



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 长株潭城市群建成区时空扩展特征及驱动力分析  
作者: 李静波, 关雪峰, 曾星, 杨昌兰, 邢巍然, 吴华意  
DOI: 10.13203/j.whugis20210634  
收稿日期: 2022-06-21  
网络首发日期: 2022-07-19  
引用格式: 李静波, 关雪峰, 曾星, 杨昌兰, 邢巍然, 吴华意. 长株潭城市群建成区时空扩展特征及驱动力分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210634>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210634

## 引用格式：

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, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210634 (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*, 2022, 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<sup>1</sup> 关雪峰<sup>1</sup> 曾星<sup>1</sup> 杨昌兰<sup>1</sup> 邢巍然<sup>1</sup> 吴华意<sup>1</sup><sup>1</sup> 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我国城市空间格局的演变。目前城市群扩展研究不断发展日趋深入，但仍存在扩展形态定量测度不足、扩展模式空间分异对比欠缺、扩展驱动空间交互因子匮乏等问题。鉴于此，本文以我国中部崛起重要引擎之一的长株潭城市群为例，首先基于全球 30m 不透水面数据(GAIA)提取 2003-2018 年多时相建成区范围，利用分形维数、空间扩展强度、Moran's I 指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；进而构建人口、社会经济、交通通达性及城市群交互作用等因子，基于主成分分析、地理加权回归定量揭示长株潭扩展驱动机制。结果表明：(1)长株潭城市群建成区的空间结构具有显著的轴线特征，主要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网络干线上。(2)2003-2018 年长沙、株洲、湘潭三市建成区面积与扩展速度总体呈上升趋势，但株洲、湘潭与长沙差距逐步扩大，长沙在城市群中的主导地位持续加强。(3)长株潭城市群建成区空间增长的聚集态势逐渐减弱，建成区扩展及分布格局的总体空间差异有所减小。此外，长株潭建成区在城市群中部存在扩展极核，其辐射作用圈层式带动着外围“冷点区”的扩展格局演化。(4)驱动力模型结果显示 2003-2018 年长株潭扩展主要受社会经济对外联系、行政力及区位与通达性的影响，说明城市群内部人流/经济流的交互作用、行政上的政策引导与扶持、发达的交通网络与中心城市的辐射作用均驱动了建成区扩展。同时各驱动力的作用呈现着空间分异特征：行政力对长株潭建成区扩展的影响最为显著，城市群北部对该驱动力更为敏感；其次区位与通达性对长株潭的驱动由北至南减弱；而社会经济对外联系对城市群南部的驱动作用更大。

**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

## 1 引言

城市群是在特定地域范围内，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<sup>[1-3]</sup>。改革开放以来我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、粤港澳大湾区等一批典型城市群，对区域发展起到了极大的推动作用<sup>[4]</sup>。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，可以为城市群分层体系建立、空间格局优化提供科学指导与决策支持，从而提高我国在全球社会经济活动中的核心竞争

**收稿日期：**2022-06-21

**项目资助：**国家自然科学基金面上项目(41971348);国家重点研发计划项目(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

**通信作者：**关雪峰，博士，副教授。guanxuefeng@whu.edu.cn

力<sup>[5-6]</sup>。

城市群的研究起源于 19 世纪末, 现代城市规划先驱 Ebenezer Howard 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<sup>[7]</sup>。1983 年于洪俊等将 Gottman 关于“巨大城市带”的思想以及“城市群”概念引进中国<sup>[8]</sup>。姚士谋等对城市群基本概念重新进行了概括, 强调其空间构成、信息化与内外联系<sup>[1]</sup>。目前国内关于城市群扩展的研究成果颇丰, 经历了从理论到实证研究、从全局到局部视角、从静态到动态分析的发展。如薛东前等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的演变过程<sup>[9]</sup>; 孟祥林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<sup>[10]</sup>; 车前进等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<sup>[11]</sup>; 关兴良等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<sup>[12]</sup>; 吴金稳等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<sup>[13]</sup>。整体上, 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<sup>[14]</sup>; (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, 学者们对城市群扩展底层驱动机制也展开了广泛研究。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, 如王利伟等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<sup>[15]</sup>, 而王海军等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

<sup>[16]</sup>, 另外李景辉等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<sup>[17]</sup>。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<sup>[18-20]</sup>。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、自然和区位等三类, 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二者驱动机制的差别。

