



城市扩张程度的影响因素分析 ——以武汉市为例

宋艳华¹ 焦利民^{1,2} 刘稼丰¹ 许刚¹

¹ 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

² 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要:城市斑块层面扩张程度异质性深切影响着城市物理形态演变。研究城市扩张程度的影响因素及其机制,有助于深化理解城市扩张过程,管控城市空间扩张,促进城市紧凑发展。以中国湖北省武汉市为例,采用邻近度扩张指数度量城市扩张程度,并分析了城市扩张程度的空间特征,采用相关性分析探讨城市扩张程度与速度之间的联系,构建空间回归模型探究自然、社会经济、交通、规划等因素对城市扩张程度的影响。研究发现:(1)城市扩张程度存在空间差异,由主城区向外逐渐增大;(2)城市扩张程度存在正向空间相关性;(3)城市扩张程度与扩张速度之间呈强正相关关系;(4)交通区位、规划控制、到城市中心的距离是城市扩张程度的主要影响因素,且影响程度依次降低。城市扩张程度的影响因素分析结果可为城市空间管控提供科学依据。

关键词:扩张程度;邻近度扩张指数;空间回归;影响因素

中图分类号:P208

文献标志码:A

城镇化和工业化的快速推进吸引了大量农村人口向城市转移,城市土地规模不断增加,在空间形态上,随着时间推移,城市扩张也表现出扩散和集聚的震荡过程^[1]。相关研究表明,中国已经成为世界城市扩张的主要发生地区之一^[2],2010—2016年,中国城市人口、建成区面积分别增加18.39%、35.63%,中国城市扩张呈现土地城镇化快于人口城镇化的特点,造成城市物理形态迅速演变。在城市扩张过程中,原有城市建设用地空间位置一般不发生改变,城市形态演变是所有新增城市斑块综合作用的结果,城市斑块扩张程度通过测度新旧城市斑块间空间邻近关系来反映城市形态的演变方向。较大的扩张程度会导致城市形态松散、景观破碎、土地利用效率降低,造成耕地流失、资源浪费、生态环境破坏等一系列问题^[3-4]。研究表明,城市形态朝着紧凑演变有利于发展交通、节约资源^[5],实现城市可持续发展^[6]。揭示城市形态演变的深层次机制,特别是探究扩张程度的影响因素对制定城市规划,管控城市无序扩张,促进城市紧凑、可持续发展具有重要意义。

城市扩张程度是城市扩张的重要特征,反映了城市物理形态的演变方向。当前对扩张特征的研究主要通过构建模型定量讨论城市扩张规模^[7-8]、扩张模式^[9-10]、空间形态^[11-12],认为城市扩张特征存在时空差异^[13]与尺度效应^[14],但忽视了对扩张程度的特征分析。城市的扩张程度在空间分布上是否存在规律,伴随扩张程度的增大是否会导致城市形态松散,针对这些问题,厘清扩张程度的空间分布规律及其与扩张速度之间的关系,有助于进一步揭示城市扩张空间特征与内在机理,而这依赖于扩张程度的有效度量。城市扩张程度可以通过基于边界共享率的景观指数进行度量^[15]。景观扩张指数(landscape expansion index, LEI)^[16]、多阶景观扩张指数(multi-order landscape expansion index, MLEI)^[15]通过计算新增城市斑块缓冲区内原有城市斑块面积所占比例,将新增城市斑块划分为内填式、边缘式和跳跃式3种类型,实现对新旧斑块空间关系的定量测度。LEI指数和MLEI指数均仅建立单层缓冲区,跳跃式斑块的指数值为0,忽视了跳跃式新增斑块之间扩张程度的差异性。邻近度扩张

收稿日期:2019-10-15

项目资助:国家自然科学基金(41971368)。

第一作者:宋艳华,硕士,主要从事城市扩张研究。syh_wh@163.com

通讯作者:焦利民,博士,教授。lmjiao@whu.edu.cn

指数(proximity expansion index, PEI)综合新旧斑块之间的距离以及边界共享率两个因素,实现了对所有新增斑块与原有斑块空间邻近关系的准确度量,PEI越大,新增斑块与原有斑块的空间邻近程度越高,代表扩张程度越低^[17]。

探讨城市扩张程度的影响因素,是对城市扩张机制研究的进一步补充。当前城市扩张机制的研究主要针对土地利用转变,在宏观层面,认为经济发展、人口增长、交通改善等都会对城市扩张产生影响^[18-19],影响程度因区域、城市规模等产生差异^[20];在微观层面,认为到城市中心的距离、到主要道路的距离等区位因子是斑块发生土地利用转变的重要影响因素^[21-22],其结果与元胞自动机^[23-24]、支持向量机^[25]、多智能体^[26]等方法结合,模拟未来城市土地利用与布局。现有机制研究成果仅能解释其他土地向城镇土地利用转变概率高低,而反映空间形态的城市扩张程度差异原因尚不明晰,对扩张过程中城市形态的演变机理还不能有效揭示,不利于实施空间管控和促进城市紧凑发展。

本文以中国湖北省武汉市为研究对象,探究城市扩张程度的时空特征与影响因素。选用PEI测度2010—2015年武汉市城市扩张程度,借助Moran's *I*指数分析城市扩张程度的空间分布特征;为探究城市扩张速度与扩张程度之间的关系,对研究区划分圈层,计算圈层内扩张速度、扩张程度,应用相关性分析进行验证;为探究城市扩张程度的影响因素,从自然、社会经济、交通、规划4个方面选取因素建立空间回归模型,揭示城市扩张过程中城市形态演变的内在机理。

