method to identify city centers and we found that there is one major center and seven sub-centers in Wuhan. Then we partitioned the study area by gradient analysis, and calculated the densities of urban elements. The density of urban element decreases outward from the centers, which is fitted well using "Inverse S-shaped" function. We used Concentration Degree Index (CDI) to reflect the aggregation degree of urban elements. The results indicate that the degrees of the aggregation of urban elements are: Commercial POI > population > plot ratio > road. Commercial POI and population are highly aggregated in the urban core area, while plot ratio and road are moderately aggregated in the urban core area. The spatial patterns of highly aggregated commercial POI and population are the combination of point pattern and zonal pattern, while the spatial patterns of moderately aggregated road network and plot ratio are the combination of point pattern, ring pattern and axial pattern. As for the lowly aggregated impervious surface, it shows a ring pattern. The attraction effect of city centers and vertical development promote the center-oriented agglomeration of urban elements. At the same time, the transportation lines and corridor effects of the scarce landscape resources reshape the spatial distribution pattern of urban elements.

Keywords: urban elements; spatial agglomeration; kernel density estimation; gradient analysis; inverse S-shaped function; Wuhan city