针对上述问题, 本文以我国中部崛起重要引擎之一的长株潭城市群为例, 采用时空地理统计分析方法, 多维度地对 2003-2018 年长株潭城市群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, 深入识别长株潭城市群的时空演化规律, 同时揭示各驱动因子作用机制的空间分异。

## 2 研究区概况与数据来源

### 2.1 研究区概况

如图 1 所示, 长株潭城市群位于我国湖南省的中东部, 由长沙市、株洲市、湘潭市以湘江为轴呈“品”字形分布构成, 共涵盖 23 个区县, 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, 也是该省重要的副核心城市。长株潭不仅是湖南省发展的引擎, 同样也是我国长江中游社会经济、城镇化高度发展的地区<sup>[14]</sup>。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、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 The Administrative Region in the Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration(CZT-UA)

## 2.2 数据来源

本文研究首先基于清华大学宫鹏教授发布的全球 30m 分辨率不透水面数据 (GAIA) [21]提取长株潭城市群建成区的时序数据 (2003、2008、2013 与 2018 年), 进而收集研究区域地形、人口、社会、经济、交通、通信等相关数据。其中, DEM 数据来源于

地理空间数据云公开的 SRTM DEM 90m 分辨率高程数据; 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长株潭城市群范围 2018 年某周手机信令数据与移动基站数据。

## 2.3 数据处理

### 2.3.1 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[22], 具体包括不透水面及其附属的绿化、自然景观等功能区域。基于此, 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, 本文利用全球 30m 不透水面数据 (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[23-25], 如图 2 所示。该方法中, GAIA 数据兼顾较高的空间分辨率与稳定的长时序两方面优势, 以此设计的建成区提取算法能够获得精确的建成区范围 (图 3), 同时适用于城市群多尺度的空间扩展研究。

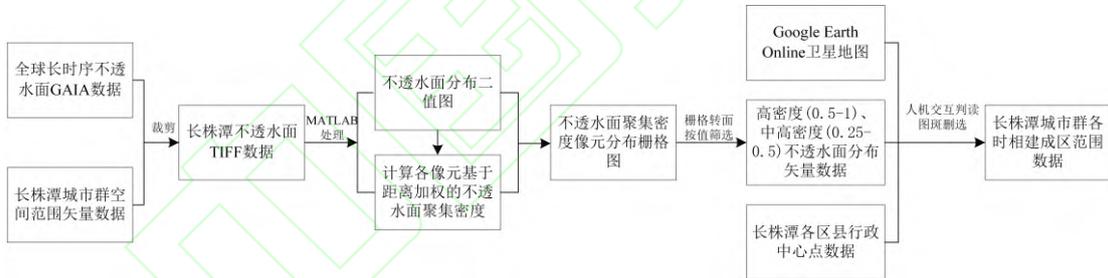


图2 长株潭城市群建成区提取技术流程

Fig. 2 The Flow Chart for the Extraction of CZT-UA's Built-up Area

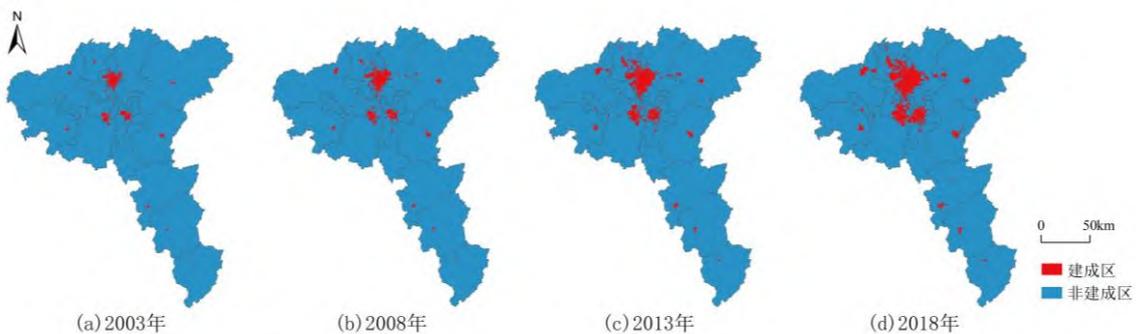


图3 2003-2018 年长株潭城市群建成区分布

Fig. 3 The Spatial Distribution of CZT-UA's Built-up Area from 2003 to 2018

### 2.3.2 城市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<sup>[26]</sup>, 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, 构建如下两个因子支撑后续扩展驱动力建模。