1 研究区域、数据与研究方法

1.1 研究区域介绍

武汉市正处于快速发展阶段,城市扩张活动剧烈。其都市发展区是武汉城市功能的主要聚集区和城市空间重点拓展区,布局城市主城区与新城组团。根据《武汉市城市总体规划(2010—2020)》,以三环线以内,包括沌口、庙山、武钢地区为主城区,作为城市核心,严格控制发展规模;近郊区建立东部、东南、南部、西南、西部、北部6大新城组团,包含薛峰、常福等24个新城、新城组团,作为近郊新城,为城市空间拓展重点区域;都市发展区外围分布农业生产区、风景区、公园等生产、生态用地,为外围其他区域,各区域分布如图1所示。

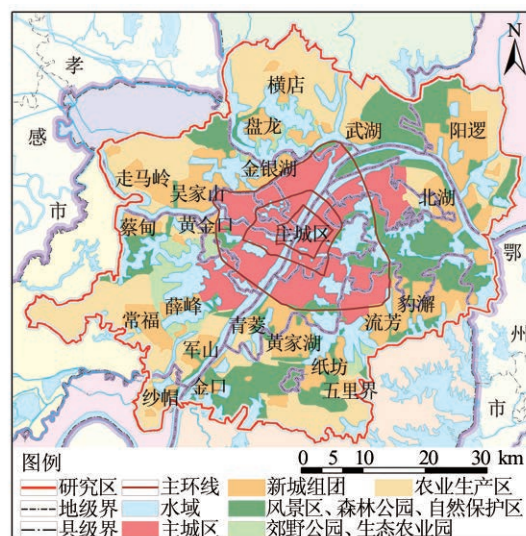


图1 研究区域

Fig.1 Study Area

1.2 研究数据来源

本次研究数据包括武汉市土地利用数据、地形数据、人口数据、兴趣点(point of interest, POI)数据、路网数据以及规划数据。其中,武汉市土地利用数据采用下载的30 m分辨率Landsat遥感影像解译得到,时间分别为2010年12月30日和2015年10月25日;地形数据采用从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)下载的30 m分辨率数字高程数据和坡度数据;人口数据来源于美国LandScan全球人口数据库1 km格网数据;POI数据来源于武汉市2014年网络电子地图,本文选取工业、居住和商服3种类型的POI数据,类型划分如表1所示;路网数据来源于OpenStreetMap网站(<https://www.openstreetmap.org>),时间为2013年;规划数据来源于《武汉市城市总体规划(2010—2020)》的市域空间布局规划图。

表1 POI数据类型分布

Tab.1 POI Data Type Classification

编号	大类	子类	数量
1	工业用地	工厂、公司、产业园	36 036
2	居住用地	别墅、住宅小区、社区中心、商务住宅	14 499
3	商服用地	外国餐厅、中餐厅、超级市场、购物中心、商业街、星级酒店、银行、证券公司、保险公司、商务写字楼	48 936

1.3 研究思路与方法

1.3.1 研究思路与技术路线

在利用PEI度量新增城市斑块扩张程度的基

基础上,通过新增城市斑块扩张模式、扩张程度的空间分布分析及各圈层扩张程度与速度的相关分析,详细刻画扩张程度的时空特征,考虑自然、社会经济、交通、规划等条件,通过空间回归探究扩张程度的影响因素与内在机理,技术路线如图 2 所示。

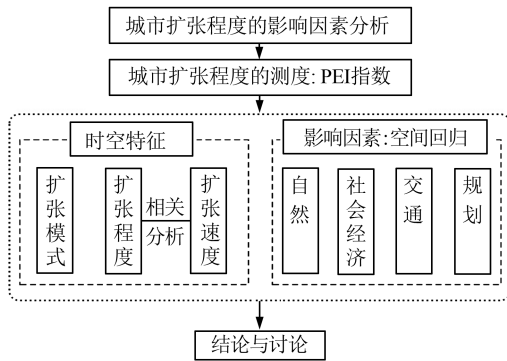


图 2 技术路线图

Fig.2 Technology Roadmap

1.3.2 邻近度扩张指数

采用 PEI 度量城市扩张程度。Jiao 等^[17]针对目前城市扩张指数对跳跃式斑块扩张程度差异性刻画的不足,对新增斑块建立多层缓冲区直至与原有斑块相交,将缓冲区圈数和最外层缓冲区内原有斑块面积比例纳入指数计算,使得所有扩张类型的斑块与原有斑块的空间邻近关系即扩张程度得以准确刻画。计算公式如下:

$$P = \frac{1}{N + (1 - A_i/A_n)} \quad (1)$$

式中, P 为邻近度扩张指数 PEI, 值域为 $[0, 1]$; N 为缓冲区圈数; A_i 为最外层缓冲区内原有斑块面积; A_n 为最外层缓冲区面积。当 $2/3 < P \leq 1$ 时, 斑块定义为内填式扩张; 当 $1/2 < P \leq 2/3$ 时, 斑块定义为边缘式扩张; 当 $0 \leq P \leq 1/2$ 时, 斑块定义为跳跃式扩张; 值越接近 0, 扩张程度越大。

PEI 为单个新增斑块与原有斑块的空间邻近关系度量, 采用面积加权平均法 (area weight mean, AWM) 计算一个区域内的平均邻近度:

$$P_{AWM} = \sum P_i \times \frac{a_i}{A} \quad (2)$$

式中, P_{AWM} 为面积加权平均邻近度指数, 反映区域内平均扩张程度; P_i 为第 i 个斑块的 PEI; a_i 为第 i 个新增斑块面积; A 为新增斑块总面积。

由于 PEI 越大, 扩张程度越小, 为直观反映扩张程度与其他因素的关系, 本文分析扩张程度与扩张速度的关系及扩张程度的影响因素, 分别采用 $1 - P_{AWM}$ 和 $1 - P$ 作为变量。

1.3.3 空间自相关分析

Moran's I 指数用于测度研究对象在空间上的关联程度, 其包括全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数。全局 Moran's I 指数用于衡量对象在总体空间的关联程度, 公式如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (3)$$

