

引用格式:黄康,戴文远,黄万里,等.基于FLUS模型与动能定理的城镇用地增长边界划定[J].地球信息科学学报,2020,22(3):557-567. [Huang K, Dai W Y, Huang W L, et al. Study on the delimitation of urban growth boundary based on FLUS model and Kinetic Energy Theorem[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):557-567.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190415

基于FLUS模型与动能定理的城镇用地增长边界划定

黄康^{1,2},戴文远^{1,2,3*},黄万里^{1,2,3},欧惠^{1,2}

1. 福建师范大学 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室,福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院,福州 350007;
3. 福建师范大学地理研究所,福州 350007

Study on the Delimitation of Urban Growth Boundary based on FLUS Model and Kinetic Energy Theorem

HUANG Kang^{1,2}, DAI Wenyuan^{1,2,3*}, HUANG Wangli^{1,2,3}, OU Hui^{1,2}

1. Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Delineation of urban growth boundary is an important means to prevent the disorderly spread of urban land, protect the ecological environment of the open space outside the cities, and realize the smart growth of cities, which is of great significance to the healthy and sustainable development of cities. Currently, the studies on urban growth boundary delineation mostly use model method, such as Cellular Automata (CA) model, a relatively mature model, to simulate future urban patterns. However, these studies mostly focuses on the delineation of urban growth boundary. There is little effort on quantitative delineation of the inertia boundary of urban growth. The delineation of inertial boundaries can not only reserve a certain space for urban development, but also improve implementation efficiency in urban planning. Based on this, we proposed a method based on the kinetic energy theorem of the mechanics. The FLUS model and the Morphological Erosion and Dilation method (MED) were used to delineate the urban growth boundary. Slope and land use type were used as the frictional force to delimit the inertial boundary. The FLUS model inherits the Artificial Neural Network (ANN) and the Cellular Automaton(CA) model for simulating and predicting the future urban landscape. The MED was used for the clustering of urban neighborhoods to merge into a single area, while eliminating small but isolated urban plaque. In our paper, we selected Fuzhou, a coastal developed city with obvious changes in recent years, as the study area. We simulated the land use patterns from 2000 to 2015 to verify the accuracy of the model. The overall accuracy of land use simulation in 2015 was 0.9389 and the Kappa coefficient was 0.9165. We further predicted the land use pattern in 2027, and delineated the urban growth boundary and inertia boundary in 2027. Results show that the FLUS model and MED can effectively simulate land use and better fit the growth

收稿日期:2019-07-31; 修回日期:2020-01-10.

基金项目:福建省自然科学基金(2018J01741);福建省科技厅公益类重点项目(2017R1034-2);福建省测绘地理信息局科技基金(2017JX04)。[**Foundation items:** Natural Science Foundation of Fujian Province, No.2018J01741; Key Public Welfare Projects of Science and Technology Department of Fujian Province No.017R1034-2; Science and Technology Fund of Surveying and Mapping Geographic Information Bureau of Fujian Province No.2017JX04.]

作者简介:黄康(1995—),男,江西南昌人,硕士生,主要从事土地利用管理方面的研究。E-mail: 814958549@qq.com

*通讯作者:戴文远(1972—),男,福建莆田人,副教授,主要从事土地利用与城乡发展研究。E-mail: dwygeo@fjnu.edu.cn

boundary of urban land use. Using the method of kinetic energy theorem for reference, the inertia boundary of a city can be well delineated according to the expansion resistance in different directions and the expansion intensity in different directions, which provides practical operability and reference values for future study.

Key words: urban growth boundary; inertial boundary; FLUS model; erosion and dilation; kinetic energy theorem; Fuzhou central city

*Corresponding author: DAI Wenyuan, E-mail: dwygeo@fjnu.edu.cn

摘要:城镇用地增长边界能够有效控制城市的无序蔓延,对城市健康持续发展具有重要意义。当前针对城镇用地增长边界划定的研究多采用较为成熟的元胞自动机(CA)模型对城市未来格局进行模拟,且研究多集中于单一的城镇用地增长边界划定,尚无对城镇用地增长的惯性边界进行定量划定,而划定惯性边界不仅能够为城市发展预留一定的用地空间,也能提高城市规划的实施效率。对此,本文以2000、2009和2015年福州中心城区土地利用数据为基础,采用FLUS模型进行土地利用模拟,并对模型精度进行了验证(2015年土地利用模拟总体精度达到0.9389,Kappa系数达0.9165),据此预测了2027年的土地利用格局,从中提取城镇用地采取形态学的膨胀与腐蚀法(MED)进行增长边界的划定。在此基础上,本文提出了一种借鉴力学动能定理划定城镇用地增长惯性边界的方法,以坡度和地类作为摩擦力参数,对福州中心城区城镇用地增长惯性边界进行了研究。结果表明,FLUS模型和MED能够有效地对土地利用进行模拟且能较好的对城镇用地增长边界进行拟合;借鉴动能定理的方法能够根据城市不同方向的扩展阻力和各个方向的扩展强度较好地划定其惯性边界,具有现实可操作性和实际参考价值。

关键词:城镇用地增长边界;惯性边界;FLUS模型;腐蚀与膨胀;动能定理;福州中心城区

1 引言

城市扩张是城市化进程中为满足人口增长和经济发展需要的一个必然历程。在我国经济快速发展、政府行政及土地财政等因素推动下,城市化进程正处在一个“大跃进”和空间扩展失控状态,导致了人口城镇化虚高,城市用地的无序蔓延、利用低效、大量耕地流失和人地矛盾日益趋紧张等问题^[1-2]。因此,在面对上述问题时,不同国家提出过不同的治理模式来控制城市扩张,如美国的“城市精明增长^[3]”、英国的“绿带政策^[4]”、韩国的“新城规划^[5]”等。我国在2006年4月实施的《城市规划编制办法》^[6]中对城市总体规划纲要首次提出划定城市增长边界(UGB)的要求,提出禁建区、限建区、适建区范围,并要求研究中心城区空间增长边界。2014年,北京、上海、沈阳等14市被选为城市开发边界试点城市。随着UGB划定的提出,如何科学有效地对其进行识别与划定已经成为城市发展战略中的重要一环。

城市增长边界的划定是防止城市无序蔓延,保护城市外部开放空间,实现城市的精明增长一个重要手段^[7-8]。关于UGB的研究与实践多集中于美国,美国在控制城市蔓延中提出的“新城市主义”与“精明增长”理念始终将UGB置于一个核心位置^[9]。因此,城市增长边界划定的方法成为了研究的热点,通常可划分为2种:①基于生态适宜性评价或

