



引文格式:李静波,关雪峰,曾星,等.长株潭城市群建成区时空扩展特征及驱动力分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(6):1028-1039.DOI:10.13203/j.whugis20210634

Citation: LI Jingbo, GUAN Xuefeng, ZENG Xing, et al. Spatial-Temporal Expansion Pattern and Driving Mechanism of Built-up Area in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(6): 1028-1039.DOI:10.13203/j.whugis20210634

长株潭城市群建成区时空扩展特征及驱动力分析

李静波¹ 关雪峰¹ 曾星¹ 杨昌兰¹ 邢巍然¹ 吴华意¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:作为新型城镇化的主体,城市群的发展极大地影响着中国城市空间格局的演变。以中国中部崛起重要引擎之一的长株潭城市群为例,从建成区扩展空间分异与交互为视角,基于多时相不透水面数据提取建成区范围,利用分形维数、空间扩展强度、Moran's *I*系数与空间关联指数等多维测度长株潭城市群建成区的组织结构、扩展进程及空间格局,并采用主成分分析、地理加权回归定量揭示扩展驱动机制。结果表明,2003—2018年,长株潭城市群的空间结构具有显著的轴线特征,建成区集中分布在湘江生态轴及铁路、高速、国道等五纵五横综合交通干线上。长沙、株洲、湘潭建成区面积与扩展速度总体趋于上升,但长沙的空间主导地位持续加强。城市群空间增长的聚集态势减弱,建成区扩展及分布格局的总体空间差异减小;其中部存在扩展极核,圈层式辐射带动外围“冷点区”的扩展格局演化。长株潭城市群扩展驱动机制呈现空间异质性,整体主要受社会经济对外联系、行政力及区位与通达性的影响。

关键词:建成区扩展;驱动力;空间交互作用;地理加权回归;长株潭城市群

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2023-02-21

DOI:10.13203/j.whugis20210634

文章编号:1671-8860(2024)06-1028-12

Spatial-Temporal Expansion Pattern and Driving Mechanism of Built-up Area in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration

LI Jingbo¹ GUAN Xuefeng¹ ZENG Xing¹ YANG Changlan¹ XING Weiran¹ WU Huayi¹

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: As the main form of urbanization, the urban agglomeration can greatly affect the urban spatial pattern in China. Methods: Based on the impervious area data of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration (CZT-UA), the spatial organization structure, dynamic development pattern and spatially heterogeneous driving mechanism of the expansion of built-up areas in CZT-UA are quantitatively revealed with a collection of measurement methods, e.g., fractal dimension, expansion intensity index, Moran's *I*, Getis-Ord G_i^* , principal component analysis and geographically weighted regression. Results: From 2003 to 2018, the spatial structure of CZT-UA shows obvious axial distribution, which generally follows Xiangjiang River and the transportation network consisting of five vertical and five horizontal trunk lines. The built-up area and expansion speed of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan show an upward trend. Compared with Changsha, Zhuzhou and Xiangtan expanded more slowly and the gap is gradually widened. The overall spatial differences in expansion and distribution of the built-up area in CZT-UA are gradually narrowed. The hotspot regions of urban expansion form a kernel in central CZT-UA, which provides driving force to the peripheral areas. Conclusions: The geographically weighted regression model demonstrates that the flow of residents and economy between cities, clear policy guidance from government, convenient transportation network as well as the radiation effect of the central city can jointly attribute to the expansion of built-up

基金项目:国家自然科学基金(41971348);国家重点研发计划(2017YFB0503802)。

第一作者:李静波,硕士,主要从事城市扩张研究。Jingbo_Li@whu.edu.cn

通讯作者:关雪峰,博士,教授。guanxuefeng@whu.edu.cn

areas. However, the importance and effects of each factor varied in different regions of CZT-UA.

Key words: built-up area expansion; driving force; spatial interaction; geographically weighted regression; Chang-Zhu-Tan urban agglomeration

城市群是指在特定地域范围内,不同等级城市依托交通、通信等基础设施网络所形成的空间组织紧凑、经济联系紧密且高度一体化的城市综合体^[1]。1980年以来,中国以城市群为主体形态的新型城镇化逐渐发展,涌现出如京津冀城市群、长三角城市群、粤港澳大湾区等典型城市群,对区域发展起到了极大的推动作用^[2-4]。在全球化时代,深入研究城市群建成区时空演变规律与底层驱动机制,可以为建立城市群分层体系、优化空间格局提供科学指导与决策支持,从而提高中国在全球社会经济活动中的核心竞争力^[5-6]。

城市群的研究起源于19世纪末,文献[7]提议城市规划范围应覆盖其外围区域的城镇,形成“城镇集群”的概念;文献[8]将“大城市带”的思想以及“城市群”概念引进中国;文献[9]对城市群基本概念重新进行了概括,强调其空间构成、信息网络化与内外联系。目前国内关于城市群扩展的研究成果颇丰,这些研究经历了从理论到实证、从全局到局部视角、从静态到动态分析的发展。文献[10]从理论层面探讨了城市群在结构、空间扩展及土地利用等方面演变过程;文献[11]以京津冀城市群为例分析了城市群扩展中形成的城市格局差异,并对此提供对策分析;文献[12]定量测度了长江三角洲地区城镇用地总体分布特征以及空间增长的局部异质性;文献[13]利用城镇扩展指数与城镇扩展模型对武汉城市群的时空演变过程进行了分析;文献[14]从地市与区县两个层面讨论了珠三角城市群城镇用地扩展速度差异。上述对城市群时空扩展演化研究的理论与方法已较为完备且趋于成熟,但在特征揭示与研究视角上仍存在如下问题:(1)对城市群建成区扩展缺乏系统的测度,对其空间组织结构的分析不够深入,如特定的扩展轴线与扩张极核未能被显性表达^[15]。(2)城市群的可持续发展得力于各城市单元的协同发展,然而目前城市群扩展的研究对象多侧重在城市群整体,以宏观视角对其发展过程、扩展格局进行探讨,却忽略了城市群各组成单元扩展模式的差异性。

在探究城市群时空扩展规律的基础上,对城市群扩展底层驱动机制也展开广泛研究。在驱动机制研究模型上,线性回归分析法、主成分分

析法、相关性分析法等是城镇用地扩展格局驱动力分析的常用方法。文献[16]利用多元线性回归分时段分地区对京津冀城市群城镇空间扩展面积的驱动因子进行建模;文献[17]通过主成分分析揭示京津冀城市群用地扩展强度的驱动力;文献[18]利用偏相关分析探讨社会、经济及空间自相关因素对上海大都市区城镇面积的影响。现有城市群建成区驱动机制的研究方法仍多为线性回归,然而空间位置与空间相互作用等因素对城市群扩展的影响日益突出,影响因素作用的空间异质性不可忽视^[19-21]。与此同时,驱动机制因子体系的构建对于解释城市群的时空演变及模拟预测具有关键作用。现有研究中驱动因子体系主要涉及社会经济、自然和区位,缺少城市群特有的因子,难以有效揭示城市群内部空间交互作用及要素流动对各单元扩展的影响,无法反映城市与城市群驱动机制的差别。