式中, I 为全局 Moran's I 指数, 值域为 $[-1, 1]$; n 为对象个数; x_i, x_j 为对象观测值; \bar{x} 为平均值; W_{ij} 为空间权重。若 $I > 0$, 则空间正相关; 若 $I < 0$, 则空间负相关; I 越接近 0, 空间相关性越小。局部 Moran's I 指数为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S} \times \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

根据测度对象在局部的相关程度, 将空间单元划分为高-高、高-低、低-低、低-高 4 类空间集聚区。

1.3.4 扩张速度

由于城市中心向外各圈层初期城市用地规模差异显著, 一定时期内相同新增城市用地面积, 反映在不同圈层的城市扩张幅度不同, 其速度应当存在差异。城市用地面积增长率能够去除城市规模效应的影响, 直观地反映研究时段内城市用地扩张幅度与速度^[27], 利于圈层间的比较。扩张速度 S 为:

$$S = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \quad (5)$$

式中, A_1 为末期的城市用地面积; A_0 为初期的建设用地面积。

1.3.5 空间回归

空间回归考虑变量的空间依赖效应, 主要包括空间滞后模型 (spatial lag model, SLM) 和空间误差模型 (spatial error model, SEM)。被解释变量 Y 和残差 μ 分别为:

$$\begin{cases} Y = \rho W_1 Y + \beta X + \mu \\ \mu = \lambda W_2 \mu + \epsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中, X 为解释变量; W_1, W_2 为空间权重矩阵; β 为自变量回归系数; ρ 为空间滞后项 $W_1 Y$ 的系数; λ 为空间误差系数。当 $\rho = 0, \lambda \neq 0$ 时, 为空间误差回归; 反之, 为空间滞后回归。

2 武汉城市扩张程度的时空特征

利用解译得到的武汉市 2010 年和 2015 年两

期城市建设用地进行叠加分析,计算新增城市斑块的PEI,得到斑块扩张程度。依据指数定义将斑块划分为内填式、边缘式和跳跃式3种模式,分别统计斑块数量、面积及平均面积。武汉市新增城市斑块扩张模式统计如图3所示。

由图3可知,武汉市新增城市斑块均呈现出边缘式扩张、内填式扩张和跳跃式扩张依次减小的趋势。面积加权平均邻近度扩张指数为0.61,2010—2015年武汉市整体以边缘式进行城市扩张。建立距离权重矩阵,利用OpenGeoda软件分别计算全局、局部Moran's I 指数,检验扩张程度的空间相关性。全局Moran's I 指数为0.473 3,在1%水平上显著,说明斑块扩张程度在空间上存在正相关关系。根据局部Moran's I 指数计算结果,斑块主要分布于高-高(33.62%)、低-低(36.60%)集聚区,即扩张程度大的斑块周围聚集