从生态安全格局角度划定城市增长边界^[10-11];②通过模型的方法对未来城市扩张进行模拟并划定未来某一时期的增长边界,如BP神经网络^[12],系统动力学模型(SD)和元胞自动机模型(CA)结合^[13],FLUS(Future Land-Use Simulation)模型^[14]等。其中,BP神经网络是一种多层前馈神经网络,该方法具有较好的非线性映射能力,能够从较不精确的数据中获取较高的模拟精度,但较容易陷入局部极小值的状况,且网络层数、神经元个数的选择没有相应的理论指导^[12]。CA模型作为一种“自下而上”的模型,能够在相对精细的尺度表现城市空间结构变化,而且可以较好地模拟城市演化自组织、突变等复杂现象^[15]。但CA模型主要着眼于邻域的转换规则,存在一定的局限性,因此在城市扩张等方面的研究多与其他模型进行结合使用,如多智能体模型(ABM)^[16]。FLUS模型是由刘小平等^[17]提出的一种基于“自适应惯性竞争机制”对未来土地利用变化进行模拟的模型。该模型将神经网络算法和CA模型进行结合,能够较好地考虑到各土地利用类型之间的联系,建立土地利用类型之间的竞争机制,相比其他模型具有操作方便,精度较高等优势。

此外,李效顺等^[18]研究表明,城市扩张具有惯性“动量增生”特性,类似于物体运动的规律,城镇用地扩张在某一时间点由于惯性作用仍具有一定的扩张速度,仍会继续向外扩张直至速度减为0,此部分扩张的空间即为惯性空间,其外围边界即

为城镇用地扩张惯性边界。综上,当前对于城市未来多情景下增长边界的划定研究多基于CA模型展开,并在已有研究中取得了较好的成果。但现有研究大多只针对城市扩张的刚性边界进行划定,尽管已有研究^[18]注意到了城市增长惯性边界划定的问题,但还停留在概念阶段,缺少实证的定量分析。基于此,本文尝试提出划定惯性边界的具体定量方法,丰富城市扩张边界划定的研究,并通过划定惯性边界为未来城市扩张预留一定的空间,减少后期规划修编带来的不必要的损耗,提高土地资源的整体配置效率。

2 研究方法

2.1 研究思路

本文在运用FLUS模型对实验区未来土地利用格局进行模拟的基础上,再创新性地提出了借鉴力学中动能定理,以城市扩张的初速度、加速度和摩擦力三者为依据定量划定城市扩张的惯性边界的方法。后文将以海峡西岸省会中心城市福州为实验区,展开实证研究。具体技术路线如图1所示。

2.2 城镇用地增长边界划定

2.2.1 FLUS模型

FLUS模型主要分为2个部分,①通过人工神经网络(ANN)模型确定土地利用与各自然、社会、经济和政策因素之间复杂的对应关系,从而确定各用地类型在研究范围内的适宜性概率。②综合每个栅格的适宜性概率,元胞的邻域影响和自适应惯性系数确定每个栅格的总概率。结合②的CA模型,根据FLUS模型特有的轮盘竞争机制来确定各地类之间是否会发生转换,在该机制下具有较小转化概率的栅格仍有机会进行用地的转化,能够有效地反映地类模拟时的不确定性和复杂性^[19]。该模型

也已被证实相较传统模型具有较高的模拟精度且适用于全球尺度的土地利用模拟^[20]。

其中神经网络算法是一种多层前馈神经网络,第一层为输入层,第二层为隐藏层,第三层为输出层^[12]。其公式为:

$$sp(p,k,t) = \sum_j \omega_{j,k} \times \text{sigmoid}(\text{net}_j(p,t)) = \sum_j \omega_{j,k} \times \left[1 + e^{-\text{net}_j(p,t)} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: $sp(p,k,t)$ 为第 k 种用地类型在栅格 p 和时间 t 上的适宜性概率; $w_{j,k}$ 是隐藏层与输出层间的权重值; $\text{sigmoid}()$ 是隐藏层栅格 p 在时间 t 上的响应值。对于神经网络模型输出的适宜性概率,恒有各类用地的适宜性概率和为1,即:

$$\sum_k sp(p,k,t) = 1 \quad (2)$$

对于自适应惯性竞争机制,其核心为自适应惯性系数,由土地需求数量与土地数量的差异决定自适应惯性系数。其公式为:

$$Inertia_k^t = \begin{cases} Inertia_k^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ Inertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ Inertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_k^{t-1} 、 D_k^{t-2} 分别为 $t-1$ 、 $t-2$ 时刻第 k 种地类的栅格数与需求数量之差。

根据上述步骤,依次计算出每个栅格的总概率,并通过CA模型的迭代功能,将栅格的概率分配到各用地类型,其公式为:

$$TProb_{p,k}^t = sp(p,k,t) \times \Omega_{p,k}^t \times Inertia_k^t \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (4)$$

$$\Omega_{p,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k \quad (5)$$

式中: $TProb_{p,k}^t$ 为栅格 p 在 t 时刻转化为地类 k 的总概率; $1 - sc_{c \rightarrow k}$ 为发生转化的难易程度; $\Omega_{p,k}^t$ 为邻域的影响程度; $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 为在 N 阶摩尔邻域内第 k

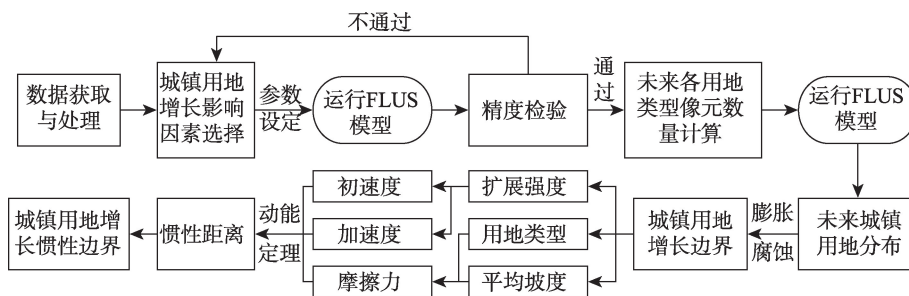


图1 城镇用地增长惯性边界划定技术路线

Fig. 1 Technical route for delimiting the inertial boundary of urban growth

种地类的栅格总数,本文选择 $N=3$; w_k 为邻域影响程度的权重,该权重由各地类的增长速度进行归一化处理得到。

采用实际年份的数据进行模拟并对FLUS模型的精度进行检验,综合考虑生产者精度(PA)、Kappa系数和Overall Accuracy(OA)验证其模拟精度。PA、OA和Kappa系数值介于0~1之间,其值越接近于1,模型精度越高^[21]。