针对上述问题,本文以中国中部崛起重要引擎之一的长株潭城市群(Chang-Zhu-Tan urban agglomeration, CZT-UA)为例,采用时空地理统计分析方法,多维度对2003—2018年CZT-UA建成区的空间结构特征、扩展过程与扩展格局展开解析,并基于主成分分析、地理加权回归构建城市群扩展驱动机制解释模型,融合体现城市群组成单元空间交互作用的因子,深入识别CZT-UA的时空演化规律,同时揭示各驱动因子作用机制的空间分异。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长株潭城市群位于湖南省中东部,由长沙市、株洲市、湘潭市构成,以湘江为轴,呈品字形分布,共涵盖23个区县,如图1所示(数据来源于湖南省交通厅信息中心)。CZT-UA是湖南省发展最繁荣、城市化过程最快的区域,其中,长沙作为湖南省核心城市,承担着全省政治中心与经济增长极的角色;株洲是湖南省副核心城市之一,是中国老工业基地以及湖南南部的交通门户;湘潭是湖南省核心工业城市和著名的红色旅游城市,也是湖南省重要的副核心城市。CZT-UA不仅是湖南省发展的引擎,而且也是中国长江中游

社会经济、城镇化高度发展的地区^[15]。近年来,随着城市群一体化建设的加快推进,该区域经济竞争力与综合实力显著增强,长沙、株洲和湘潭三市的组织结构愈加紧凑,城市化水平不断提高。

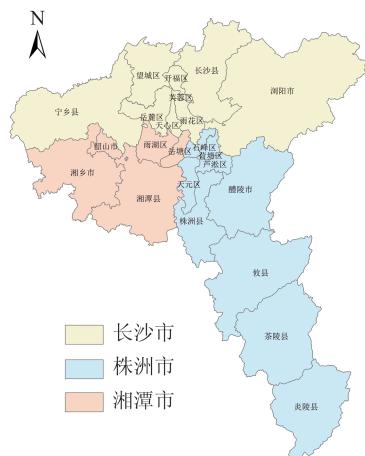


图1 长株潭城市群行政区划

Fig. 1 Administrative Region in CZT-UA

1.2 数据来源

本文基于清华大学宫鹏教授发布的全球30 m分辨率不透水面数据(global artificial impervious area, GAIA)^[22],结合研究区域地形、人口、社会、

经济、交通、通信等相关数据,提取CZT-UA建成区2003年、2008年、2013年与2018年的时序数据。其中,数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于地理空间数据云公开的90 m分辨率航天飞机雷达地形测绘任务DEM数据;人口、社会、经济等统计数据来源于《湖南统计年鉴》与《中国城市统计年鉴》;交通数据来自湖南省交通厅内部年报数据;通信数据指中国移动公司提供的CZT-UA范围内2018年某周手机信令数据与移动基站数据。

1.3 数据处理

1.3.1 时序建成区范围提取

建成区是指城市行政区内已成片开发建设、市政公共设施等基本完备的地区^[23],具体包括不透水面及其附属的绿化、自然景观等功能区域。为有效区分城市与村郊范围,并保证建成区下垫面的完整性,利用全球30 m GAIA设计了基于不透水面聚集密度值分区的建成区提取算法^[24-26],如图2所示。GAIA兼顾较高的空间分辨率与稳定的长时序数据两方面优势,以此设计的建成区提取算法能够获得精确的建成区范围,如图3所示,同时适用于城市群多尺度的空间扩展研究。

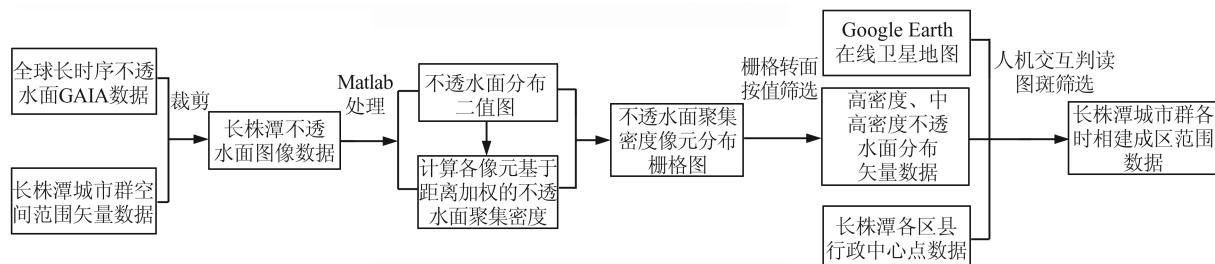


图2 长株潭城市群建成区提取技术流程

Fig. 2 Flowchart of the Extraction of Built-up Areas in CZT-UA

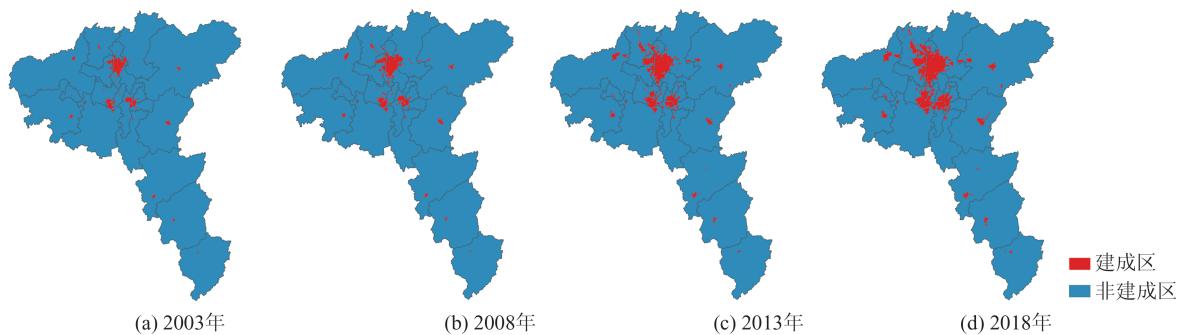


图3 2003年、2008年、2013年及2018年长株潭城市群建成区分布

Fig. 3 Spatial Distribution of Built-up Areas in CZT-UA in 2003, 2008, 2013 and 2018