扩张程度大的斑块,扩张程度小的斑块周围聚集扩张程度小的斑块。武汉市扩张程度存在空间依赖性。武汉市新增城市斑块分布如图4所示。

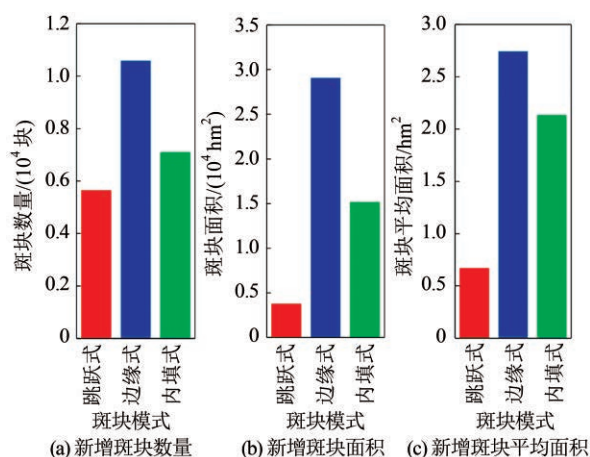


图3 新增城市斑块扩张模式统计

Fig. 3 Statistics of Newly Grown Urban Patches' Types

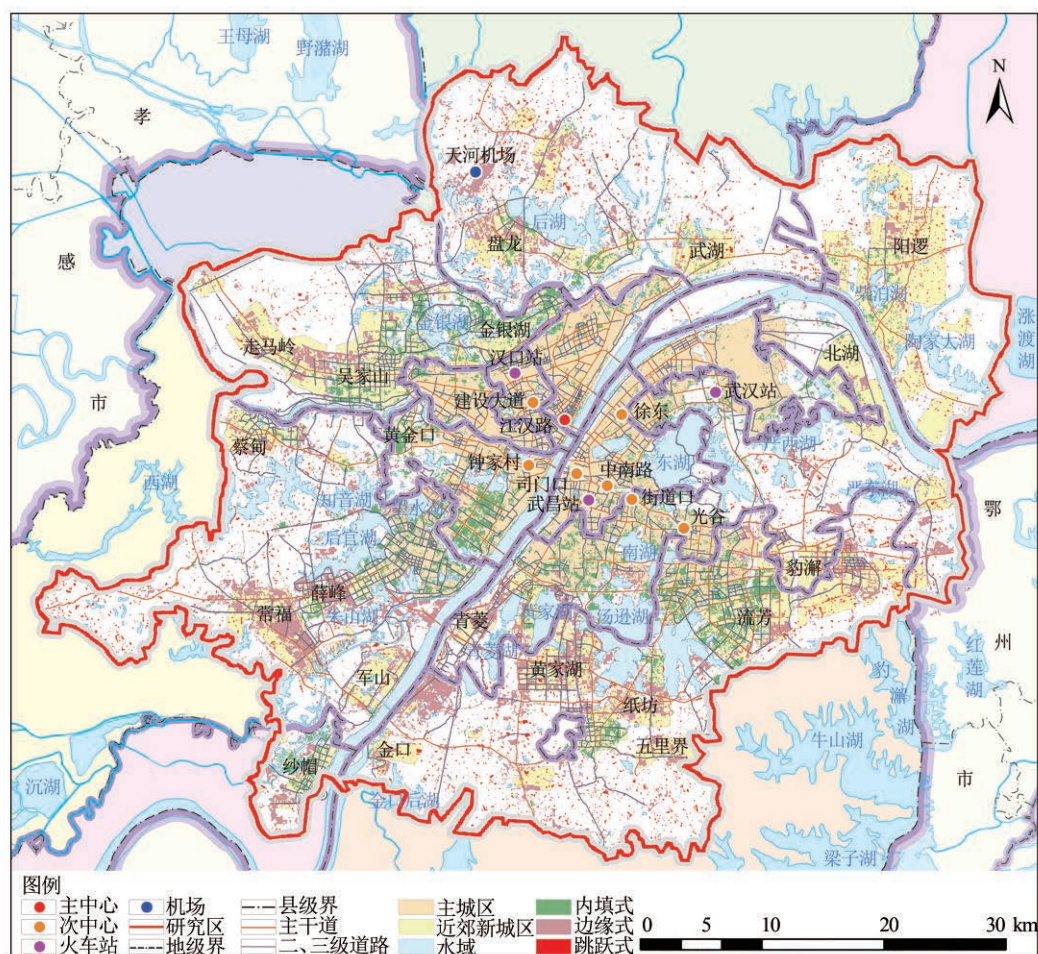


图4 武汉市新增城市斑块扩张模式分布图

Fig. 4 Spatial Distribution of Newly Grown Urban Patches' Types in Wuhan

图4中,城市中心采用焦利民等^[28]利用POI数据识别的武汉市“一主七副”中心结果,主中心为江汉路,副中心分别为司门口、钟家村、中南

路、街道口、光谷、徐东和建设大道。

由图4可知,城市扩张程度存在显著空间差异。新增城市斑块自城市内部向外依次由内填

式、边缘式向跳跃式过渡。计算面积加权平均邻近度指数,主城、近郊新城及城市外围的其他区域分别为0.80、0.62、0.56,扩张程度依次增大。主城作为城市核心,交通设施完善、经济发达、人口聚集,用地受到严格管控,以内填式扩张为主,扩张程度小。主中心江汉路,以及次中心建设大道、钟家村、司门口附近均少发生城市扩张,而随距主中心距离增大,次中心街道口、光谷附近以及南湖、墨水湖周边扩张斑块增多。近郊新城是城市拓展的重点区域,以边缘式扩张为主。武汉南部薛峰、常福、青菱、黄家湖等新城发生大量城市扩张,北部武湖、阳逻新城附近城市扩张相对较少。城市外围的其他区域耕地、林地等生产、生态用地增多,以跳跃式扩张为主,扩张程度

大,主要分布于天河机场、郑店、五里界附近。在空间上,城市扩张自城市内部向外呈现出数量增多、程度增大的趋势;沿长江方向,南段湖泊众多、新城布局密集,扩张数量、程度均大于长江北段,武汉城市用地向南部扩张。

城市扩张程度与扩张速度分别反映城市物理形态变化方向和扩张快慢,采用圈层分析法分析两者的关系。如图5(a)所示,由城市中心向外做1 km缓冲区,将城市划分为42层圈层,计算各圈层面积加权平均邻近度指数、扩张速度,各圈层扩张程度、扩张速度如图5(b)所示,各圈层扩张程度使用 $1 - P_{AWM}$ 表示;计算扩张速度的分子、分母量纲一致,相除之后扩张速度为无量纲。

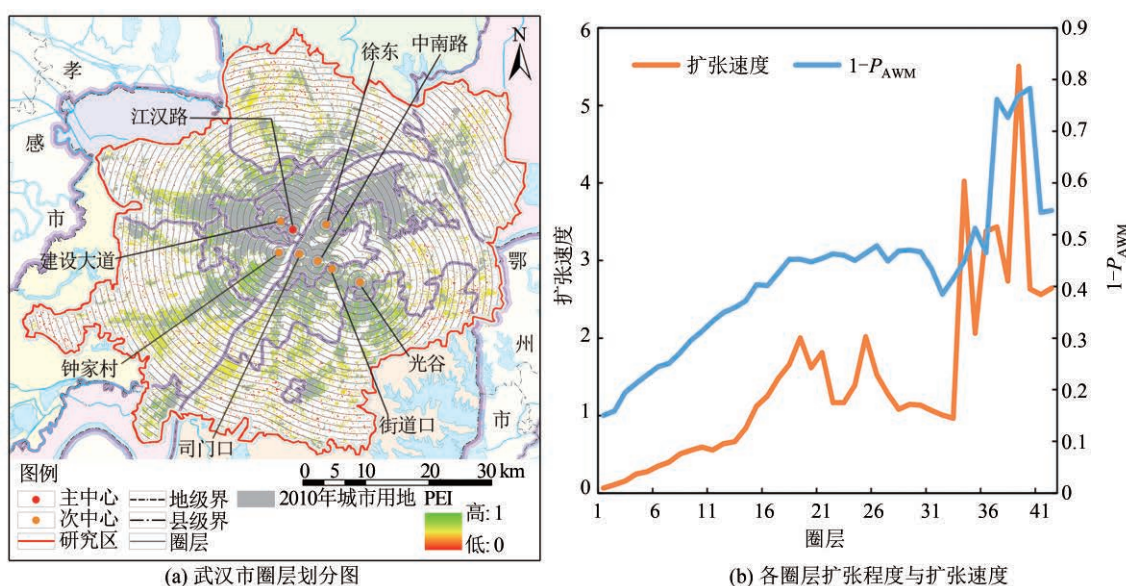


图5 武汉市各圈层扩张程度与扩张速度对比

Fig. 5 Comparison of the Expansion Degree and Expansion Speed of Each Circle in Wuhan

