

引用格式: 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.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180052

FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定

吴欣昕, 刘小平*, 梁 迅, 陈广亮

中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

Multi-scenarios Simulation of Urban Growth Boundaries in Pearl River Delta Based on FLUS-UGB

WU Xinxin, LIU Xiaoping, LIANG Xun, CHEN Guangliang

School of Geography and Planning of Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Arising from rapid growth of economy and population, urban sprawl has become a major challenge for sustainable urban development in the world. In order to assist urban planning, applicable methods and models are required to guide and constrain the growth of urban areas. Nowadays, urban growth boundaries (UGBs) has been regarded as a common tool used by planners to control the scale of urban development and protect rural areas which has a significant contribution to local ecological environment. However, existing models mainly focus on the delimitation of UGBs for urban development in single-scenarios. To date, there are rarely studies to develop efficient and scientific methods for delimiting the UGBs by taking the influences of macro policy and spatial policy into account. This paper presents a future land use simulation and urban growth boundary model (FLUS-UGB) which aims to delimit the UGBs for the urban areas in multi-scenarios. The top-down system dynamics (SD) model and bottom-up cellular automaton (CA) model are integrated in FLUS sub-model for simulating the urban growth pattern in the future. Furthermore, the UGB sub-model is developed to generate the UGBs that uses a morphological technology based on erosion and dilation according to the urban form produced by FLUS. This method merges and connects the cluster of urban blocks into one integral area and eliminates the small and isolated urban patches at the same time. We selected the Pearl River Delta region (PRD), one of the most developed areas in China, as the case study area and simulate the urban growth of PRD region from 2000 to 2013 for validate the proposed model. Then we used FLUS-UGB model to delimit the UGBs in PRD region of 2050 under three different planning scenarios (baseline, farmland protection and ecological control). The results showed that: (1) the model has high simulation accuracy for urban land with Kappa of 0.715, overall accuracy of 94.539% and Fom 0.269. (2) the method can maintain the edge details well in areas with high urban fragmentation and fractal dimension. This research demonstrates that the FLUS-UGB model is appropriate to delineate UGB under different planning policies, which is very useful for rapid urban growth regions.

收稿日期 2018-01-16; 修回日期: 2018-02-18.

基金项目 : 国家重点研发计划项目(2017YFA0604404); 国家自然科学基金面上项目(41671398)。[**Foundation items:** National Key R&D Program of China, No.2017YFA0604404; National Natural Science Foundation of China, No.41671398.]

作者简介 : 吴欣昕(1994-), 女, 硕士生, 研究方向为大数据与城市模拟。E-mail: wuxx33@mail2.sysu.edu.cn

*通讯作者 : 刘小平(1978-), 男, 教授, 研究方向为地理模拟、空间智能及优化决策等。E-mail: liuxp3@mail.sysu.edu.cn

Key words: urban growth boundary; urban expansion; FLUS-UGB model; cellular automata; erosion and dilation

***Corresponding author:** LIU Xiaoping, E-mail: liuxp3@mail.sysu.edu.cn

摘要 城市增长边界(UGBs)能够控制城市空间的无序蔓延并引导城市合理增长,多发展情景下的UGBs是对不同规划条件下城市未来发展空间范围进行界定的常用方法。元胞自动机(CA)模型能对未来城市发展进行动态的预测,并已广泛的应用于UGBs的划定中。然而,目前的方法和模型大多只针对单一的城市发展情景进行UGBs的划定,较少能对未来多种发展情景下的UGBs进行准确划定。因此,针对这个问题本文提出了一种基于未来用地模拟(FLUS)模型和膨胀与腐蚀的算法的多情景UGBs划定模型(FLUS-UGB)。本文选取珠江三角洲地区为研究区,在对2000-2013年珠江三角洲地区城市土地利用进行模拟和验证的基础上(Kappa系数为0.715,总体精度为94.539%),预测了2013-2050年基准、耕地保护及生态控制3种情景下珠江三角洲地区的城市扩张,并根据预测结果对该地区UGBs进行划定。结果显示,该方法能够针对不同的城市发展情景进行相应UGBs的划定,具有较好的可靠性及适用性。