#### (1) 对外人流交互强度

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<sup>[27]</sup>。本文结合该数据与移动基站位置信息获得长株潭城市群以区县为单位的人流量 OD 数据, 以此计算各区县的对外人流交互量 (人/天), 如式 (1) - (2) 所示:

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

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

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;  $f_{ij}$  为区县  $i$  与区县  $j$  间的人流交互量 (图 4);  $PF_i$  表示区县  $i$  的对外人流交互强度;  $n$  表示区县数量。

#### (2) 经济联系总引力模型

经济联系总引力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长株潭城市群区县间的经济联系, 如式 (3) 所示:

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

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 (图 5);  $P_i$ 、 $P_j$  分别表示城市  $i$ 、 $j$  的非农人口数, 鉴于数据的可获得性, 本研究采用城镇人口数;  $G_i$ 、 $G_j$  分别表示城市  $i$ 、 $j$  的第二、三产业产值之和;  $D_{ij}$  表示两区县间的欧式距离;  $n$  表示区县数量。

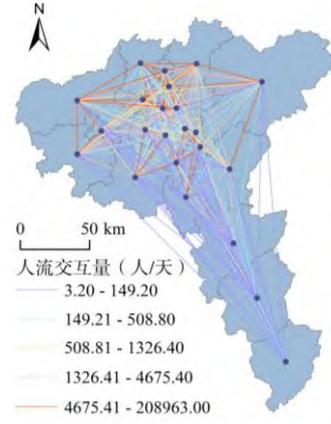


图 4 长株潭城市群区县级人流交互 OD

Fig. 4 OD of People Flow Between Districts and Counties in CZT-UA

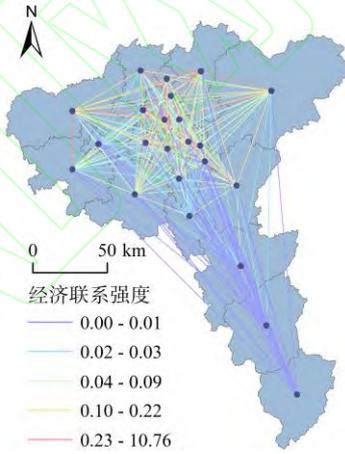


图 5 长株潭城市群区县间经济联系

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

## 3 研究方法

3.1 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三种<sup>[28]</sup>。本文主要基于关联分维数揭示长株潭城市群建成区空间分布是否具备分形结构, 其函数如式 (4):

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

式中,  $N$  为区县数量;  $r$  为码尺;  $d_{ij}$  为  $i$ 、 $j$  两区县建成区间的欧氏距离;  $\theta$  为阶跃函数,

表征以建成区*i*为中心特定半径*r*内出现其他建成区的概率，其性质如式（5）：

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

若建成区的分布具有分形特征，则满足式（6）（7）所示标度不变性性质，即：

$$C(\lambda r) \propto \lambda^T C(r) \quad (6)$$

$$C(r) \propto r^T \quad (7)$$

其中， $D = T$ 即为关联分维数，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 $D \rightarrow 1$ 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。

**3.2 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空间扩展的速度<sup>[29]</sup>，其表达式为式（8）：

$$UEI = \frac{U_i^{t_2} - U_i^{t_1}}{U \times \Delta t} \times 100 \quad (8)$$

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； $\Delta t$ 为研究时长； $U$ 指研究单元行政面积。

**3.3 Moran's I 指数** 本文引入 Moran's I 指数从整体上揭示长株潭城市群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，具体公式如式（9）：

$$Moran's I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (9)$$

式中： $x_i$ 、 $x_j$ 为位置*i*和位置*j*的某一属性值， $\bar{x}$ 和 $s^2$ 为空间上  $n$  个研究对象该属性值的均值与方差； $W$ 为空间权重矩阵。Moran's I 的取值范围为[-1,1]，指数值为正，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；指数值为负，说明具有负的空间相关关系，且越接近-1 分散状态越显著。