2.2.2 未来像元数量的确定

在FLUS模型中需要对未来预测年份各类土地利用类型的像元数量进行设定,一般根据研究区域实际情况,采用专家经验或土地利用数量预测模型预测出未来各地类的需求。本文采用马尔科夫链进行预测,其公式如下:

$$S(t+1) = P_{ij} \times S(t) \quad (6)$$

式中: $S(t+1)$ 和 $S(t)$ 分别表示 $t+1$ 时刻和 t 时刻的土地利用系统的状态; P_{ij} 表示状态转移概率矩阵。

2.2.3 形态学的膨胀与腐蚀

在对未来土地利用模拟结果进行处理时,采用形态学的膨胀与腐蚀方法(Morphological Erosion Dilation, MED)对结果中的城镇用地边界进行识别^[22]。膨胀与腐蚀是形态学中的一种边界平整方法,通过开运算和闭运算进行边界平滑和内部填充的操作。膨胀即为求局部最大值的操作,核(单独定义的参考点,也称为锚点)与图形卷积,即计算核覆盖的区域的像素点的最大值,并把这个最大值赋值给参考点指定的像素;而腐蚀则与膨胀相反,即求局部最小值的操作。开运算即为先进行腐蚀后进行膨胀的操作,用以去除目标以外的孤立点;而闭运算则为先膨胀后腐蚀的操作,用以去除目标内部的孔隙。

$$X \oplus B = X + b = \{x + b : (x \in X)(b \in B)\} \quad (7)$$

$$X \ominus B = X - b = \{z : (B + z) \subseteq X\} \quad (8)$$

式中:式(7)为膨胀运算公式;式(8)为腐蚀运算公式。

2.3 城镇用地增长惯性边界划定

根据李效顺等^[18]提出的“城市扩张具有继续‘动量增生’特性并存在‘惯性边界’和‘惯性空间’”的命题,本文认为求得惯性空间即为求出原有边界与惯性边界之间的距离,可转化为已知初速度、末速度和摩擦力求运动距离的关系,与力学中的动量定理不谋而合。因此以研究末期年份到模拟预测年份的城镇用地扩张强度作为模拟预测年份的城镇用地惯性扩张的初速度,而末速度为0,提出以地

形和地类等因素作为摩擦力,根据力学中的动能定理计算其城镇用地扩张的惯性距离,进而在FLUS模型运行得到的城镇用地增长边界的基础上加上惯性距离,由此构成惯性空间和惯性边界,其公式如下:

$$S = mv^2/2f \quad (9)$$

$$f = \mu ma \quad (10)$$

$$v = (U_b - U_a) / (TLA \times \Delta t) \quad (11)$$

由式(9)-(11)融合可得:

$$S = [(U_b - U_a) / (TLA \times \Delta t)]^2 / 2\mu a \quad (12)$$

式中: S 为惯性距离; m 原为物体的质量,在本文中为区域城镇用地的面积,但不参与惯性距离的计算; v 为研究末期年份到模拟预测年份的城镇用地扩张速度; f 为摩擦力,即城镇用地惯性扩张所受到的限制; μ 为城镇用地扩张的摩擦系数; a 为加速度,以研究末期年份到模拟预测年份的加速度绝对值作为替代; U_a 和 U_b 为起止时期城镇用地的面积; Δt 为时间间隔; TLA 为土地总面积。

3 实验区概况与数据源

3.1 实验区概况

福州地处中国东南沿海、福建省中东部的闽江口,与台湾省隔海相望,经纬度范围 $25^{\circ}15'N$ — $26^{\circ}39'N$, $118^{\circ}08'E$ — $120^{\circ}31'E$ 。结合研究需要,本文以《福州市城市总体规划(2011—2020年)》^[23]确定的中心城区为研究区,具体包括福州鼓楼区、台江区、仓山区、晋安区(除寿山乡、日溪乡、宦溪镇),以及闽侯县、连江县的部分乡镇(图2),土地总面积 1447 km^2 。福州地貌属典型的河口盆地,盆地四周被群山峻岭所环抱,东有鼓山,西有旗山,南有五虎山,北有莲花峰,境内地势自西向东倾斜,其海拔多在 $600 \sim 1000 \text{ m}$ 之间。福州是福建省的政治、文化、交通中心,海峡西岸经济区中心城市之一。福州是首批14个对外开放的沿海港口城市之一,海上丝绸之路门户。随着改革开放的深入,特别是进入21世纪以来,随着福州“东扩南进西拓”发展战略的实施,城市规模迅速扩大,辖区内人地矛盾也随之日益紧张。

3.2 数据源

本文涉及的数据主要为土地利用数据,其中2009年土地利用变更数据以及基本农田数据来自于福州市国土局;2000年和2015年土地利用数据为Landsat ETM+影像解译数据(表1),具体是在

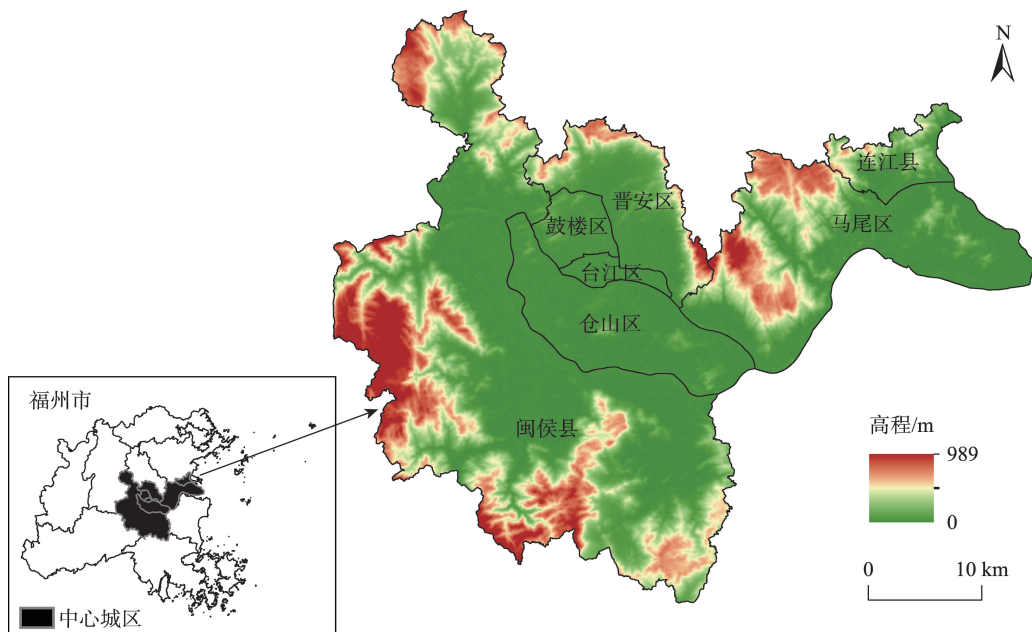


图2 2015年福州中心城区区位

Fig. 2 Location map of Fuzhou central city in 2015

表1 福州中心城区遥感影像数据信息

Tab. 1 Remote sensing image data information of Fuzhou central city

| 传感器 | 日期 | 轨道号 | 多光谱波段分辨率/m |
|------------|------------|---------|------------|
| Landsat-05 | 2000-06-29 | 119/042 | 30 |
| Landsat-08 | 2015-09-27 | 119/042 | 30 |