1.3.2 城群交互型驱动因子构建

城市群各组成单元通过人流、资金流、信息流等不断进行着空间相互作用^[27],这种区域间的远程交互对于城市群空间格局的建立具有重要

意义。为探究要素流动对城市群动态网络中各单元扩展的影响机制,本文利用手机信令通信数据与经济统计数据,构建两个因子支撑后续扩展驱动力建模。

1)对外人流交互强度。对外人流交互强度体现了研究单元的对外人流联系密切程度,交互强度越大说明该单元在区域内的影响力越高。手机信令数据可以反映出由于通勤、差旅等活动在两地间发生的人口流动^[28]。本文结合该数据与移动基站位置信息获得 CZT-UA 以区县为单位的人流量数据,以此计算各区县的对外人流交互量(人/d),计算式如下:

$$f_{ij} = w_{ij} + w_{ji} \quad (1)$$

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

式中, w_{ij} 表示从区县 i 到区县 j 的人流量; w_{ji} 表示从区县 j 到区县 i 的人流量; f_{ij} 表示区县 i 与区县 j 间的人流交互量; P_{F_i} 表示区县 i 的对外人流交互强度; n 表示区县数量。长株潭城市群区县级人流量如图 4 所示。

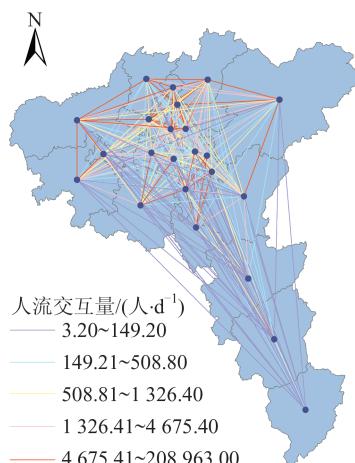


图 4 长株潭城市群区县级人流量

Fig. 4 Origin Destination Data of People Flow Between Districts and Counties in CZT-UA

2)经济联系总引力模型。经济联系总引力模型将引力模型引入经济联系强度的计算,从而表达研究单元的经济辐射能力。本文通过该模型测度 CZT-UA 区县间的经济联系,计算式如下:

$$E_j = \sum_{i=1}^n E_{ij} = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{P_i G_i \times P_j G_j}}{d_{ij}^2} \quad (3)$$

式中, E_j 表示城市 j 对外经济联系的总引力; E_{ij} 表示城市 i 与城市 j 的经济联系强度; P_i 和 P_j 分别表示城市 i 和 j 的非农业人口数,鉴于数据的可获得性,本研究采用城镇人口数; G_i 和 G_j 分别表示城市 i 和 j 的第二、三产业产值之和; d_{ij} 表示 i 、 j 两区县重心间的欧氏距离。长株潭城市群区县间经济联系如图 5 所示。

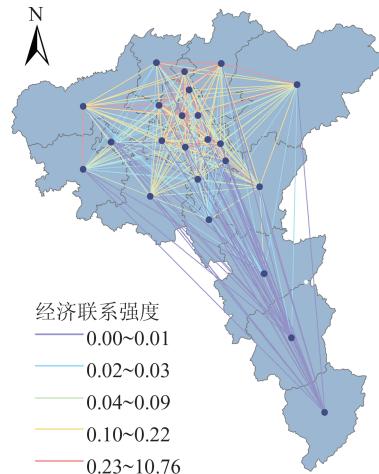


图 5 长株潭城市群区县间经济联系

Fig. 5 Economic Interaction Between Districts and Counties in CZT-UA

2 研究方法

2.1 分形维数

分形特征指随着尺度的变化,地理实体局部之间、局部与整体间在空间结构上具有无法以几何特征量描述的相似性与规律性。分形特征可由分形维数进行测度,包括聚集分维数、关联分维数以及网络分维数 3 种^[29]。本文主要基于关联分维数揭示 CZT-UA 建成区空间分布是否具备分形结构,其计算式如下:

$$C(r) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \theta(r - d_{ij}) (i \neq j) \quad (4)$$

式中, $C(r)$ 表示关联积分; r 为码尺, 表示一定半径距离; θ 表示阶跃函数, 表征以建成区 i 为中心、在特定半径 r 内出现其他建成区的概率, 其性质如下:

$$\theta(r - d_{ij}) = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq r \\ 0, & d_{ij} > r \end{cases} \quad (5)$$

若建成区的分布具有分形特征,则 $C(r)$ 满足标度不变性性质,即:

$$C(r) \propto r^D \quad (6)$$

式中, D 表示关联分维数,能够反映城市群各单元建成区分布的均衡程度,其值一般介于 0~2。当 D 接近 1 时,表示各区县建成区沿某一线状地理要素集中分布,如交通干线、河流等。

2.2 空间扩展强度指数

空间扩展强度指数(urban expansion index, UEI)主要用于反映城市群的空间扩展速度^[30],其计算式如下:

$$\text{UEI} = \frac{U_i^{t_2} - U_i^{t_1}}{U \times \Delta t} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $U_i^{t_1}$ 和 $U_i^{t_2}$ 分别为研究时间 t_1 与 t_2 建成区的面积; $U_i^{t_2} - U_i^{t_1}$ 为研究时段建成区扩展面积; Δt 表示研究时长; U 表示研究单元行政面积。

2.3 Moran's I 系数

本文引入 Moran's I 系数从整体上揭示 CZT-UA 建成区分布是否存在空间自相关, 进而衡量城市群扩展在空间上的聚集、分散特征, 具体公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}} \quad (8)$$

式中, I 表示 Moran's I 系数; x_i 和 x_j 分别表示位置 i 和位置 j 的某一属性值; \bar{x} 和 s^2 分别表示空间上 N 个研究对象该属性值的均值与方差; W 表示空间权重矩阵。Moran's I 的取值范围为 $[-1, 1]$, 系数值为正, 说明研究对象具有正的空间相关关系, 且越接近 1 聚集状态越显著; 系数值为负, 说明具有负的空间相关关系, 且越接近 -1 分散状态越显著。

2.4 空间关联指数

利用 Getis-Ord G_i^* 测度地理事件的局部关联特征, 识别建成区扩展的热点区与冷点区的分布格局, 定义其计算式如下:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (9)$$

式中, d 表示各研究单元中心点的距离; $W_{ij}(d)$ 表示以距离规则定义的空间权重矩阵; x_j 为位置 j 的某一属性值, 在本文中为第 j 个区县的建成区 UEI。

对 $G_i^*(d)$ 进行标准化处理, 计算式如下:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (10)$$

式中, $E(G)$ 和 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别为指数 G_i^* 的期望和方差。当 $Z(G_i^*)$ 为正且显著时, 表示区县 i 周边的 UEI 值相对处于较高水平, 属于高值在空间上的聚集, 则该区域是建成区扩展的热点区; 若 $Z(G_i^*)$ 为负值且显著, 表示区县 i 周围的 UEI 值普遍处于较低水平, 属于低值在空间上的聚集, 则该区域是建成区扩展的冷点区。

2.5 地理加权回归

地理加权回归 (geographically weighted re-

gression, GWR) 是普通线性回归的扩展, 该模型将数据的地理位置嵌入到回归参数中, 从而为各样本点构建局部回归方程, 能够更好地测度回归参数的真实空间特征, 进而反映出建模要素的空间非平稳性。GWR 模型计算式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (11)$$