**3.4 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，其表达式为式（10）：

$$G_i^*(d) = \sum_j^n W_{ij}(d) x_j / \sum_j^n x_j \quad (10)$$

对 $G_i^*(d)$ 进行标准化处理，如式（11）：

$$Z(G_i^*) = [G_i^* - E(G)] / \sqrt{Var(G_i^*)} \quad (11)$$

式中： $W_{ij}$ 为空间权重矩阵中的元素； $E(G)$ 和 $Var(G_i^*)$ 分别为指数 $G_i^*$ 的期望和方差； $x_j$ 为位置*j*的某一属性值，在本研究中为第*j*个区县的建成区空间扩展强度指数 UEI。

当 $Z(G_i^*)$ 为正且显著时，表示区县*j*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*j*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。

**3.5 地理加权回归** 地理加权回归 (Geographically Weighted Regression, 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 模型如式（12）所示：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (12)$$

式中， $(u_i, v_i)$ 为第*i*个样本对象点的坐标； $\beta_0(u_i, v_i)$ 和 $\beta_k(u_i, v_i)$ 是地理位置的函数，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； $x_{ik}$ 为第*i*个样本点上第*k*个自变量； $\varepsilon_i$ 为第*i*个区域的随机误差。

## 4 长株潭城市群建成区空间结构与时空扩展格局分析

### 4.1 城市群建成区空间结构

基于长株潭城市群 2003-2018 年建成区矢量数据，分别测量 23 个区县建成区重心间的欧式距离 $d_{ij}$ 。由公式（1）和（4）可知 $N(r) \propto r^D$ ，其中， $N(r) = \sum_i^N \sum_j^N \theta(r - d_{ij})$ 。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（图6），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，一方面，长株潭城市群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；另一方面，四个时相关联分维数  $D$  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。长株潭城市群中部为湘江冲击平原，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（图 7）：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，推动着城市群各区域的有序发展与城镇结构的完善。

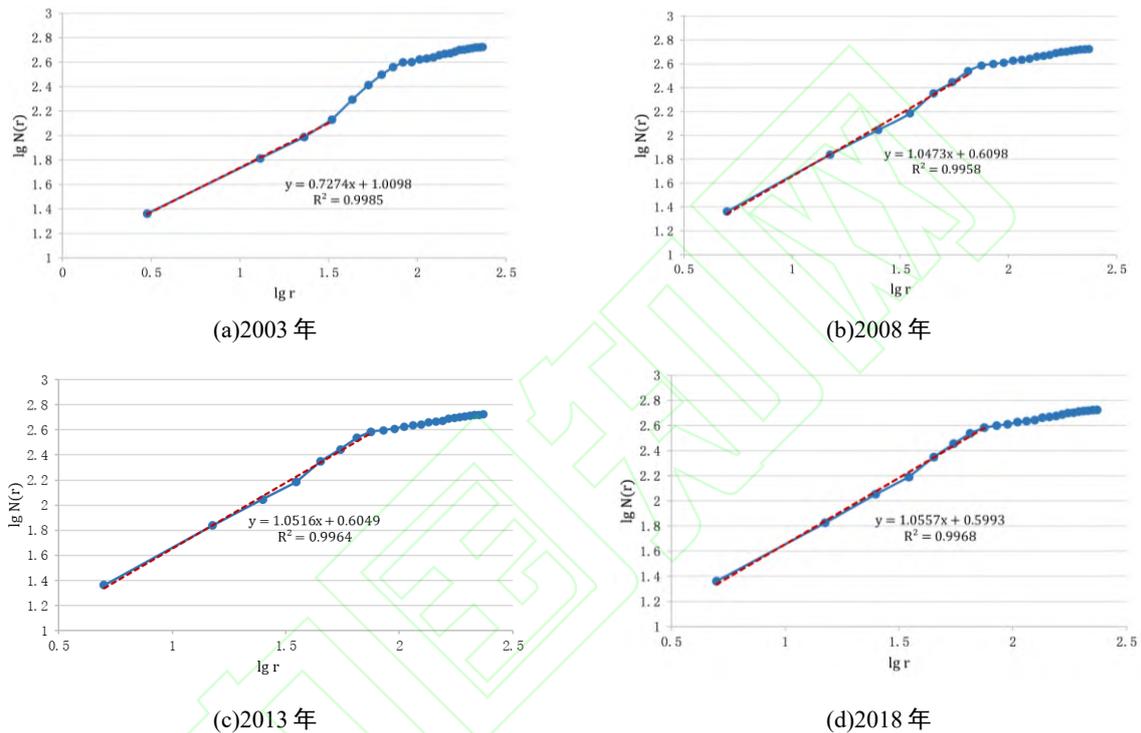


图 6 2003-2018 年长株潭城市群建成区分布关联分形维数

Fig. 6 The Spatial Correlation Dimension of the Built-up Area's Distribution in CZT-UA from 2003 to 2018