2009年变更数据基础上采用ENVI 5.1软件对影像进行大气校正和几何校正,并通过监督分类和人工目视解译结合的方法对2期数据进行解译,最终得到各期影像解译精度均大于83%。根据研究需求将地类分为耕地、园地、林地、草地、城镇用地、村庄、工矿用地、交通运输用地、水域及水利设施用地、其他土地10类。高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获取的30 m空间分辨率的DEM。

3.3 数据处理

城镇用地扩张主要受自然因素、社会经济因素和政策因素等方面影响^[24-25]。充分考虑福州中心城区的实际情况以及数据的可获取性,具体选取的影响因素如下:

(1) 地形因素:地形因素对城镇用地扩张起到了关键的限制性作用^[26],其中高程和坡度是主要限制因素之一^[27],根据《城市用地竖向规划规范》^[28]规定,山地丘陵区建设用地最大坡度不超过25°。

(2) 区位因素:道路交通及城市中心等因素对城镇建设用地有一定的牵引和吸引作用。本文采用欧式距离的计算方法分别计算实验区内各个位置到公路、铁路、港口码头、河流、区中心和乡镇中心的距离作为区位因素的反映指标。

(3) 政策因素:切实保护耕地是我国的基本国策。在城镇建设用地扩张中必须保证基本农田数量和质量不降低。因此本文选取研究区的基本农田的分布限制城镇用地扩张以表征政策性因素的影响。

4 结果与分析

4.1 FLUS模型精度检验

首先,采用2000年和2009年的土地利用数据对FLUS模型进行校正,对各影响因素进行标准化处理,并抽取30%的栅格样本用以神经网络的样本训练以及各栅格的适宜性概率计算,得到福州市各地类适宜性概率数据。其次,将模型的惯性系数初始值设置为1,导入各影响因素和适宜性概率图层,得到各地类的CA参数;最后,以2000年和2009年土地利用数据为基础,对2009年和2015年土地利用进行模拟,并将模拟结果与2009年和2015年实际土地利用数据进行对比,并选取模拟结果像元总数的20%进行精度验证(图3)。其中,模拟阶段的成本矩阵主要参考各时期土地利用转移矩阵获得;

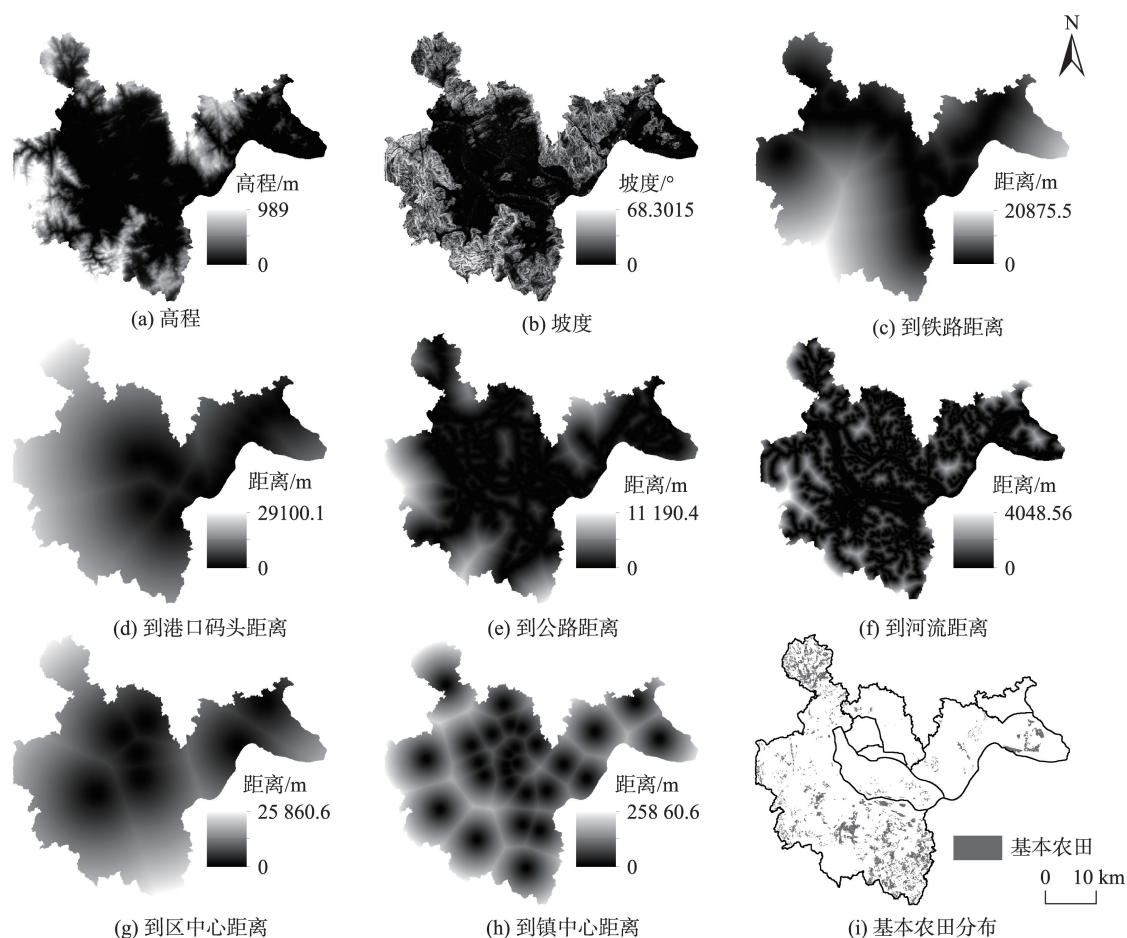


图3 福州中心城区城市扩张影响因素

Fig. 3 Factors affecting urban expansion of Fuzhou central city

邻域因子则根据不同地类不同时间段的增减速度进行标准化获得。

根据模拟结果(图4、表2),2000—2009年福州中心城区土地利用变化主要集中在仓山区金山街道和上街镇旗山地区,且城镇用地多为跳跃式扩张。与2009年土地利用实际情况对比可以看出,除上街镇旗山地区大学城模拟效果不佳外,其他地区模拟效果良好。但因本文在模型的成本矩阵中设定水域及水利设施用地不能转化为城镇用地,导致在2009年的模拟结果中未能将福州市海峡国际会展中心用地体现出来。从生产者精度看,2009年Kappa系数达0.8603,OA值达0.8981,生产者精度除交通运输用地为0.2643外,其余各地类精度均在0.7以上,上述3个精度评价指标均达到较高的准确度。2009—2015年中心城区土地利用变化并不明显,主要体现为城镇用地的外延式扩张和少量的跳跃式扩张,由此2015年的模拟结果与实际土地利用较为吻合,精度较2009年模拟结果也有提高,各类