式中, y_i 表示第 i 个样本点的因变量; (u_i, v_i) 表示第 i 个样本点的坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 和 $\beta_k(u_i, v_i)$ 是地理位置的函数, 分别表示第 i 个样本点上回归方程的常数项与第 k 个回归系数; x_{ik} 表示第 i 个样本点上第 k 个自变量; ε_i 表示第 i 个区域的随机误差; p 表示回归系数的总个数。

3 CZT-UA 建成区空间结构与时空扩展格局分析

3.1 城市群建成区空间结构

基于 CZT-UA 2003 年、2008 年、2013 年及 2018 年的建成区矢量数据, 分别测量 23 个区县建成区重心间的欧氏距离 d_{ij} 。由式(4)和式(6)可知 $N(r) \propto r^D$, 其中, $N(r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(r - d_{ij})$ 。根据 d_{ij} 数值范围对码尺 r 系列取值, 以获得点列 $(r, N(r))$ 及 $(\lg r, \lg N(r))$, 绘制散点图并拟合无标度区的线性方程如图 6 所示, 方程斜率表示各时相的关联分维数 D , 数值分别为 0.7274、1.0473、1.0516、1.0557, 对应的拟合优度 R^2 分别为 0.9985、0.9958、0.9964、0.9968。

上述结果表明, CZT-UA 建成区的空间分布是分形的, 城市群体系空间结构的组织具有进一步优化潜力; 4 个时相关联分维数 D 值均接近 1, 说明城市群建成区分布高度集中在线状地理要素上, 具有轴向分布特征。CZT-UA 中部为湘江冲积平原, 长沙、湘潭地处湘江上游, 株洲地处湘江下游。湘江不仅引导城市群由北至南延伸, 还依托起建成区主体部分的建设; 三市主城区沿湘江呈串珠式轴带集中分布, 形成该城市群建成区空间扩展的基本结构。此外, 长株潭各区县建成区还集中在该城市群发达的交通网络干线上, 如图 7 所示。南北方向上, 以京广铁路、107 国道、京港澳高速公路为主轴线, 106 国道、醴茶铁路为次轴线; 东西方向上, 以 319 国道、沪昆高速、320 国道为主轴线, 湘黔铁路、浙赣铁路为次轴线, 推动完善着城市群各区域的有序发展与城镇结构。

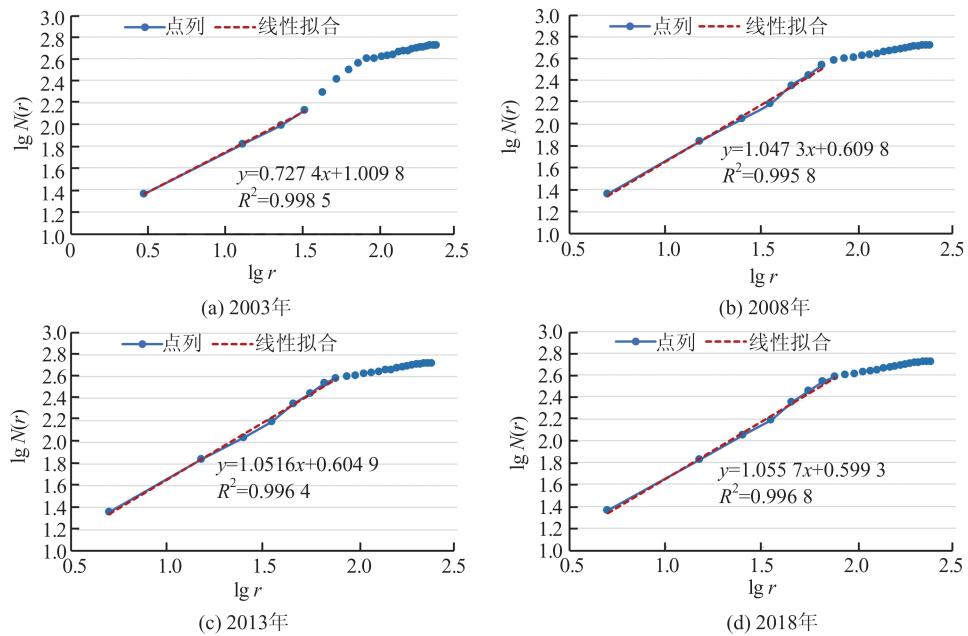


图6 2003年、2008年、2013年及2018年长株潭城市群建成区分布关联分形维数

Fig. 6 Spatial Correlation Dimension of the Distribution of Built-up Areas in CZT-UA in 2003, 2008, 2013 and 2018

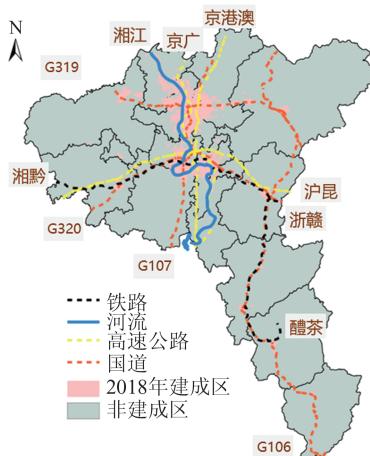


图7 长株潭城市群轴线分布示意图

Fig. 7 Axis Patterns of the Distribution of Built-up Areas in CZT-UA

3.2 城群建成区扩展过程

本文进而计算得到2003—2008年、2008—2013年、2013—2018年3个研究时段的空间扩展强度指数。从图8可看出,长株潭建成区在长沙市中部地区形成明显聚集簇,而长沙市空间扩展强度在各时期均处于领先水平,如表1所示,表明作为湖南省省会的长沙市城市化势头迅猛,城市体系规模逐渐扩大,是CZT-UA的核心,在城市群建设中具有重要引领作用。株洲市的扩展强度逐期提高,但明显落后于同时期的长沙、湘潭两市,株洲市各区县平均土地总面积较大,但建成区基数较小,尤其是城市群最南部的茶陵县与

炎陵县,影响了城市群整体的扩展强度。对于湘潭市,其在2008—2018年扩展强烈,扩展强度较2003—2008年有显著提高,建成区主要集中在市区及湘潭县。

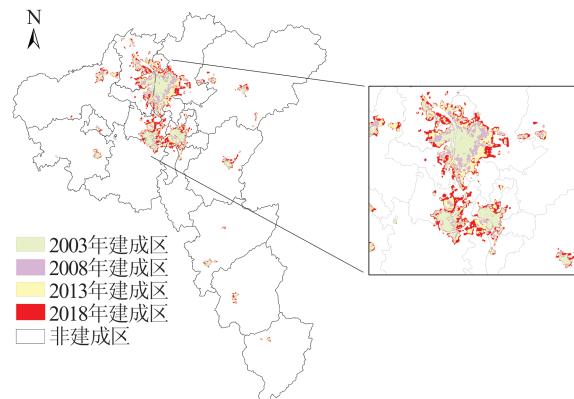


图8 2003—2018年长株潭城市群建成区时空扩展进程

Fig. 8 Spatial-Temporal Expansion of Built-up Areas in CZT-UA from 2003 to 2018

表1 2003—2018年长株潭城市群建成区空间扩展强度指数

Tab. 1 Spatial Expansion Intensity Index of Built-up Areas in CZT-UA from 2003 to 2018