关键词 城市增长边界;城市扩张;FLUS-UGB模型;元胞自动机;膨胀腐蚀

1 引言

在中国快速城市化进程中,城市建设用地不断增长,产生了城市无序蔓延、侵占优质耕地、自然资源过度开发等严重问题^[1]。这些问题将会造成严重的生态恶化与耕地流失,从而对城市的可持续发展形成了巨大的挑战^[2]。因此,如何科学地引导城市的发展,协调城市建设用地保障与生态环境、耕地保护间的平衡关系已经成为当前城市管理与规划中急需解决的问题^[3]。目前控制城市发展的政策普遍都致力于增加城市用地的使用密度与保护优质的开放空间^[4],主要包括绿带(Greenbelt)、城市增长边界(Urban Growth Boundary, UGB)和城市服务边界(Urban Service Boundary, USB)3种方式^[5]。其中,城市增长边界的功能是用于界定城市与非城市区域,它通过用地区划、开发许可证等调控手段,将城市开发规模控制在边界以内,从而控制城市用地的增长规模^[6],已被广泛应用^[7-10]。

随着UGBs的广泛应用,有效且科学的UGBs划定方法成为当前的研究热点,国内一些学者运用多种模型和方法对UGBs的划定进行了探索^[11-12]。传统的人工划定城市增长边界所采用方法往往难以反映城市用地内部的发展规律,并缺乏充分的科学依据与定量分析,包含主观因素,从而难以合理有效地调控城市用地发展^[6]。此外,有学者采用城市发展适宜性评价模型同时结合一系列相关空间因素用于UGBs的划定^[13]。这种方法虽然简便,但难以反映相关地理因素的相互作用机制,并忽略了城市发展的历史规律且不具备预测城市未来发展的多种情景的能力^[7]。

元胞自动机(Cellular Automata, CA)是一种“自

底向上”的地理模拟模型,能够动态地反映出城市系统的复杂结构,因而被广泛应用于土地利用的模拟与预测中^[14-17]。目前有许多研究将CA模型的城市发展模拟的结果加入UGBs的划定中以弥补传统方法的缺陷。例如,Tayyebi等^[18]设计了基于2种规则的CA模型,将其应用于德黑兰大都会区域并直接依照城市发展模拟结果进行UGBs的划定;李咏华^[19]构建了生态视角下的GIA-CA空间模型,将生态保护的被动防御转变为主动控制的模式,并通过杭州的实证研究得出该模型能够有效进行UGBs的划定。此外,CA模型通过结合相关智能算法如人工神经网络^[20],随机森林^[21],蚁群算法^[22]等确定模型的元胞转换规则,这些智能算法用以优化CA模型应用于城市发展模拟与预测,提高以CA模拟结果进行UGBs划定的真实性与可靠度。

然而,在复杂多变的城市发展进程下,基于CA模型的UGBs划定也存在一定的问题。许多基于CA的UGBs模型仅根据CA模型的城市模拟结果,而忽略了“自顶向下”的城市区域规模的控制以及政府规划政策的影响,即缺乏考虑宏观土地供需以及空间政策调控等复杂驱动因素的影响^[17,23]。当前大部分利用CA进行UGBs的划定的研究是针对单一的城市发展场景构建,但城市在不同规划条件下将呈现发展情景的差异,目前较少有对城市未来发展多种情景下的UGBs划定。同时,受到复杂地形与较快的城市发展速度的影响,中国的许多区域的城市形态往往呈现出较高的离散度和破碎度,而目前大多的UGBs划定均较为粗糙和模糊,难以根据实际情况进行及时和灵活的调整^[24]。

结合上述背景及问题,本文引入未来用地模拟FLUS模型与基于形态学膨胀与腐蚀方法的边界提

取UGB模型,将二者结合构建成FLUS-UGB模型,用于多情景下城市发展形态的高效UGBs划定。其中,FLUS模型被证明能够有效地进行多情景下的复杂土地利用变化模拟^[25],而形态学的膨胀与腐蚀方法能够有效进行边缘提取与图像的分割与细化^[26]。本文尝试将FLUS-UGB模型进行精度验证后,将膨胀腐蚀方法应用于广东省珠江三角洲区域2050年多种情景下的城市用地发展模拟与UGBs划定中,为UGBs的划定提供方法上的参考。