精度均在0.8甚至0.9以上。而交通建设用地由于受到政策和规划的影响因素较大,因此两次模拟均出现了精度略低的情况(2009年为0.2643,2015年为0.6379),但2015年模拟精度已有明显提升。

4.2 城镇用地增长边界划定

本文采用2009年和2015年实验区实际土地利用数据对未来土地利用格局进行模拟,为保持时间间隔周期相同(6年)而对2个周期后的2027年进行土地利用预测,根据2027年预测结果,从中提取出城镇用地,并运用形态学的膨胀腐蚀法对未来的城镇用地增长边界进行划定。先进行一次闭运算将整个城镇用地形成集中连片,再进行一次开运算去掉城镇用地周边的孤立单元,并基于4种窗口大小对边界进行提取,局部效果如图3所示。结果表明,在 3×3 和 5×5 窗口中UGB的划定虽然去掉了城镇用地周边的孤立地块,但是内部空缺并没有进行填补,而 9×9 虽然对内部孔隙进行了填补,但较

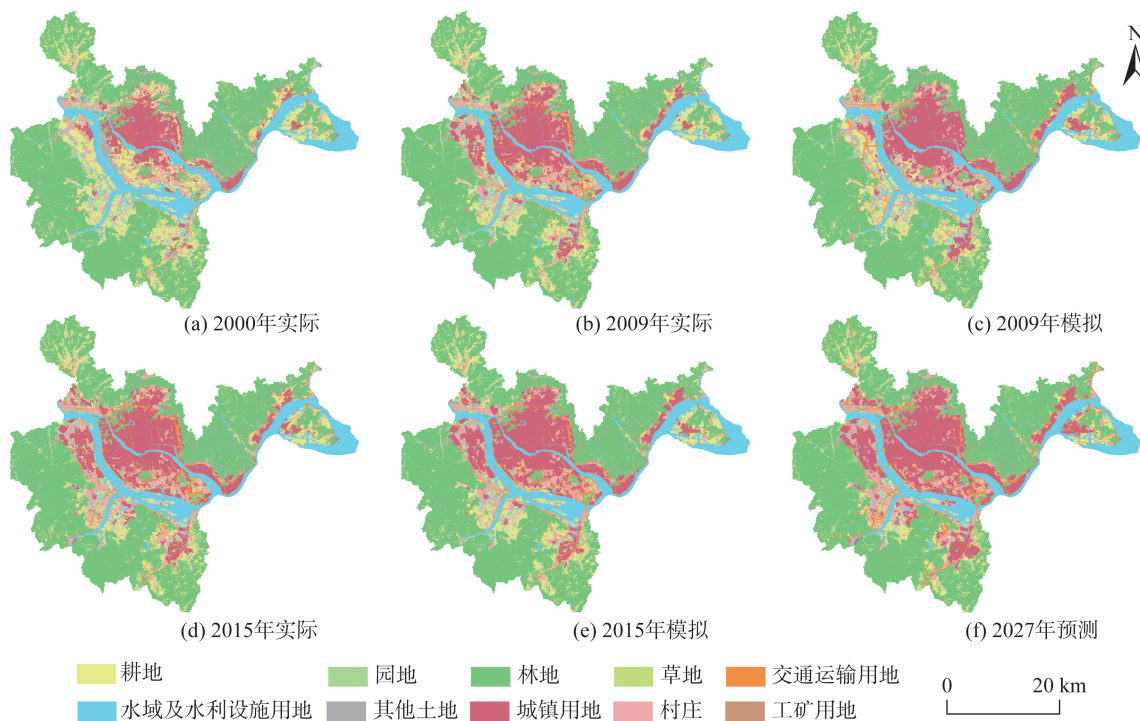


图4 2000—2015年土地利用现状与2009—2027年模拟预测结果
 Fig. 4 Land use status from 2000 to 2015 and simulation forecast results from 2009 to 2027

表2 FLUS模型精度评价

Tab. 2 Accuracy evaluation of FLUS model

| 年份 | 生产者精度(P _i) | | | | | | | | | | Kappa | OA |
|------|------------------------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 耕地 | 园地 | 林地 | 草地 | 交通运输用地 | 水域及水利设施用地 | 其他土地 | 城镇用地 | 村庄 | 工矿用地 | | |
| 2009 | 0.8048 | 0.9857 | 0.9880 | 0.8706 | 0.2643 | 0.9526 | 0.7508 | 0.7656 | 0.7790 | 0.8911 | 0.8603 | 0.8981 |
| 2015 | 0.8725 | 0.9395 | 0.9917 | 0.9475 | 0.6379 | 0.9698 | 0.8849 | 0.8871 | 0.8695 | 0.9438 | 0.9165 | 0.9389 |

多地忽视了孤立地块,没有把图中孤立地块纳入UGB的范围之内。因此,本文选择边界较为平滑,涵盖城镇用地较多且能够较好贴合城镇用地轮廓的7×7窗口进行UGB的划定(图5)。