地区	2003—2008年	2008—2013年	2013—2018年
长株潭城市群	0.18	0.32	0.34
长沙市	0.32	0.49	0.45
株洲市	0.05	0.14	0.19
湘潭市	0.13	0.30	0.42

3.3 城市群建成区扩展格局

3.3.1 全局格局特征

本文对CZT-UA 23个区县2003年、2008年、2013年与2018年4个时相的建成区面积及3个阶段的扩展面积分别进行空间自相关分析,如图9和图10所示。结果表明,各时相建成区面积的聚集特征显著。整体上,长株潭建成区主体集中分布在长沙、株洲、湘潭的市区部分,而郊区市县建成区规模较小。图9中建成区面积的Moran's I 系数与 z 得分先升高后又下降,说明城市群建成区加速聚集分布的状态有所减缓。2003—2018年,各阶段空间扩展面积的Moran's I 系数与 z 得分逐渐减小且趋于0, p 值显著性不断降低,如图10所示,表明长株潭建成区空间扩展的聚集态势逐渐减弱而趋于随机分布。整体上,随着各区县城市化进程的加快,城市群外围区县建成区扩张趋势良好,CZT-UA中建成区空间增长及分布的总体空间差异有所减小。

3.3.2 “冷热点区”分布格局

以长株潭城市群区县为基础空间评价单元,测算2003—2008年、2008—2013年及2013—2018年3个扩展阶段建成区空间扩展强度的空间关联指数Getis-Ord G_i^* ,同时采用自然间断点分级法将Getis-Ord G_i^* 统计量从高到低划分为5级,获取长株潭空间扩展强度的热点区(高值区)与冷点区(低值区)的分布格局,如图11

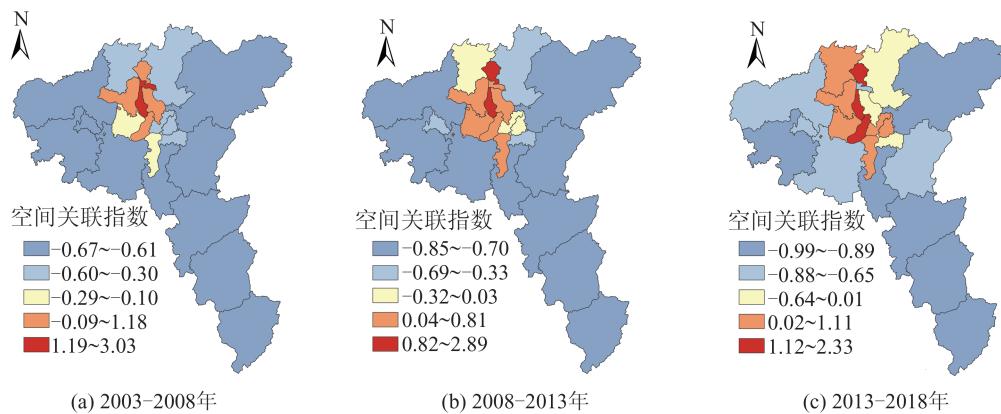


图11 2003—2018年长株潭城市群建成区扩展热点区演化

Fig. 11 Hot Spots of Urban Growth Patterns in the CZT-UA from 2003 to 2018

2003年以来,随着长株潭城市群城镇化进程的加快,建成区扩展的热点区数量逐渐增加,冷点区则随之减少。其中,除长沙的开福区、岳麓区、天心区及湘潭的岳塘区始终处于热点区外,热点区格局在城市群中部地区不断演变。2003—2008年,热点区在城市群中部形成一个

所示。

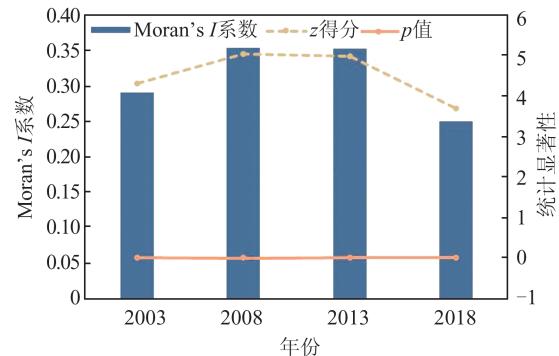


图9 2003年、2008年、2013年及2018年长株潭城市群建成区面积空间自相关分析

Fig. 9 Moran's I Index of Built-up Areas in CZT-UA in 2003, 2008, 2013 and 2018

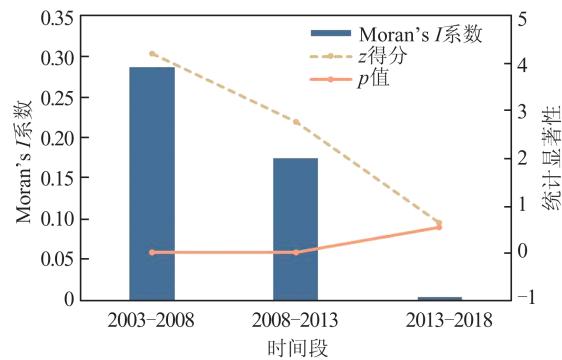


图10 2003—2018年各阶段长株潭城市群建成区扩展面积空间自相关分析

Fig. 10 Moran's I Index of Urban Sprawl Area in CZT-UA from 2003 to 2018

鲜明的极核,城市群空间扩展的核心-外围结构显著。长沙市天心区和芙蓉区构成城市群的扩展极核,围绕这两个高速扩展核心区域向外依次形成次高值区、中值区、低值区。其中,长沙中部的开福区、岳麓区、雨花区及湘潭市界邻接处的岳塘区扩展速度较快,形成次高值区。

2008—2013年,热点区极核有所扩张,湘潭市的雨湖区及株洲市的天元区均由中值区演化为次高值区。扩展极核外围区域有明显向高值过渡倾向,可以发现部分区县由次低值区过渡到中值区、低值区过渡到次低值区,说明极核带动了邻域区县的建成区扩展。而低值冷点区分布范围无明显变化。2013—2018年,热点区分布格局发生了显著变化。首先,高值热点区数量增加,湘潭市岳塘区在本阶段扩展加快最终由次高值区演化为高值区;株洲市的石峰区、荷塘区与长沙市望城区经上一阶段过渡到次高值区。而冷点区分布格局随之变化,低值区数量减少,局部过渡到次低值冷点区。