由图5(b)可知,自圈层中心向外,扩张程度与扩张速度均出现增大、小幅波动、大幅波动的变化趋势。1~11圈层是主城区,扩张程度与扩张速度逐渐增大;12~19圈层是近郊新城的聚集区域,扩张程度与扩张速度继续增大,且12~19圈层扩张速度曲线斜率大于1~11圈层,说明近郊新城各圈层间城市扩张速度差异大于主城区,新城城市扩张较主城区更加剧烈;20~33圈层是新城与其他生产、生态用地的混合区域,扩张程度与扩张速度均呈现小幅波动变化;34~42圈层是其他生产、生态用地区域,扩张程度与扩张速度较其他圈层更大,且呈无规律大幅度波动变化。使用相关性分析进一步验证扩张程度与扩张速度的关系,相关系数为0.824,两者存在

显著正相关关系,说明快速扩张过程中容易发生扩张程度增大,新旧城市斑块空间邻近关系疏远,导致城市形态松散。

3 城市扩张程度的影响因素分析

本文从自然条件、社会经济条件、交通条件及规划4个方面,选取19个因素考虑对城市扩张程度的影响,变量定义如表2所示。

为便于揭示扩张程度影响因素及其作用,使用 $1 - P$ 作为被解释变量。对变量标准化并消除共线性的影响,最终保留坡度 X_2 、到河流的距离 X_3 、到湖泊的距离 X_4 、原有林地面积占比 X_5 、原有耕地面积占比 X_6 、人口密度变化 X_7 、到城市主中心的距离 X_8 、到主要道路的距离 X_{17} 、到其他

表2 城市扩张程度的影响因素

Tab. 2 Influencing Factors of Urban Expansion Degree

条件	变量	编码	含义
自然条件	高程	X1	新增城市斑块的高程
	坡度	X2	新增城市斑块的坡度
	到河流的距离	X3	新增城市斑块几何中心到最近河流的距离
	到湖泊的距离	X4	新增城市斑块几何中心到最近湖泊的距离
	原有林地面积占比	X5	新增城市斑块内原有林地面积比新增斑块面积
	原有耕地面积占比	X6	新增城市斑块内原有耕地面积比新增斑块面积
社会经济条件	人口密度变化	X7	2010—2015年新增城市斑块范围内人口密度变化值
	到城市主中心的距离	X8	新增城市斑块几何中心到城市主中心的距离
	到最近城市副中心的距离	X9	新增城市斑块几何中心到最近城市副中心的距离
	工业集聚程度	X10	新增城市斑块内工业POI核密度均值
	居住集聚程度	X11	新增城市斑块内居住POI核密度均值
	商业集聚程度	X12	新增城市斑块内商业POI核密度均值
交通条件	到机场的距离	X13	新增城市斑块几何中心距机场的距离
	到火车站的距离	X14	新增城市斑块几何中心距最近火车站的距离
	到高速路口的距离	X15	新增城市斑块几何中心距最近高速路口的距离
	到地铁站的距离	X16	新增城市斑块几何中心距最近地铁站的距离
	到城市主干道的距离	X17	新增城市斑块几何中心距最近城市主干道的距离
	到城市其他道路的距离	X18	新增城市斑块几何中心距最近城市二、三级道路的距离
规划	规划控制	X19	新增城市斑块位于主城区范围内为3,位于新城范围内为2,其余为1

道路的距离X18、规划控制X19共10个解释变量。使用最小二乘回归(ordinary least squares, OLS)、SLM、SEM分别建立回归模型,拟合优度如表3所示。

表3 模型优度比较

Tab. 3 Goodness Comparison

模型	R^2	对数似然函数	赤池信息准则	施瓦茨准则
OLS	0.429 2	-5 448.93	10 919.9	10 991.3
SLM	0.511 6	-5 104.63	10 233.3	10 311.2
SEM	0.523 4	-5 068.02	10 158.0	10 229.5

由表3可知,SEM模型对数似然函数值最大,赤池信息准则值与施瓦茨准则值均为最小,拟合效果最好,因此选用SEM模型结果。

SEM模型回归结果如表4所示。空间误差回归系数为0.845 1,在1%水平上显著,说明扩张程度存在显著的空间效应。回归系数的绝对值反映了各解释变量对被解释变量的影响程度,由大到小依次为到其他道路的距离X18、规划控制X19、到城市主中心的距离X8、到主要道路的距离X17、原有耕地占比X6、到湖泊的距离X4、坡度X2、原有林地占比X5。

交通条件对城市扩张程度的作用最强。到主要道路的距离X17、到其他道路的距离X18的回归系数分别为0.128 8和0.206 7,表示到道路

距离越远,扩张程度越大。道路附近交通区位好,出行费用低,吸引城市用地沿交通轴线聚集增长,扩张程度低;距离道路远的区域,城市用地增长缺乏良好交通区位的吸引,不确定性大,分布零散,扩张程度高。

表4 城市扩张程度的影响因素回归结果

Tab. 4 Regression Results of Factors Influencing the Degree of Urban Expansion

变量	系数	标准差	Z
常数	-0.123 4**	0.062 4	-1.977 7
坡度X2	-0.081 2***	0.016 5	-4.918 9
到河流的距离X3	0.053 4	0.051 1	1.044 1
到湖泊的距离X4	-0.084 9***	0.017 4	-4.884 3
原有林地面积占比X5	0.064 7***	0.014 2	4.561 0
原有耕地面积占比X6	0.120 3***	0.015 3	7.864 4
人口密度变化X7	-0.022 5	0.014 9	-1.507 0
到城市主中心的距离X8	0.143 0**	0.062 1	2.301 0
到主要道路的距离X17	0.128 8***	0.022 2	5.796 8
到其他道路的距离X18	0.206 7***	0.023 0	8.972 5
规划控制X19	-0.171 9***	0.015 4	-11.133 2
空间误差回归系数	0.845 1***	0.021 4	39.433 7