4.3 城镇用地增长惯性边界划定

考虑城镇用地扩张在不同的方向上存在不同的扩张速度,本文选取的福州中心城区的几何中心为圆心,为减少分区内的空地以覆盖研究区内所有

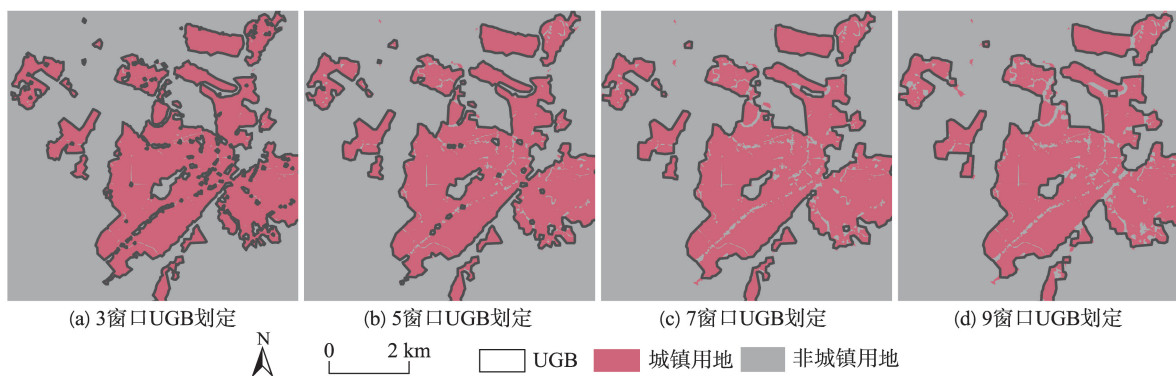


图5 不同窗口大小UGB划定局部对比
 Fig. 5 Comparison of UGB delineation in different window sizes

城镇用地为准设定半径为 35 km, 将研究区内城镇用地分为 12 个等扇分区(图 6), 并计算各方向的扩张速度及惯性距离, 以此划定整个研究区的惯性边界。其中, 摩擦力(f)的大小取决于各个方向上的平均坡度以及各地类的面积。根据城市扩张中土地保护重要性的差异, 本文将各地类的摩擦系数(μ)赋值为: 林地和水域为 4、耕地和园地为 3、草地为 2、其他土地为 1; 值越大说明城市扩张所受到的摩擦力越大, 扩张越为困难。并对各赋值进行标准化处理, 各方向平均坡度及各项参数如表 3 所示。

综合表 3 与图 6 中的局部放大图可知, 各个方向在扩张速度和摩擦系数上存在较大的差异, 由此导致最后的惯性距离呈现较大的差距。从扩张速度来看, 除 N、NEE、SSE、NWW 4 个方向外, 其余各方向在 2027 年的扩张速度(v_2)均小于 2015 年的扩张速度(v_1), 但此 4 个方向在 2027 年均为较快速扩张水平, 说明至 2027 年中心城区城市扩张速度有明显的放缓, 但上述 4 个方向所在的区域仍为未来发展的重点区域。从平均坡度上看, 除 SEE 和 NWW 较低外, 其余各方向因存在较多的山地平均坡度基本

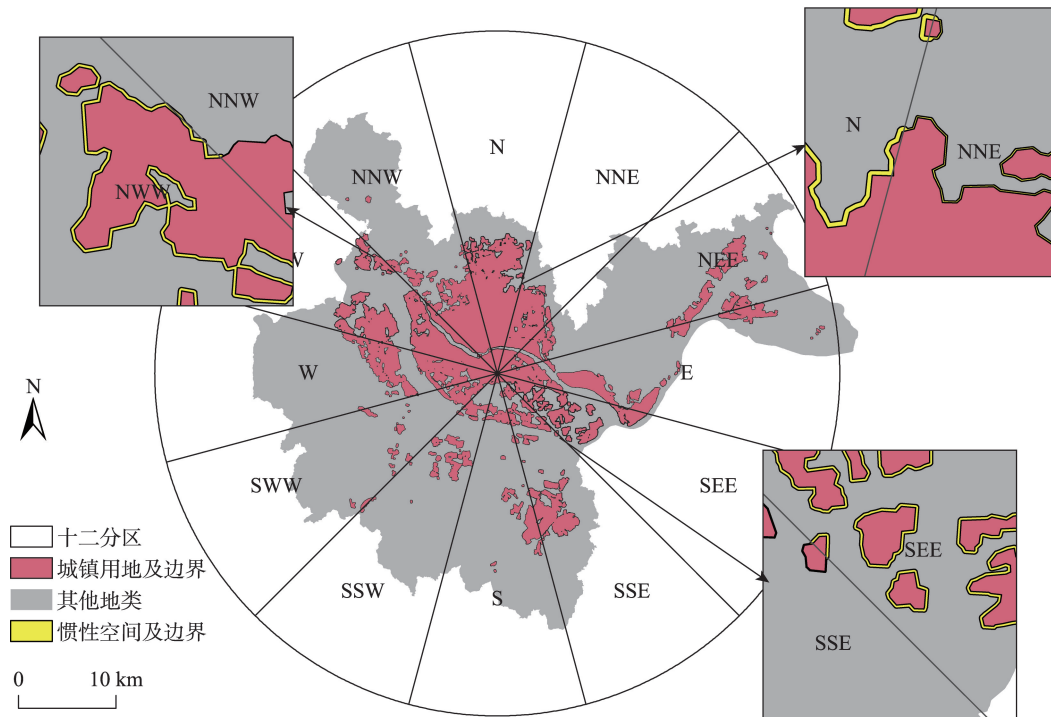


图 6 2030 年福州中心城区城镇用地增长惯性边界

Fig. 6 Urban land growth inertia boundary in Fuzhou central city in 2030

表 3 各方向参数(速度、加速度、坡度和摩擦系数)及惯性距离

Tab. 3 Parameters (speed, acceleration, slope and friction coefficient) and inertia distance in all directions

| 方向 | N | NNE | NEE | E | SEE | SSE | S | SSW | SWW | W | NWW | NNW |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| v_1 (km/a) | 2.99×10^{-3} | 6.71×10^{-3} | 2.07×10^{-2} | 2.59×10^{-3} | 7.26×10^{-3} | 3.22×10^{-3} | 2.28×10^{-3} | 3.89×10^{-3} | 2.32×10^{-3} | 3.47×10^{-3} | 3.12×10^{-3} | 1.62×10^{-3} |
| v_2 (km/a) | 4.93×10^{-3} | 3.46×10^{-3} | 2.38×10^{-3} | 1.95×10^{-3} | 4.89×10^{-3} | 5.28×10^{-3} | 1.56×10^{-3} | 2.15×10^{-3} | 1.07×10^{-3} | 1.75×10^{-3} | 4.22×10^{-3} | 1.06×10^{-3} |
| α (km/a ²) | 1.61×10^{-4} | 2.71×10^{-4} | 2.62×10^{-5} | 5.29×10^{-5} | 1.98×10^{-4} | 1.72×10^{-4} | 6.01×10^{-5} | 1.45×10^{-4} | 1.04×10^{-4} | 1.43×10^{-4} | 9.17×10^{-5} | 4.69×10^{-5} |
| 平均坡度/% | 100.0438 | 118.8172 | 205.8168 | 105.0857 | 16.2596 | 96.9632 | 210.7418 | 203.8767 | 225.3412 | 317.7963 | 40.3332 | 214.0893 |
| 坡度摩擦系数 | 0.0539 | 0.0640 | 0.1109 | 0.0566 | 0.0088 | 0.0523 | 0.1136 | 0.1099 | 0.1215 | 0.1713 | 0.0217 | 0.1154 |
| 用地摩擦系数 | 3.7742 | 2.8323 | 30.4088 | 18.4963 | 2.8350 | 12.1389 | 20.7054 | 18.5137 | 19.1656 | 21.5786 | 6.8599 | 21.1438 |
| 总摩擦系数 | 1.9140 | 1.4482 | 15.2599 | 9.2765 | 1.4219 | 6.0956 | 10.4095 | 9.3118 | 9.6435 | 10.8750 | 3.4408 | 10.6296 |
| 惯性距离/m | 39.3777 | 15.2297 | 7.1216 | 3.8815 | 42.4928 | 13.2985 | 1.9418 | 1.7098 | 0.5755 | 0.9841 | 28.2787 | 1.1188 |