通过上述分析可以发现,2003—2018年长株潭城市群建成区空间扩展热点区在城市群中部形成极核,外围则为冷点区,总体表现为向心聚集特征。3个扩展阶段由极核向外产生圈层式演化趋势,扩展极核呈现空间溢出效应,对周边产生了辐射带动作用。另外,极核区域中长沙市的芙蓉区与雨花区在3个扩展阶段逐渐退出热点区,主要是由于两个区县发展态势稳健、城市化进程较快,使得建成区扩展趋于饱和,已步入建设的成熟阶段。

4 长株潭城市群扩展驱动机制分析

4.1 因子选取与模型构建

本文基于地理加权回归模型对长株潭城市群23个区县的建成区扩展驱动机制进行探索。其中,因变量为2018年的建成区面积,由§ 3.3.1可以看到该变量在空间上呈显著聚集模式,这为地理加权回归解释模型的构建奠定了基础。

鉴于评价指标的代表性及数据的可获得性与完备性,选取人口、社会、经济、自然、交通通达性等因子,由于因变量属于连续性指标,故自变量均采用当年年末值^[17]。同时,针对城市群

空间结构的特殊性,本文在构建长株潭扩展驱动机制时引入体现城市群内部交互作用与区域联系的指标,如表2所示。

表2 长株潭城市群建成区面积驱动因素指标体系

Tab. 2 Driving Factors of the Expansion of CZT-UA's Built-up Area

	含义	指标
人口	年末常住人口	
	城市化水平	
	人口密度	
经济	国内生产总值(gross domestic product, GDP)	
	人均GDP	
行政力	地方财政收入	
	一般公共预算支出	
市场力	固定资产投资	
	社会消费品零售总额	
	人均可支配收入	
自然	平均DEM	
	平均坡度	
交通通达性	到河流的平均距离	
	到铁路的距离	
	到国道的距离	
	到县道的距离	
	到高速公路的距离	
城市群内部 交互作用	到主要道路(国道/省道/县道)的距离	
	道路密度	
	到长沙市的距离	
	基于主要路网到长沙市的距离	
	对外人流交互强度	
	经济联系总引力	

本文通过 z 得分标准化对数据进行归一化处理,以消除变量量纲对评价体系的影响。鉴于指标间存在严重的多重共线性,本文采用主成分分析方法,对影响因子进行综合,提取得到3个主成分,作为新的自变量参与驱动力模型构建,根据旋转后的成分矩阵确定载荷大于0.7的因子作为各主成分构成。主成分变量及其因子构成见表3。

表3 主成分变量及其因子构成

Fig. 3 Principal Components and the Dominant Driving Factors

主成分	因子体系	主导因素
F1	经济联系总引力、对外人流交互强度、人口密度、道路密度、人均GDP	社会经济对外联系
F2	平均DEM、基于主要路网到长沙市的距离、平均坡度、到长沙市的距离、到县道的距离、到主要道路(国道/省道/县道)的距离	区位与通达性
F3	地方财政收入、一般公共预算支出、年末常住人口、GDP	行政力

4.2 城市群建成区扩展面积影响因素

GWR计算得到各主成分在每个区县的特定回归系数,结果如图12所示。总体上,社会经济对外联系主导的主成分F1与行政力主导的主成

分F3系数为正,对建成区面积扩展为正向作用;而区位与通达性主导的成分F2系数为负值,说明其指标值的绝对值越大越不利于建成区面积增长。

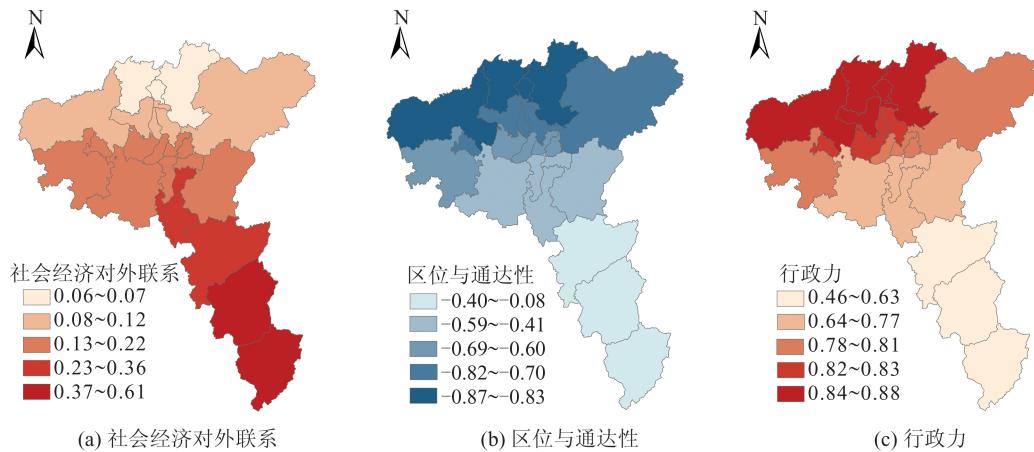


图12 各成分地理加权回归系数空间分布

Fig. 12 The Spatial Distribution of Each Factor's Coefficient

3个主成分及其主导因素的具体分析如下:

1)F1(社会经济对外联系)。F1由经济联系总引力、对外人流交互强度、人口密度、道路密度、人均GDP等因子构成,从区县间经济流、人流等交互作用的视角反映其对建成区扩展的影响。人口、经济发展是建成区扩张的直接驱动力,城市人口流量的增加推动城市化进程,增加居住用地等建设用地的需求,从而促进城市扩张以强化城市人口承载功能、满足频繁的人口活动,而经济增长为其提供了支持与保障,同时也吸引人流流入从而推动着人口增长。从回归系数在长株潭的空间分布来看,系数由北向南递增,最大值集中在株洲市南部,最小值分布在长沙市北部。整体上,城市群北部尤其是省会长沙市的人口流动、社会经济活动已经比较活跃,但建成区用地较为紧凑、集约,可扩展空间相对趋于饱和,对F1的驱动不敏感;而城市群南部尤其在株洲市南部3县的可开发土地资源较多,则易受人口与经济发展的激励,增加居住用地、休闲设施、公共设施等建设用地的建设以满足生产生活的需要。

2)F2(区位与通达性)。F2由平均DEM、基于主要路网到长沙市的距离、到主要道路(国道/省道/县道)的距离等因子构成,表现了各区县的区位以及自然与交通的通达程度,该成分回归系数为负,说明距离长沙市越远或到交通线路的距离越大,越不利于建成区的扩展。良好的区位与通达性为社会经济活动的开展提供了便利,对建