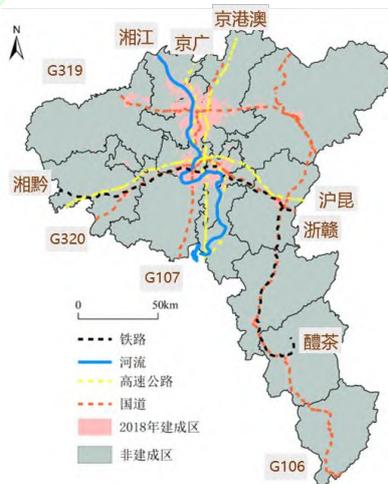


图 7 长株潭城市群轴线分布示意图

Fig. 7 The Axis Patterns in the Distribution of CZT-UA's Built-up Area

#### 4.2 城市群建成区扩展过程

本文进而计算得到 2003-2008 年、2008-2013 年、2013-2018 年三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（表 1），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，是长株潭城市群的核心，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，扩展强度较于 2003-2008 年有显著提高，建成区主要集中在市区及湘潭县。

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 CZT-UA's Built-up Area from 2003 to 2018

	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

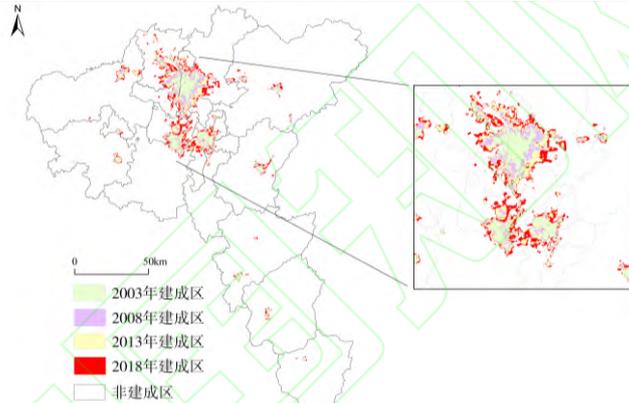


图 8 2003-2018 年长株潭城市群建成区时空扩展进程

Fig. 8 Spatial-temporal Expansion of CZT-UA's Built-up Area from 2003 to 2018

#### 4.3 城市群建成区扩展格局

##### 4.3.1 全局格局特征

本文对长株潭城市群 23 个区县 2003 年、2008 年、2013 年与 2018 年四个时相的建成区面积及三个阶段的扩展面积分别进行空间自相关分析。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、湘潭三市市区部分，而郊区郊县建成区规模较小。图 9 中建成区面积的 Moran's I 指数与 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 指数逐期减小且趋于 0，Z 得分及 P 值显著性均不断降低（图 10），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，随着各区县城市化建设进程的加快，城市群外围区县建成区扩张劲头良好，长株潭城市群中建成区空间增长及分布的总体空间差异有所减小。

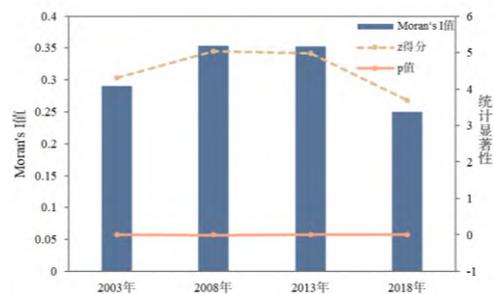


图 9 2003-2018 年长株潭城市群建成区面积空间自相关分析

Fig. 9 Moran's I Index of CZT-UA's Built-up Area

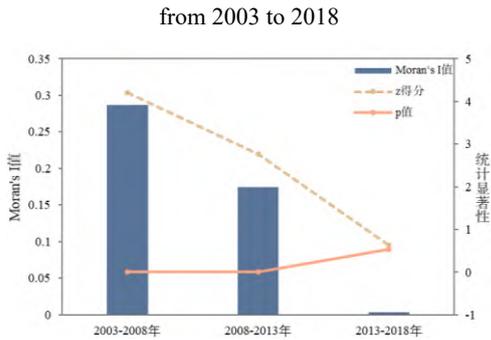


图 10 2003-2018 年各阶段长株潭城市群建成区扩展面积空间自相关分析

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

#### 4.3.2 “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，本文测算 2003-2008、2008-2013 及 2013-2018 年三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（图 11）。