注: 坡度摩擦系数由平均坡度进行标准化求得; 用地摩擦系数由各地类面积与其赋值标准化乘积求和所得; 总摩擦系数为坡度摩擦系数等权求和所得。

在100%以上,因此除向海的方向SEE外,其他方向均存在较大的扩张难度。由式(12)可知,惯性距离与扩张速度、总摩擦系数和加速度3个变量有关, v_2 越大,总摩擦系数和加速度越小,则惯性距离越大。从总摩擦系数和加速度来看,N、NNE和SEE3个方向的总摩擦系数较低,此3个方向的加速度和用地摩擦系数都相对较小,由此导致上述几个方向的摩擦力较小,因此N和SEE方向的惯性距离最大。综合上述3个变量,N、SEE和NWW3个方向的惯性距离相对较大,NNE和SEE次之。同时也表明这3个方向扩张阻力相对较小,为未来城镇用地扩张的重点方向。其中SEE方向惯性距离最大,该方向为福州市长乐区方向,自2017年撤市划区后便作为福州未来城市发展的重要区域,而SSW-SWW-W方向由于旗山和五虎山的地势原因,扩张阻力较大,加之此3个方向扩张速度又偏小,因此导致惯性距离较小,整体上与真实的城市用地发展方向较为符合。最后根据各个方向的惯性距离对各个方向2027年的城镇用地做缓冲区最终构成福州中心城区的城镇用地扩张的惯性边界(图6)。

5 讨论与结论

5.1 讨论

本文在已有城市惯性扩张定性研究的基础上,认为城镇用地扩张与物体的运动规律具有一定的相似性,物体在自身重力和外力的作用下产生运动,而城镇用地则在规划政策的作用和周边城市的吸引力下进行扩张。在此基础上,将力学中的动能定理运用到城市扩张的研究中,运用动能定理中的力、速度、质量和距离的关系探讨城市扩张惯性中的摩擦力、扩张强度、城镇用地面积带来的惯性距离。研究表明,本文所设计的划定惯性边界的方法切实可行,且对实际城市规划和未来城市扩张方向具有一定的指导意义。惯性边界的定量划定能为未来城市发展预留空间,增加规划的弹性,在一定程度上能减少因用地不足而导致的规划修编所带来的不必要的损失,提高规划的实施效率和科学性;同时采用动能定理的方法划定惯性边界能为城市扩张力学分析提供新的思路,改进城镇用地增长模型,为各城市划定城镇用地增长边界提供技术参考。但本文所采用的划定惯性边界的方法仍存在一些不足:① 本文使用FLUS模型对城镇用地增长

边界进行划定,在选取影响因素方面较多的从地形和区位因素方面考虑,较少考虑到社会经济因素对城镇用地增长的影响。同时,在政策因素方面,福州市已于2017年将长乐市撤市划区,未来将与福州中心城区形成双核心发展,这必将导致未来福州更加偏向于向东拓展。② 本文中考虑到数据的可获取性以及数据定量化的问题,仅将坡度和地类因素作为摩擦力,对于其他因素考虑较少,对于该方法的数据需求及计算精度仍需进一步完善。

5.2 结论

城镇用地增长边界的划定对提高城市内部土地利用效率,保护城市外部生态空间以及促进城市的可持续发展具有重要意义。本文以福州中心城区为研究对象,运用FLUS模型对其2027年的用地格局进行模拟,并划定城镇用地增长边界,最后参考力学中的动能定理对其惯性边界划定,结论如下:

(1)借鉴力学中的动能定理,依据城市扩张强度和地形地类构建的计算惯性距离的公式定量划定城镇用地增长惯性边界切实可行。在对城镇用地增长惯性边界划定的过程不仅能够辨别研究期内城镇用地扩张的方向与速度,还能对研究区内各个方向的发展阻力进行判定,可为城市用地布局规划提供一定的参考。

(2)通过对2009年和2015年的数据进行模拟以检验FLUS模型的精度,模拟结果中除跳跃式扩张的城镇用地模拟效果不佳外,其他与实际土地利用格局基本一致。2009年总体精度达到0.8981,Kappa系数达0.8603;2015年模拟结果较2009年更好,各地类的生产者精度都有不同程度的提高,表明FLUS模型能够较好地反映土地利用变化的规律。

(3)针对2027年的模拟结果,提取出城镇用地并采取形态学的腐蚀与膨胀方法对其边界进行划定。结果表明,采取膨胀与腐蚀的方法不仅能够较完整的保持城市边缘的形状特征,而且能够在FLUS模型输出结果的基础上剔除掉较小的城市斑块,相较于人工划定有效地提高了城镇用地增长边界的划定效率。

参考文献(References):

- [1] 刘志玲,李江风,龚健.城市空间扩展与“精明增长”中国化[J].城市问题,2006(5):17-20. [Liu Z L, Li J F, Gong J. Urban expansion and response to Smart Growth used in China[J]. Urban Problems, 2006(5):17-20.]