2 研究方法

未来用地模拟FLUS模型已被实证能够有效地应用于多情景下的全球尺度及多类的土地利用模拟中,并较传统模型有更高的模拟准确度^[25,27],本文则采用该模型进行未来城市发展模拟。FLUS模型的框架包括2个部分:①根据宏观的社会经济、人口发展与社会政策等条件,利用系统动力学SD进行建模,用以预测未来城市用地的开发规模;②结合CA模型,考虑相关交通、规划与自然条件等一系列影响城市发展的因素,将元胞向城市用地转换的可能性、元胞间的相互作用和城市总体发展趋向三者进行结合,共同参与元胞转换总体概率的计算。最终利用轮盘赌机制以确定元胞是否发生用地类型的转换,从而实现城市用地发展的动态模拟。在实现边界提取的UGB模型中则通过形态学中的膨胀与腐蚀操作,二者构成开运算与闭运算,利用定义的结构元素对FLUS模拟得到的城市用地模拟结果进行遍历从而进行UGBs的划定,FLUS-UGB的总体模型结构如图1所示。

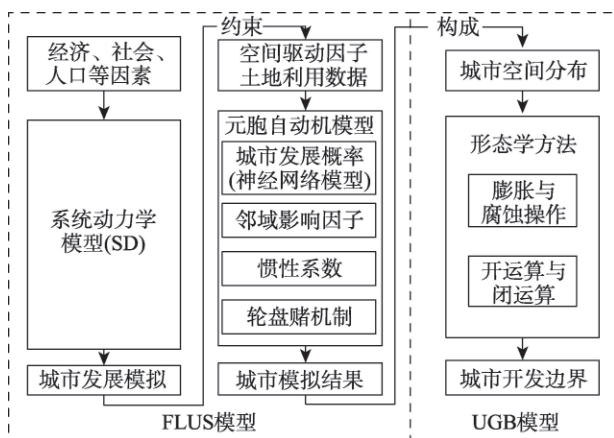


图1 FLUS-UGB模型结构

Fig. 1 The structure of FLUS-UGB model

2.1 城市用地规模预测

系统动力学(System Dynamics, SD)模型是建立在控制论、系统论和信息论基础上研究反馈系统结构、功能和动态行为的一类模型,其通过不同模块和变量之间的交流与回馈从而模拟复杂系统的行为^[28-29]。SD模型具有“自顶向下”的特点,能够科学地预测出不同规划政策与发展条件下的未来城市用地变化,相关研究表明SD模型能够从宏观上反映土地系统的复杂行为,是进行土地系统情景模拟的良好工具^[30-31]。本文利用SD模型结合人口、经济、社会等多方面的因素用于多情景下未来城市增长的用地规模预测。在SD模型中,不同因素之间的反馈及相互作用则通过拟合的经验公式进行定义,其中构建内部经验公式的数据主要来源于研究区域近年的统计年鉴数据。本文通过Vensim软件(<http://vensim.com/>)构建的SD模型如图2所示,主要包括人口子系统、经济子系统和土地利用子系统3大模块,其中土地利用子系统将用地分为居住、工业和商业3大类型。

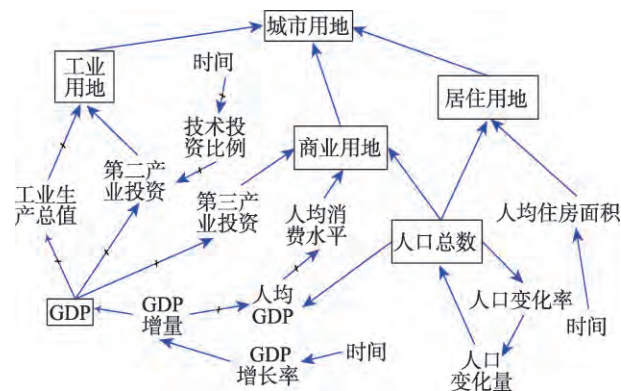


图2 系统动力学模型内部结构图

Fig. 2 The interactions between different factors in the system dynamics

本文设置模拟时间步长及输出间隔时间均为1年,包括2个阶段:①2000-2013年为模型模拟阶段,通过运用历史数据对SD模型进行参数设定、模型调整及模型检验;②2013-2050年则为多情景预测阶段,主要通过不同的规划条件进行参数确定,从而进行不同情景下的用地规模预测。