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”数量逐期增加，“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鲜明的极核，城市群空间扩展的“核心-外围”结构显著。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，湘潭的雨湖区及株洲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，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。三个扩展阶段，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，极核区域中长沙市芙蓉区与雨花区在三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。

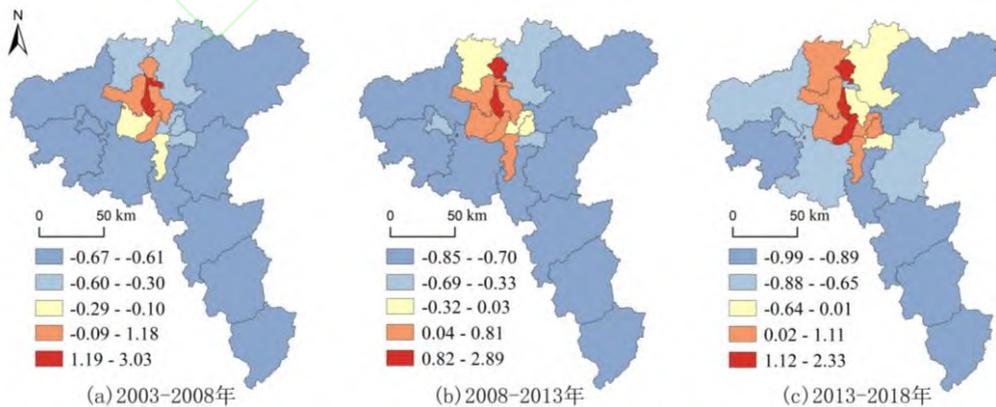


图 11 2003-2018 年长株潭城市群建成区扩展“热点区”演化

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

## 5 长株潭城市群扩展驱动机制

### 分析

#### 5.1 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 年建成区面积，由 4.3.1 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<sup>[16]</sup>。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 The Driving Factors of the Expansion of CZT-UA's Built-up Area

含义	指标	含义	指标
人口	年末常住人口(PS)	交通通达性	到铁路的距离(DisToRa)
	城市化水平(UL)		到国道的距离(DisToG)
	人口密度(PD)		到县道的距离(DisToX)
经济	GDP	到高速公路的距离(DisToH)	到主要道路(国道/省道/县道)的距离(DisToGSX)
	人均 GDP(PerGDP)		道路密度(RD)
行政力	地方财政收入(LFR)	城市群内部交互作用	到长沙市的距离(DisToCS)
市场力	一般公共预算支出(CO)		基于主要路网到长沙市的距离(RoadisToCS)
	固定资产投资(FAI)		对外人流交互强度(PF)
	社会消费品零售总额(SCRS)	经济联系总引力(EI)	
自然	人均可支配收入(PerIn)		
	平均 DEM(DEM)		
	平均坡度(Slope)		
	到河流的平均距离(DisToRi)		

首先通过 Z-score 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对影响因子进行综合，提取得到三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，如表 3 所示。

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	EI、PerGDP、PF、RD、PD、UL、SCRS	社会经济对外联系
F2	DEM、Slope、DisToCS、RoadisToCS、DisToX、DisToGSX	区位与通达性
F3	LFR、CO、PS、GDP	行政力

#### 5.2 城市群建成区扩展面积影响因素

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

的成分 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，说明其指标值越大越不利于建成区面积增长。

##### (1) 社会经济对外联系 (F1)

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 等七个因子构成，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三县的可开发土地资源较多，则易受人口与经济激励，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) 区位与通达性 (F2)

F2 由平均 DEM、基于路网到长沙市的距离、到主要道路的距离等六个因子构成，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) 行政力 (F3)

F3 由地方财政收入、公共预算支出、人口总数、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，在政府资金的大力扶持下，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大，可开发利用土地空间大，因此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。