注:*, **, ***分别代表10%、5%、1%的显著水平

规划控制对城市扩张程度具有显著的负向效应。规划控制X19回归系数为-0.171 9,表示规划控制越严格,扩张程度越小,这与城市外围

其他区域、近郊新城、主城区的扩张程度依次降低的现象吻合,说明现有规划执行在城市扩张过程中起到重要调控作用。

经济条件对城市扩张程度也有显著影响。到城市主中心的距离 X_8 回归系数为 0.143 0,说明距城市主中心越远,扩张程度越大。城市中心是城市社会、经济、人口的主要聚集场所,建设用地占据绝对优势,其他土地稀少,其扩张主要通过优化调整转变内部少量的其他用地,扩张程度低,中心周围的土地受到城市中心的吸引,逐渐向建设用地转变,而随距城市中心距离增大,经济、基础设施条件等逐渐降低,区位对城市用地的吸引逐渐减弱,扩张程度也逐渐增大。

自然条件对城市扩张程度的影响较弱。自

然条件中有 4 个因素通过了显著性检验,但系数均较小,影响程度低。原有林地面积占比 X_5 和原有耕地面积占比 X_6 均与扩张程度正相关,林地、耕地是重要的生态、生产用地,发生土地利用转变的机会成本较低,容易受到城市扩张威胁,同时,其交通等基础设施条件薄弱,城市斑块扩张散乱,扩张程度高。湖泊是城市的重要生态景观,湖泊附近城市土地受水面限制,难以紧凑增长,故到湖泊的距离 X_4 与扩张程度负相关。坡度 X_2 与城市扩张程度负相关,坡度大的区域,城市用地水平扩张受到限制,扩张程度低。

选择光谷、薛峰和常福新城、天河机场 3 个典型区域验证扩张程度的影响因素分析结果。典型区域城市扩张程度分布图如图 6 所示。

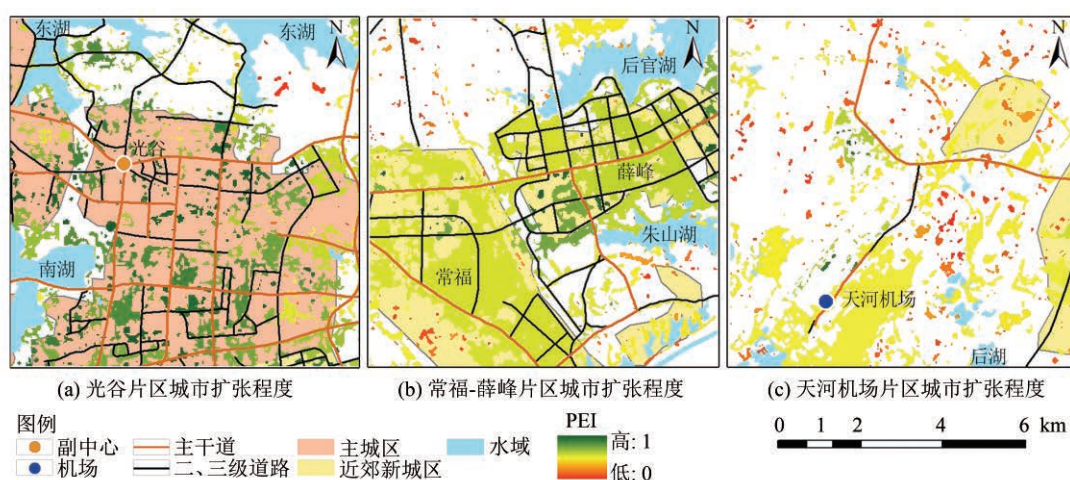


图 6 典型区域城市扩张程度分布图

Fig.6 Spatial Distribution of Urban Expansion Degree in Typical Areas

光谷位于武汉市主城区,是城市副中心,与东湖、南湖毗邻,区域内城市二、三级道路和主干道交错,具有良好的经济与交通区位,城市扩张受到规划严格管控。如图 6(a)所示,光谷新增城市斑块扩张程度小,道路两侧斑块扩张程度较远离道路

的斑块更小,湖泊周边斑块扩张程度相对较大。如图 6(b)所示,薛峰和常福这两个组团位于研究区西南方,是武汉市西南新城组群的重要组成部分。薛峰和常福扩张程度较光谷大,区域内道路以二、三级道路为主,且薛峰路网较常福更加密集,由薛峰沿主干道向常福方向,距城市主中心距离增大,扩张程度也存在增大趋势。如图 6(c)所示,天河机场位于研究区东北方的郊区,距离城市中心远,路网稀疏,生产、生态用地分布较多,扩张程度大于光谷、薛峰和常福新城。综合光谷、薛峰和常福新城、天河机场城市扩张程度分布情况,其分布规律与影响因素分析结果一致。

4 结论与讨论

通过分析 2010—2015 年武汉市城市扩张程度的空间特征与影响因素,主要结论如下:

1) 城市扩张程度存在空间差异。2010—2015 年武汉市城市增长以边缘式为主,主城区、近郊新城、外围其他区域分别以内填式、边缘式、跳跃式扩张为主导,扩张程度依次增大。同时,武汉市城市扩张存在向南发展的趋势,南部扩张斑块更多、扩张程度更大。

2) 城市扩张程度在空间上具有正相关性。城市扩张程度在总体空间上显著正相关,在局部空间呈现高-高、低-低集聚,扩张程度大的斑块呈集聚分布。应用城市扩张程度变化规律,识别较大扩张程度斑块的集聚区域进行重点监控,有助于促进城市紧凑发展。

3) 扩张程度与扩张速度存在强正相关关系。

自城市中心向外,扩张程度与扩张速度均表现出主城与近郊新城区逐渐增大、外围其他区域剧烈波动的相似规律,相关系数为0.824,快速城市扩张易伴随城市扩张程度增大,导致城市形态松散。减缓城市扩张速度,特别是防范城市外围生产生态用地区域城市用地增长,有助于减少扩张程度大的斑块出现,促进城市形态紧凑。