成区扩展具有重要的导向作用,同时这也验证了长株潭建成区分布的轴线特征,即发达的铁路、公路交通网络为长株潭的空间组织提供了纽带。空间上,由南至北F2回归系数绝对值逐渐增大,建成区扩展受区位与通达性的影响加深。一方面是由于长沙市的辐射范围有限,建成区扩展更倾向于发生在长沙市周边区域,而距长沙市越远的区县受到的引力作用越小,区位的驱动作用逐渐减弱。另一方面,城市群北部依托发达的交通网络向四周辐射输送人流物流,促进要素的多向流动,交通网络与空间扩展较为协调。城市群南部的株洲市虽为湖南省重要的南方门户与交通枢纽,但站台线路集中在芦淞、石峰、天元等市区,南部缺少发达的交通网,铁路、公路线路单一且为南北向,对建成区扩展的导向作用相对较小。

3)F3(行政力)。F3由地方财政收入、一般公共预算支出、年末常住人口、GDP等因子构成,主要体现了行政力对建成区扩展的推动作用。地方财政收入规模在一定程度上也影响制约着公共预算支出的规模,地方政府将相当一部分财政收入转化为支出,用于基础设施建设、旧城改造、土地开发等政府投资活动,从而推动建设用地的扩展与区域发展。行政力的回归系数由长株潭北部向南部地区递减,说明整体上城市群北部建成区的扩展受行政力驱动更为强烈。城市群北部地区财政收入与公共预算支出规模较大,

在政府资金扶持下,建成区扩展与经济活动交互进行,且外围区县行政面积基数和可开发利用土地空间大,在行政力的推动下有较大扩展潜力。城市群南部相对而言财政收支转化效率较低,对扩展建设的投资尚不充足,因此行政力的驱动力量稍逊于北部地区,但其仍是促进各区域建成区扩展的重要因素。

地理加权回归系数统计见表4。由表4可以看出,长株潭城市群建成区扩展受3个主成分的影响程度为 $F3 > F2 > F1$,其中 $F3$ 系数最小值为0.456,平均值为0.777,均处于较高水平,说明行政力对长株潭城市群扩展的驱动作用最为显著。因此,长株潭各级政府应注重建成区扩展的政策与资金支持,并调整城市发展规划等举措优化空间结构,促进长沙、株洲、湘潭三市的协调发展。

表4 地理加权回归系数统计
Tab. 4 Coefficient Statistics of GWR

因子	最小值	最大值	平均值	标准差
$F1$	0.059	0.613	0.185	0.131
$F2$	-0.873	-0.081	-0.602	0.207
$F3$	0.456	0.884	0.777	0.103

5 结语

长株潭城市群一体化建设对于湖南省经济发展以及中国中部崛起战略的实施均有重大意义。本文系统地对长株潭城市群2003—2018年建成区空间组织结构与时空扩展格局进行分析,并揭示出驱动建成区扩展的因素,从而深入识别长株潭城市群时空演变特征并引导相应的发展策略制定。结果表明:(1)长株潭城市群建成区的空间组织具有显著的轴线特征,主要集中在湘江生态轴及京广铁路、107国道、319国道、沪昆高速等五纵五横交通网络干线上,体现了长株潭空间自组织结构的分形与有序。(2)长株潭的扩展过程表明长沙市是城市群发展的核心,株洲市与湘潭市的建成区扩张具有较大发展空间与潜力。长沙市建成区面积远高于株洲市与湘潭市,且扩展强度指数处于较高水平,株洲、湘潭两市扩展强度指数在研究时段内不断上升,但建成区面积与长沙市差距持续扩大。(3)长株潭城市群新增建成区在空间上分布的聚集态势逐渐减弱而趋于分散,长株潭建成区扩展与总体的空间分布差异有所减小。建成区空间扩展热点区集中在城市群中部,形成扩展

极核,并对外围地区产生辐射带动作用。(4)长株潭城市群扩展驱动机制表现出活跃的社会经济对外联系、有力的行政力支持以及良好的区位与通达性均可推动建成区的增长,其中行政力对长株潭建成区扩展的影响最为显著。本文建议相关部门进一步推动长株潭一体化,通过适当的政策倾斜来加强对株洲市、湘潭市的资源配置与财政支持,同时要充分发挥长沙市的辐射功能与涓滴效应,缩小城市群区域差距,共促长株潭协调可持续发展。此外,长株潭城市群建成区具有显著的路网吸引增长模式,因此可进一步完善偏远地区的综合交通基础设施建设,如城际快速道、城市公交与轨道交通,以增强地区间的通达性与空间关联。

本文深入测度与分析长株潭城市群建成区的时空扩展特征,显性表达出特定的扩张极核与扩展轴线,同时以微观视角对长株潭城市群局域扩展过程及动力机制进行探讨、对比,揭示出城市群各组成单元间在扩展速度、扩展强度及扩展驱动上的差异性。然而,在未来研究中可以融入跨域多源时空数据,更深入地评价长株潭城市群扩展的适宜性,同时与其他城市群横向比较从而借鉴成熟城市群的经验,为长株潭城市群的高效发展提供更为科学的指导意见。

参 考 文 献

- [1] Lu Shiwei, Fang Zhixiang, Xiao Shilun, et al. Quantitative Analysis of the Effects of Spatial Scales on Intra-Urban Human Mobility[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(9): 1199-1204. (鲁仕维, 方志祥, 萧世伦, 等. 城市群体移动模式研究中空间尺度影响的定量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(9): 1199-1204.)
- [2] Fang Chuanglin. Important Progress and Prospects of China's Urbanization and Urban Agglomeration in the Past 40 Years of Reform and Opening-up[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(9): 1-9. (方创琳. 改革开放40年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 1-9.)
- [3] Huang Jingnan, Hui Yu, Yang Shilin, et al. Coordinated Development of Ecology and Economy of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on Counties/County-level Cities/Districts [J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(2): 100-107. (黄经南, 惠雨, 杨石琳, 等. 基于县(市、区)的京津冀城市群生