2.2 未来城市用地模拟

CA模型应用于城市用地的动态模拟中的核心内容是确定元胞的转换规则,FLUS模型对传统CA模型进行了改进,引入了人工神经网络(Artificial

Neural Network, ANN)模型用以反映元胞转换为城市用地的可能性,同时利用惯性系数与竞争机制以表达动态模拟过程中城市与非城市用地的互动与竞争机制,这种改进的CA模型更能够适应城市空间的真实增长并反映出城市的长期发展态势。

在模拟过程中,首先利用神经网络模型通过自学习的方式拟合出大量社会、经济、交通和自然等空间变量与城市土地利用的复杂对应关系,最终通过输出层计算出单元转换为城市用地的潜在可能性。ANN模型通过模仿人类大脑学习以进行智能计算,尤其适用于复杂非线性问题的求解,从而有效解决了多类空间变量复杂的权重分配问题^[32]。在FLUS模型中采用三层BP神经网络模型,并根据研究所选取的空间变量设置神经网络中各层的神经元个数,而后通过选取的空间驱动因子与城市用地的历史分布的随机采样样本对ANN进行训练,通过ANN的计算从而得到元胞的发展概率。

将结合得到的元胞发展概率与元胞的邻域影响及自适应系数进行总体概率计算。其中,邻域影响反映了城市周围单元与中心单元的相互影响,表示邻域范围内各用地单元间的作用,本文选取了3×3的Moore邻域模型进行城市模拟,可将元胞邻域影响因子的计算模型表达为式(1)。

$$\Omega_{ij}^t = \frac{\sum_{3 \times 3} \text{con}(s_{ij}^t = \text{urban})}{3 \times 3 - 1} \quad (1)$$

式中: s_{ij}^t 为 t 刻位于 ij 元胞的当前状态,将根据条件判断统计其3×3邻域内的城市元胞,即将 Ω_{ij}^t 表达为位于 ij 胞的在 t 时刻的邻域影响因子。在FLUS模型中,自适应惯性系数用于调整当前土地利用的数量,使模拟用地参照实际需求进行发展。自适应惯性系数将判断当特定的土地利用类型的发展趋势与实际需求存在较大差距时,即在下次迭代中调整该土地利用的发展趋势,从而实现动态增加该土地利用类型的数量^[25,27],因而自适应惯性系数被定义为式(2)。

$$I_k^t = \begin{cases} I_k^{t-1} & \text{if } |D_k^{t-1}| \leq |D_k^{t-2}| \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & \text{if } D_k^{t-1} < D_k^{t-2} < 0 \\ I_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & \text{if } 0 < D_k^{t-2} < D_k^{t-1} \end{cases} \quad (2)$$

I_k^t 表示土地利用类型 k 在迭代时刻 t 的自适应惯性系数,其中 D_k^{t-1} 表示时间 $t-1$ 土地使用真实需求和其所分配面积之间的差异。自适应惯性系数

被默认设置为占用当前单元的土地利用类型,即如果发展的土地利用类型 k 与当前土地利用类型 s 不相同,则土地利用类型 k 的自适应惯性系数将被定义为1,即对当前单元土地利用类型的总体发展概率没有影响。

综合上述元胞的发展概率、邻域影响因子和自适应惯性系数,可以确定各个元胞的土地利用总体转换概率(式(3))。

$$TP_{ij,k}^t = PG_{ij,k} \times \Omega_{ij}^t \times I_k^t \quad (3)$$

式中: $TP_{ij,k}^t$ 是指元胞单元 ij 从迭代时刻 t 从原始土地利用类型转换为目标土地利用类型 k ,在此本文仅考虑城市与非城市2类,即表达为1和0的概率; $PG_{ij,k}$ 则由神经网络算法计算所得为元胞单元 ij 转换为用地类型 k 的城市发展概率; Ω_{ij}^t 和 I_k^t 为上述介绍的邻域影响因子与自适应惯性系数。