4)城市扩张程度受交通、规划、社会经济因素的影响。到道路的距离和到城市主中心的距离分别代表了交通、经济区位,良好的区位条件能够吸引城市用地聚集增长;反之,交通与经济区位差的区域,扩张程度越大。规划严格控制能够显著调控城市扩张,有效降低扩张程度。此外,耕地占比越高,扩张程度越大,且耕地等生产生态用地上城市扩张速度较主城与近郊新城区更快,发生在耕地上的城市扩张会对城市形态造成更加不利的影响。

城市发展过程中,主城和近郊新城作为城市的核心与重点区域,受政策制定者的重点关注,其发展受到规划引导,城市增长较为紧凑。城市外围的区域,由于经济、交通条件较弱,规划不确定性大,容易受到相关主体的目标与偏好影响,特别是耕地、林地等生产生态用地的经济效益相对较低,用地转变机会成本相对较小,更易发生城市快速扩张,造成城市形态松散。管控城市扩张和促进城市紧凑,应重点着眼于城市外围的耕地、林地等生产生态用地,通过法律法规提高用地转变成本,建立农业生产与生态保护边界,限制城市用地发展空间。同时,发挥经济、交通区位对城市用地的吸引作用,以城市中心为起点,沿交通干线划定城市发展轴,将城市建设用地增量指标沿轴线安排到空间上,优先优化调整城市中心周围用地,尽量减少城市外围用地指标,防止城市外围用地过快增长,对于重点拓展区域,强化基础设施建设,构建良好的交通区位条件,强化城市增长向心力,吸引城市用地聚集增长。

5 结 语

本文基于邻近度扩张指数,分析了武汉市城市扩张程度的空间特征。通过将武汉市划分为等距离圈层,发现了城市扩张程度与扩张速度自城市中心向外的变化趋势及两者之间的正向联系。利用空间回归模型,探讨了城市扩张程度的主要影响因素,为指导城市管控无序扩张、促进城市紧凑发展提供了有益建议。

后续将对不同城市开展研究,分析其扩张程度影响因素的异同,帮助深化认识城市形态演变的内在机理,为城市空间管控提供针对性建议。

参 考 文 献

- [1] Dietzel C, Oguz H, Hemphill J J. et al. Diffusion and Coalescence of the Houston Metropolitan Area: Evidence Supporting a New Urban Theory[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2005, 32(2):231-246
- [2] Seto K C, Fragkias M, Guneralp B, et al. A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion [J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(8), DOI: 10.1371/journal.pone.0023777
- [3] Liu Hongping, Zhang Anlu. Review of Progress of Control on Urban Land Expansion in Foreign Countries[J]. *China Land Science*, 2008, 22(5): 72-76 (刘红萍, 张安录. 国外城市用地扩张控制研究进展[J]. 中国土地科学, 2008, 22(5):72-76)
- [4] Liu Tao, Cao Guangzhong. Progress in Urban Land Expansion and Its Driving Forces [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(8):927-934 (刘涛, 曹广忠. 城市用地扩张及驱动力研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(8):927-934)
- [5] Jia Yuqiu, Tang Lina. Environmental Effects of the Urban Spatial Form of Chinese Cities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8):2 986-2 994 (贾玉秋, 唐立娜. 中国城市空间形态的环境效应[J]. 生态学报, 2019, 39(8):2 986-2 994)
- [6] Liu Qiping, Yang Yongchun, Fu Dongxia, et al. Urban Spatial Expansion Based on DMSP_OLS Nighttime Light Data in China in 1992—2010 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 129-136 (刘沁萍, 杨永春, 付冬霞, 等. 基于DMSP_OLS灯光数据的1992—2010年中国城市空间扩张研究[J]. 地理科学, 2014, 34(2):129-136)
- [7] Zhao Xiaofeng, Liu Mengli, Wang Baiyuan. Spatio-Temporal Disparity of Urban Construction Land and Its Impact Factors in China Based on Geodetector [J]. *China Land Science*, 2018, 32(5):29-35 (赵小凤, 刘梦丽, 王柏源. 基于地理探测器的城市建设用地规模时空差异及影响因素分析[J]. 中国土地科学, 2018, 32(5):29-35)
- [8] Ning Xiaogang, Wang Hao, Zhang Hanchao, et al. High-Precision Urban Boundary Extraction and Urban Sprawl Spatial-Temporal Analysis in China's Prefectural Cities from 2000 to 2016 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12):1 916-1 926 (宁晓刚, 王浩, 张翰超, 等. 2000—2016年中国地级以上城市高精度城区