- 态与经济协调发展研究[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(2): 100-107.)
- [4] Wang Yufeng, Wang Juan. Spatiotemporal Differentiation Structure Evolution of Population and Land in Zhejiang Urban Agglomeration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(2): 280-286. (王雨枫, 王娟. 浙江城市群人口与用地规模的时空分异结构演变研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(2): 280-286.)
- [5] Gu Chaolin. Study on Urban Agglomeration: Progress and Prospects [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 771-784. (顾朝林. 城市群研究进展与展望[J]. 地理研究, 2011, 30(5): 771-784.)
- [6] Fang C L, Yu D L. Urban Agglomeration: An Evolving Concept of an Emerging Phenomenon [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [7] Howard E. Tomorrow[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [8] Yu Hongjun, Ning Yuemin. Introduction to Urban Geography[M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 1983. (于洪俊, 宁越敏. 城市地理概论[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1983.)
- [9] Yao Shimou, Chen Shuang, Chen Zhenguang. New Recognition on City Group Basic Concept [J]. *Urban Research*, 1998, 13(6): 15-17. (姚士谋, 陈爽, 陈振光. 关于城市群基本概念的新认识[J]. 现代城市研究, 1998, 13(6): 15-17.)
- [10] Xue Dongqian, Wang Chuansheng. A Study on the Spatial Process for the Evolution of Urban Agglomerations and Optimal Land Use [J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(2): 95-102. (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.)
- [11] Meng Xianglin. Distribution of Jing-Jin-Ji Urban Circle Development: Problems and Strategies Exploration for Differential Urban Expansion Process [J]. *Urban Studies*, 2009, 16(3): 6-15. (孟祥林. 京津冀城市圈发展布局: 差异化城市扩展进程的问题与对策探索[J]. 城市发展研究, 2009, 16(3): 6-15.)
- [12] Che Qianjin, Duan Xuejun, Guo Yao, et al. Urban Spatial Expansion Process, Pattern and Mechanism in Yangtze River Delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(4): 446-456. (车前进, 段学军, 郭垚, 等. 长江三角洲地区城镇空间扩展特征及机制[J]. 地理学报, 2011, 66(4): 446-456.)
- [13] Guan Xingliang, Fang Chuanglin, Zhou Min, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Spatial Expansion of Urban Land in Wuhan Urban Agglomeration [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1447-1459. (关兴良, 方创琳, 周敏, 等. 武汉城市群城镇用地空间扩展时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1447-1459.)
- [14] Wu Jinwen, Wang Haijun, Zhang Bin. Spatio-temporal Patterns and Driving Forces of Urban Land Expansion in the Pearl River Delta Agglomeration. [J] *Modern Urban Research*, 2020(1): 60-66. (吴金稳, 王海军, 张彬. 珠三角城市群城镇用地扩展时空格局及其驱动因素分析[J]. 现代城市研究, 2020(1): 60-66.)
- [15] Zheng Bohong, Wang Zhiyuan, Wang Hua. A Study of the Evolution Characteristics of Built-up Areas in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration Based on DMSP/OLS Data [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2020, 32(4): 172-181. (郑伯红, 王志远, 汪华. 基于DMSP/OLS数据的长株潭城市群建成区演变特征研究[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 172-181.)
- [16] Wang Liwei, Feng Changchun. Spatial Expansion Pattern and Its Driving Dynamics of Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region: Based on Nighttime Light Data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2155-2169. (王利伟, 冯长春. 转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制: 基于夜间灯光数据方法[J]. 地理学报, 2016, 71(12): 2155-2169.)
- [17] Wang Haijun, Zhang Bin, Liu Yaolin, et al. Multi-dimensional Analysis of Urban Expansion Patterns and Their Driving Forces Based on the Center of Gravity-GTWR Model: A Case Study of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1076-1092. (王海军, 张彬, 刘耀林, 等. 基于重心-GTWR模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析[J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1076-1092.)
- [18] Li J H, Fang W, Wang T, et al. Correlations Between Socioeconomic Drivers and Indicators of Urban Expansion: Evidence from the Heavily Urbanised Shanghai Metropolitan Area, China [J]. *Sustainability*, 2017, 9(7): 1199.
- [19] Ouyang Xiao, Zhu Xiang, He Qingyun. Study of Spatio-Temporal Pattern and Driving Mechanism of Urban Land Expansion in Urban Agglomeration: A Case Study of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(6): 1298-1309. (欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市群城市用地扩张时空特征及驱动机制研究: 以长株潭城市群为例[J].

- 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1298-1309.)
- [20] Huang Huiqing, Wang Wei, Liu Li. Spatial-Temporal Evolution of Cultivated Land Resources and Analysis of Driving Mechanism in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration[J]. *Journal of Geomatics*, 2023, 48(4): 90-95. (黄绘青, 王伟, 刘莉. 长株潭城市群耕地资源数量时空演变及驱动机制分析[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(4): 90-95.)
- [21] Song Yanhua, Jiao Limin, Liu Jiafeng, et al. Analysis of the Factors Affecting the Degree of Urban Expansion: Taking Wuhan City as an Example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 417-426. (宋艳华, 焦利民, 刘稼丰, 等. 城市扩张程度的影响因素分析: 以武汉市为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 417-426.)
- [22] Gong P, Li X C, Wang J, et al. Annual Maps of Global Artificial Impervious Area (GAIA) Between 1985 and 2018[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.
- [23] Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T50280-98, Standard for Basic Terminology of Urban Planning. [S] Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China, 1998 (中华人民共和国建设部. GB/T50280-98, 城市规划基本术语标准[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 1998)
- [24] Wu Xuewei, Xu Yaming, Gong Wenfeng. Graphical Information Characteristics of Urban Heat Island Spatial Pattern and Its Change [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1711-1718. (吴学伟, 徐亚明, 龚文峰. 城市热岛空间格局及其变化的图形信息特征分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(12): 1711-1718.)
- [25] Li Peng, Wang Yongji, Xing Wujie, et al. Application of Urban Impervious Surface Extraction Based on TM Image—Taking Guangzhou City as an Example[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 2016, 30(1): 19-23. (李鹏, 王永吉, 邢武杰, 等. 基于TM影像的城市不透水面提取应用研究: 以广州市为例[J]. 黑龙江工程学院学报, 2016, 30(1): 19-23.)
- [26] Meng Fei, Yin Chenglong, Meng Xiangjin, et al. Urban Built-up Area Extraction by Aggregation Density Method of Impervious Surface [J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(4): 8-15. (孟飞, 殷成龙, 孟祥金, 等. 通过不透水面聚集密度法提取城市建成区[J]. 遥感信息, 2020, 35(4): 8-15.)
- [27] HE, Jianhua, SHI Xuan, Gong Jian, et al. Modeling the Spatial Expansion of Urban Agglomeration Considering Their Spatial Interaction: A Case Study of Wuhan Metropolitan Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 462-467. (何建华, 施璇, 龚健, 等. 顾及空间交互作用的城市群联动空间增长模拟: 以武汉都市区为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 462-467.)
- [28] Liu Yaolin, Fang Feiguo, Wang Yiheng. Characteristics and Formation Mechanism of Intra-urban Employment Flows Based on Mobile Phone Data—Taking Wuhan City as an Example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2212-2224. (刘耀林, 方飞国, 王一恒. 基于手机数据的城市内部就业人口流动特征及形成机制分析: 以武汉市为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2212-2224.)
- [29] Liu Jisheng, Chen Yanguang. Fractal Dimensions of Spatial Structure of an Urban System and the Methods of Their Determination [J]. *Geographical Research*, 1999, 18(2): 82-89 (刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法[J]. 地理研究, 1999, 18(2): 82-89)
- [30] Wang Yang, Fang Chuanglin, Wang Zhenbo. The Study on Comprehensive Evaluation and Urbanization Division at County Level in China [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(7): 1305-1316. (王洋, 方创琳, 王振波. 中国县域城镇化水平的综合评价及类型区划分[J]. 地理研究, 2012, 31(7): 1305-1316.)