- [2] 周艳,黄贤金,徐国良,等.长三角城市土地扩张与人口增长耦合态势及其驱动机制[J].地理研究,2016,35(2):313-324. [Zhou Y, Huang X J, Xu G L, et al. The coupling and driving forces between urban land expansion and population growth in Yangtze River[J]. Geographical Research, 2016,35(2):313-324.]
- [3] David N, Bengston,刘丽.美国城市增长管理和开敞空间保护的国家政策——美国的政策手段及经验教训[J].国土资源情报,2004(4):42-49. [David N.Bengston, Liu L. Public Policies for Managing Urban Growth and Protecting Open Space: Policy Instruments and Lessons [J]. Land and Resources Information, 2004(4):42-49.]
- [4] 丁成日.世界巨(特)大城市发展:规律、挑战、增长控制及其评价[M].北京:中国建筑工业出版社,2015. [Ding C R. The development of the world's giant (mega) cities: rules, challenges, growth control and evaluation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.]
- [5] 洪世键,张京祥.城市蔓延机理与治理[M].南京:东南大学出版社,2012. [Gong S J, Zhang J X. Urban Propagation Mechanism and Governance[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2012.]
- [6] 《城市规划编制办法》,中华人民共和国建设部,第146号,2006. [Urban Planning Formulation Means, order of the Ministry of construction of the people's Republic of China, No.146, 2006.]
- [7] Tannier C, Thomas I. Defining and characterizing urban boundaries: A fractal analysis of theoretical cities and Belgian cities[J]. Computers Environment & Urban Systems, 2013,41(41):234-248.
- [8] 吴欣昕,刘小平,梁迅,等.FLUS-UGB多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J].地球信息科学学报,2018,20(4):532-542. [Wu X X, Liu X P, Liang X, et al. Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in pearl river Delta based on FLUS-UGB[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018,20(4):532-542.]
- [9] Jun, Myung-Jin. The effects of portland's urban growth boundary on housing prices[J]. Journal of the American Planning Association, 2006,72(2):239-243.
- [10] 周锐,王新军,苏海龙,等.基于生态安全格局的城市增长边界划定——以平顶山新区为例[J].城市规划学刊,2014(4):57-63. [Zhou R, Wang X J, Su H L, et al. Delimitation of urban growth boundary based on ecological security pattern[J]. Urban Planning Forum, 2014(4):57-63.]
- [11] 刘焱序,彭建,孙茂龙,等.基于生态适宜与风险控制的城市新区增长边界划定——以济宁市太白湖新区为例[J].应用生态学报,2016,27(8):2605-2613. [Liu Y X, Peng J, Sun M L, et al. Delimitation of urban growth boundary based on ecological suitability and risk control: A case of Taibai Lake New District in Jining City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(8):2605-2613.]
- [12] 付玲,胡业翠,郑新奇.基于BP神经网络的城市增长边界预测——以北京市为例[J].中国土地科学,2016,30(2):22-30. [Fu L, Hu Y C, Zheng X Q. The prediction of urban growth boundary based on bp artificial neural networks: An application to Beijing [J]. China Land Sciences, 2016,30(2):22-30.]
- [13] 苏伟忠,杨桂山,陈爽,等.城市增长边界分析方法研究——以长江三角洲常州市为例[J].自然资源学报,2012,27(2):322-331. [Su W Z, Yang G S, Chen S, et al. Analysis method of urban growth boundary of the Changzhou city in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2012,27(2):322-331.]
- [14] 朱寿红,舒帮荣,马晓冬,等.基于“反规划”理念及FLUS模型的城镇用地增长边界划定研究——以徐州市贾汪区为例[J].地理与地理信息科学,2017,33(5):80-86,127. [Zhu S H, Shu B R, Ma X D, et al. The delimitation of urban growth boundary based on the idea of "Anti-planning" and FLUS model: A case study of Jiawang district, Xuzhou City[J]. Geography and Geo-information Science, 2017,33(5):80-86,127.]
- [15] 何春阳,陈晋,史培军,等.基于CA的城市空间动态模型研究[J].地球科学进展,2002,17(2):186-195. [He C Y, Chen J, Shi P J, et al. Study on the spatial dynamic city model based on CA (Cellular Automata) Model[J]. Advances in Earth Science, 2002,17(2):186-195.]
- [16] 陈宝芬,张耀民,江东.基于CA-ABM模型的福州城市用地扩张研究[J].地理科学进展,2017,36(5):626-634. [Chen B F, Zhang Y M, Jiang D. Urban land expansion in Fuzhou city based on coupled cellular automata and agent-based models (CA-ABM)[J]. Progress in Geography, 2017,36(5):626-634.]
- [17] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape & Urban Planning, 2017,168:94-116.
- [18] 李效顺,魏旭晨,郎文婧,等.基于地价均衡的城市扩张理论命题与调控策略研究[J].中国土地科学,2018,32(3):6-13. [Li X S, Wei X C, Lang W J, et al. The theoretical proposition on urban sprawl and its control strategy selection based on land price equilibrium[J]. China Land Science, 2018,32(3):6-13.]
- [19] Chen Y, Li X, Liu X, et al. Capturing the varying effects of driving forces over time for the simulation of urban growth by using survival analysis and cellular automata [J]. Landscape and Urban Planning, 2016,152:59-71.
- [20] Li X, Chen G, Liu X, et al. A new global land-use and land-

- cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017,107(5):1040-1059.
- [21] 张丁轩,付梅臣,陶金,等.基于CLUE-S模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J].*农业工程学报*,2013,29(12):246-256,294. [Zhang D X, Fu M C, Tao J, et al. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013,29(12):246-256,294.]
- [22] Liang X, Liu X, Li X, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018,177:47-63.
- [23] 《福州市城市总体规划(2011-2020年)》,福州市人民政府,2015. [Fuzhou City Master Plan (2011-2020), Fuzhou Municipal People's government, 2015.]
- [24] 全泉,田光进,沙默泉.基于多智能体与元胞自动机的上海城市扩展动态模拟[J].*生态学报*,2011,31(10):2875-2887. [Quan Q, Tian G J, Sha M Q. Dynamic simulation of Shanghai urban expansion based on multi-agent system and cellular automata models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(10):2875-2887.]
- [25] 姜博,王媛,魏超,等.城市土地利用扩展的驱动因素与空间扩展模式研究[J].*干旱区资源与环境*,2014,28(7):1-6. [Jiang B, Wang Y, Wei C, et al. Research on city land use expansion driving factors and spatial expansion model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(7):1-6.]
- [26] 龚健,陈耀霖,张志.基于多分类Logistic回归模型的区域土地利用变化及驱动因素研究[J].*湖北农业科学*,2016,55(17):4545-4550. [Gong J, Chen Y L, Zhang Z. Regional land use change and its driving forces analysis based on multinomial logistic regression[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016,55(17):4545-4550.]
- [27] 张大川,刘小平,姚尧,等.基于随机森林CA的东莞市多类土地利用变化模拟[J].*地理与地理信息科学*,2016,32(5):29-36,127. [Zhang D C, Liu X P, Yao R, et al. Simulating spatiotemporal change of multiple land use types in dongguan by using random forest based on cellular automata[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2016, 32(5):29-36,127.]
- [28] 《城市用地竖向规划规范》(CJJ 83-99).中华人民共和国建设部,1999. [Code for Vertical Planning on Urban Field (CJJ 83-99), Ministry of Construction of the People's Republic of China, 1999.]