总体上，如表 4 所示，长株潭城市群建成区扩展受各因子的影响程度为： $F3 > F2 > F1$ （即行政力 > 区位与通达性 > 社会经济对外联系），其中 F3 系数最小绝对值为 0.456，平均值 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对建成区扩展的政策与资金支持，并通过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 The Coefficient Statistics of GWR

因子	最小值	最大值	平均值	标准差
F1(社会经济对外联系)	0.059	0.613	0.185	0.131
F2(区位与通达性)	-0.873	-0.081	-0.602	0.207
F3(行政力)	0.456	0.884	0.777	0.103

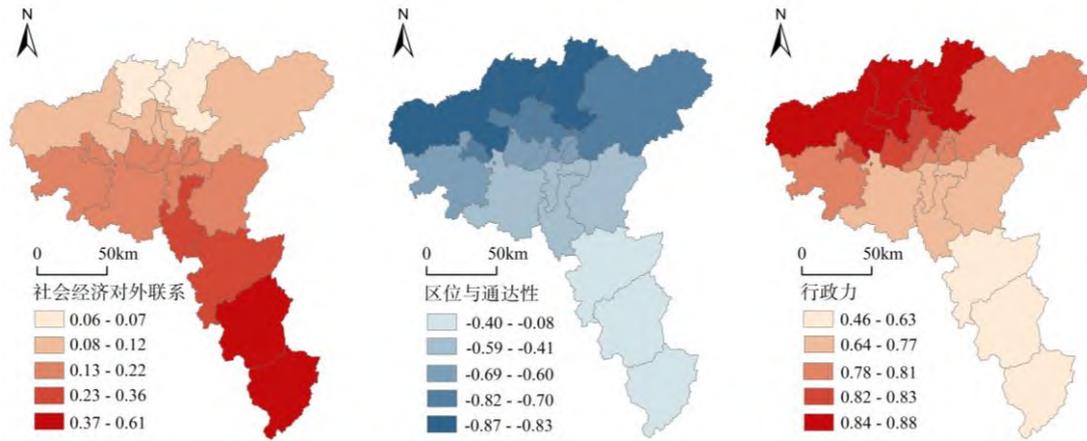


图 12 各成分地理加权回归系数空间分布

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

## 6 结论与展望

长株潭城市群一体化建设对于湖南省经济发展、以及我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，并对外围地区产生着辐射带动作用。（4）长株潭城市群扩展驱动机制揭示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。本文建议相关决策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(References)

- [1] 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)
- [2] Fang Chuanglin. Progress and the Future Direction of Research into Urban Agglomeration in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1130-1144 (方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130-1144)
- [3] Zhu Zheng, Zhu Xiang, Li Shuangshuang. Evolution Process and Characteristics of Spatial Structure of Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 799-817 (朱政, 朱翔, 李霜霜. 长江中游城市群空间结构演变历程与特征[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 799-817)
- [4] 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)
- [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. To-morrow[M]. Cambridge: : 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] 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)
- [10] Meng Xianglin. Distribution of Jing-Jin-Ji Urban Circle Development: Problems and Strategies Exploration for Differential Urban Expansion Procession[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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] Wu Jinwen, Wang Haijun, Zhang Bin. Spatio-temporal Patterns and Driving Forces of Urban Land Expansion in the Pearl River Delta Agglomeration. *Modern Urban Research*, 2020, 1(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)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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
- [18] 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)
- [19] Deng Ruimin, Li Shaoying, Wu Zhifeng, et al. Regional Difference and Driving Mechanism of Construction Land Expansion Types in Prefecture-Level Cities of Guangdong Province[J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(5): 689-698 (邓瑞民, 李少英, 吴志峰, 等. 广东省地级市建设用地扩展模式区域差异与驱动机制[J]. *热带地理*, 2018, 38(5): 689-698)
- [20] 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)
- [21] 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
- [22] 城市规划基本术语标准: GB/T 50280-98[S].
- [23] Wang Liang, Meng Qingyan, Wu Jun, et al. Changes of Heat Island Intensity in Beijing Main Urban Construction Area from 2005 to 2014[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(9): 1047-1054 (王靓, 孟庆岩, 吴俊, 等. 2005—2014年北京市主要城建区热岛强度时空格局分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(9): 1047-1054)
- [24] 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)
- [25] 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)
- [26] 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. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016,41(04):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(04):462-467)
- [27] 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)
- [28] 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)

[29] 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)