- 边界遥感提取及时空扩展分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12):1 916-1 926)
- [9] Sun Y, Zhao S Q. Spatiotemporal Dynamics of Urban Expansion in 13 Cities Across the Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration from 1978 to 2015[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 87:302-313
- [10] Gong J Z, Hu Z R, Chen W L, et al. Urban Expansion Dynamics and Modes in Metropolitan Guangzhou, China[J]. *Land Use Policy*, 2018, 72:100-109
- [11] Zhang Chenming, Gao Jianhua, Li Shimin, et al. Fractal Dimension Study of Urban Morphology Based on Network Accessibility[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(12): 2 528-2 540(张宸铭, 高建华, 黎世民, 等. 基于路网可达性的城市空间形态集聚分形研究[J]. 地理研究, 2018, 37(12): 2 528-2 540)
- [12] Zhang Feng, Chen Yanguang, Li Xiaosong. Radial Dimension Analysis of Growth and Form of Cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(1):65-76(张凤, 陈彦光, 李晓松. 京津冀城市生长和形态的径向维数分析[J]. 地理科学进展, 2019, 38(1):65-76)
- [13] Tong Luyi, Hu Shougeng. Characterizations of Urban Sprawl in Major Chinese Cities[J]. *Resources Science*, 2016, 38(1):50-61(童陆亿, 胡守庚. 中国主要城市建设用地扩张特征[J]. 资源科学, 2016, 38(1):50-61)
- [14] Wu Dianming, Shao Dawei. Characteristics of Urban Land Expansion Based on the Optimal Scale: A Case Study of Suzhou[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(9): 1 937-1 946(吴殿鸣, 邵大为. 基于最佳尺度的城市扩张特征研究:以苏州中心城区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9):1 937-1 946)
- [15] Jiao L M, Mao L F, Liu Y L. Multi-Order Landscape Expansion Index: Characterizing Urban Expansion Dynamics[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 137:30-39
- [16] Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. A New Landscape Index for Quantifying Urban Expansion Using Multi-Temporal Remotely Sensed Data[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(5):671-682
- [17] Jiao L M, Liu J F, Xu G, et al. Proximity Expansion Index: An Improved Approach to Characterize Evolution Process of Urban Expansion[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2018, 70:102-112
- [18] Zhao Ke, Zhang Anlu, Xu Weitao. Driving Forces of Urban Construction Land Expansion: An Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data[J]. *Resources Science*, 2011, 33(5):935-941(赵可, 张安录, 徐卫涛. 中国城市建设用地扩张驱动力的时空差异分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5):935-941)
- [19] Wang Lihong, Zhang Junmin. Driving Force Analysis of Spatial Expansion of Oasis Towns Based on Geographical Detectors: Take Shihezi City in Xinjiang as an Example[J]. *Areal Research and Development*, 2019, 38(4):68-74(王莉红, 张军民. 基于地理探测器的绿洲城镇空间扩张驱动力分析:以新疆石河子市为例[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(4):68-74)
- [20] Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Xiong Jinhui, et al. Differences in Driving - Force Mechanisms in Urban Land Expansion in China Based on GWR[J]. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 2018, 48(5):522-530(陈万旭, 李江凤, 熊锦惠, 等. 基于GWR的中国城市用地扩张驱动力差异性研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5):522-530)
- [21] Shafizadeh-Moghadam H, Helbich M. Spatiotemporal Variability of Urban Growth Factors: A Global and Local Perspective on the Megacity of Mumbai[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 35:187-198
- [22] Li H L, Peng J, Liu Y X, et al. Urbanization Impact on Landscape Patterns in Beijing City, China: A Spatial Heterogeneity Perspective[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82:50-60
- [23] 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)
- [24] Shu B R, Bakker M M, Zhang H H, et al. Modeling Urban Expansion by Using Variable Weights Logistic Cellular Automata: A Case Study of Nanjing, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(7):1 314-1 333
- [25] Xiong Hua, Liu Yaolin, Che Shanshan, et al. Land Use Change Simulation Model Based on Support Vector Machine[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(3):366-369(熊华, 刘耀林, 车珊珊, 等. 基于支持向量机的土地利用变化模拟模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(3):366-369)
- [26] Zhou Shuli, Tao Haiyan, Zhuo Li. Vector-Based Multi-agent Simulation of Urban Expansion: A Case Study in Panyu District in Guangzhou City[J]. *Prog-*

- ress in Geography*, 2014, 33(2):202-210(周淑丽, 陶海燕, 卓莉. 基于矢量的城市扩张多智能体模拟:以广州市番禺区为例[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2):202-210)
- [27] Zhu Huiyi, Li Xiubin. Discussion on the Index Method of Regional Land Use Change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5):643-650(朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5):643-650)
- [28] Jiao Limin, Li Zehui, Xu Gang, et al. The Characteristics and Patterns of Spatially Aggregated Elements in Urban Areas of Wuhan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8):1432-1443(焦利民, 李泽慧, 许刚, 等. 武汉市城市空间集聚要素的分布特征与模式[J]. 地理学报, 2017, 72(8):1432-1443)

Analysis of the Factors Affecting the Degree of Urban Expansion : Taking Wuhan City as an Example

SONG Yanhua¹ JIAO Limin^{1,2} LIU Jiafeng¹ XU Gang¹

¹ School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The heterogeneity of urban expansion degree at patch level deeply affects the evolution of urban physical morphology. Studying the factors and mechanisms affecting the degree of urban expansion are conducive to deepening the understanding of the expansion process, facilitating the control of urban spatial expansion and promoting the city's compact and sustainable development. **Methods:** Firstly, we measured the degree of urban expansion of Wuhan City by the proximity expansion index (PEI), and analyzed the spatial distribution characteristics. Secondly, we divided Wuhan City into circles and calculated the expansion degree and speed of each circle, the connection between expansion degree and speed was verified by correlation analysis. Finally, a spatial regression model was constructed to explore the impact of nature, social economy, transportation, and planning on urban expansion degree. **Results:** (1) The degree of urban expansion varied in space, the degree of urban expansion gradually increased from the urban peripheral to the outside. (2) The degree of urban expansion had a positive spatial correlation. (3) There was a strong positive correlation between the degree and the speed of expansion. (4) The traffic location, the control of planning, and the distance to the city center were the main influencing factors of the degree of urban expansion, and the influence degrees decreased in sequence. **Conclusions:** The degree of urban expansion was not disorganized in spatial distribution, but was affected by some factors such as traffic location, planning, and closely related to the speed of expansion. Analyzing the influencing factors of urban expansion degree can provide useful suggestions for urban space management and control.

Key words: expansion degree; proximity expansion index (PEI); spatial regression model; influence factor

First author: SONG Yanhua, master, specializes urban expansion. E-mail: syh_wh@163.com

Corresponding author: JIAO Limin, PhD, professor. E-mail: lmjiao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41971368).

引文格式: 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. DOI:10.13203/j.whugis20190106(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. DOI: 10.13203/j.whugis20190106)