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

Li Jingbo<sup>1</sup> Guan Xuefeng<sup>1</sup> Zeng Xing<sup>1</sup> Yang Changlan<sup>1</sup> Xing Weiran<sup>1</sup> Wu Huayi<sup>1</sup>

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

**Abstract: Objectives:** The urban agglomeration has evolved into the main form of China's urbanization in the next stage, which can greatly affect the urban spatial pattern in China. At present, although the research on the expansion of urban agglomerations is deepening and becoming mature, there still exists some problems, e.g., insufficient quantitative measurement on the expansion form of urban agglomerations, neglection of the analysis on the spatial differentiation of expansion modes and lack of the spatial interaction factors in driving forces. In view of this, taking Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration (CZT-UA), which is the earliest integration in central China and is of strategic value to the rise of the central region, as the case study, a comprehensive study has been conducted on the spatial expansion of CZT-UA as well as the interaction between different cities. **Methods:** 30m impervious surface data is firstly used to extract time series of CZT-UA's built-up area from 2003 to 2018 owing to its time-sequence stability and accessibility. Then a collection of measurement methods, e.g., fractal dimension, expansion intensity index, *Moran's I* and *Getis-ord  $G_i^*$*  are applied to quantitatively reveal the spatial structure, expansion process and spatial-temporal patterns of CZT-UA's built-up area. Finally, principal component analysis and geographically weighted regression are integrated to explore the driving forces for the built-up area's expansion in CZT-UA. In this regression model, two special factors are established to represent the interaction inside the urban agglomeration besides the traditional population, social economy and transportation accessibility factors. **Results:** The results show that: (1) The CZT-UA's built-up area shows obvious axial distribution, which generally follows Xiangjiang River and the transportation network consisting of five vertical and five horizontal trunk lines. (2) From 2003 to 2018, the built-up area and expansion speed of Changsha, Zhuzhou, and Xiangtan showed an overall upward trend. Compared with Changsha, Zhuzhou and Xiangtan expand more slowly and the gap is gradually widened, and thus Changsha's dominant position in the urban agglomeration continues to strengthen. (3) The expansion pattern analysis shows that the overall spatial differences in the expansion and distribution of built-up area in CZT-UA have gradually narrowed. In addition, the hotspot regions of urban expansion formed a kernel in central CZT-UA, and exerted a driving force to the peripheral areas. (4) The GWR regression model demonstrates that three principal factors are involved in the expansion of CZT-UA's built-up area, including socio-economic external connections, location and traffic accessibility, and administrative power. The model output indicates 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 areas. However, each factor shows different importance, among which the administrative power has the most positive impact, and the northern parts in CZT-UA are more sensitive to it; the driving force of location and traffic accessibility decreases from the north to the south, while socio-economic external connections show a much more important effect on the expansion of the southern CZT-UA. **Conclusions:** Based on the thorough analysis, this paper suggests that relevant decision-making departments should

further promote the integration and sustainable development of CZT-UA by strengthening the allocation of resources and financial support to Zhuzhou and Xiangtan through appropriate policy tilt and giving full play to the radiation function and trickle-down effect of Changsha to narrow the regional gap in the urban agglomeration. Given that expansion of the built-up area in CZT-UA has been significantly attracted by road network, it is feasible to improve the construction of comprehensive transportation infrastructure such as intercity expressway in remote areas to enhance the accessibility and interaction between regions.

**Key words:** urban spatial expansion; driving force; spatial interaction; geographically weighted regression; Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration

**First author:** Li Jingbo, master, specializes in urban expansion. E-mail: Jingbo\_Li@whu.edu.cn

**Corresponding author:** Guan Xuefeng, PhD, associate professor. E-mail: guanxuefeng@whu.edu.cn

**Foundation support:** General project of national Natural Science Foundation of China (41971348); The National Key Research and Development Program of China(2017YFB0503802).

#### 网络首发:

**标题:** 长株潭城市群建成区时空扩展特征及驱动力分析

**作者:** 李静波, 关雪峰, 曾星, 杨昌兰, 邢巍然, 吴华意

**DOI:** 10.13203/j.whugis20210634

**收稿日期:** 2022-06-21

#### 引用格式:

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, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210634 (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*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210634)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

您感兴趣的其他相关论文:

乌鲁木齐城市空间扩展特征及驱动机制

卢世俊

武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(7): 1025-1034

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200119>