在得到元胞的总体转换概率后,许多相关研究的用地转换确定则通过优先分配对应总体概率最高的用地类型,即将土地利用类型转换成最高概率的类型^[33-34],但这种方法仅考虑占主导的土地利用类型,忽略了其他非优势土地利用类型的分配机会。在FLUS模型中采用了轮盘竞争机制以确定城市单元是否发生土地利用类型的转换,其对城市模拟过程中土地利用的跨越式发展有重要意义^[35]。轮盘竞争机制由轮盘所占面积代表分配概率,反映了具有较高总体概率则有更大的可能分配为某单元的用地类型,而有较低概率的用地类型仍有机会被分配,该机制的随机特征性使模型能够更好地反映用地模拟的动态性与不确定性。因而元胞单元将通过轮盘竞争机制分配到相应的用地类型,得到各个模拟时刻的城市发展形态。此时考虑城市的多情景发展情况,加入相关规划政策对结果进行约束,并根据SD模型预测的未来城市发展规模对模拟的迭代过程进行控制,以此实现SD模型与CA模型的耦合,最终得到模拟的未来城市发展形态。FLUS的城市用地模拟流程如图3所示。

2.3 基于形态学膨胀腐蚀的边界划定

形态学的处理过程是在研究区域中移动一个结构元素,将结构元素与区域进行交、并等集合运算,其基本的形态运算是腐蚀和膨胀^[26]。膨胀腐蚀是一种针对集合的处理过程,通常用到的还包括由膨胀腐蚀构成的开运算与闭运算,其能够有效地解决图像噪声、特征提取、边缘检测、纹理分析、形状

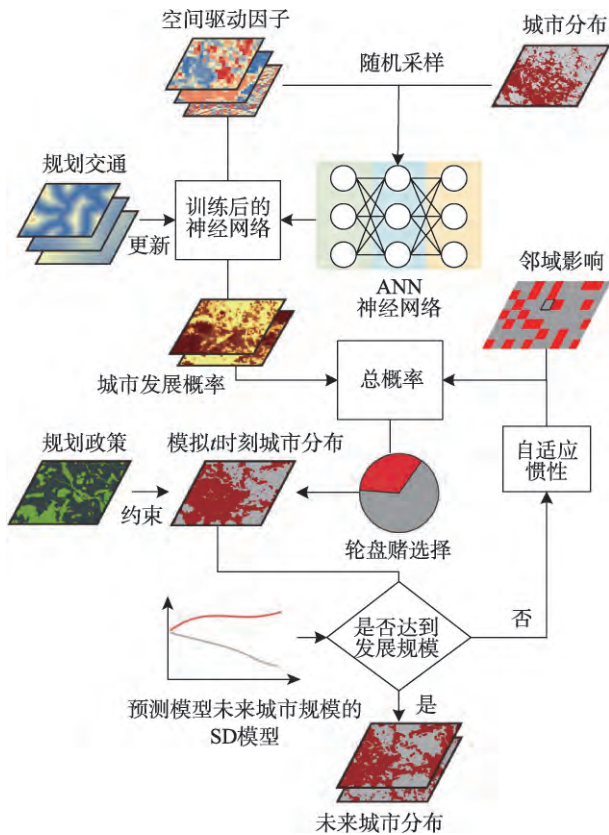


图3 FLUS的城市用地模拟流程

Fig. 3 Flow chart of urban land use simulation by FLUS

识别等问题^[36]。本文结合上述所得的城市发展形态,基于膨胀腐蚀的开闭运算方法进行城市边界的划定。

2.3.1 膨胀腐蚀方法

膨胀腐蚀是形态学中的一种边界规整方法。膨胀操作是由结构元素确定的邻域块中选取图像值与结构元素值的和的最大值,即代表着结构元素的移动将其中的非城市单元转化为城市单元。设 B 为结构元素确定的邻域块,设工作空间中的任意一点 X , 则膨胀运算被定义为式(4)。

$$X \oplus B = X + b = \{x + b : (x \in X)(b \in B)\} \quad (4)$$

腐蚀操作则与膨胀相反,是由结构元素确定的邻域块中选取图像值与结构元素值的和的最大值,即利用结构元素中心单元对城市土地利用图像进行遍历,若当前城市单元邻域块与结构元素不完全一致,则去除该城市单元(即转变为非城市单元)。同样设 B 代表结构元素确定的邻域块,设工作空间中任意一点 X , 腐蚀操作可定义为式(5)。

$$X \ominus B = X - b = \{z : (B + z) \subseteq X\} \quad (5)$$

2.3.2 城市边界划定

城市开发边界的划定一方面需要考虑城市发

展过程中受到自然条件的制约,另一方面也需要考虑城市未来可能形成的空间结构^[37]。本文构建的 FLUS-UGB 模型参照未来城市发展的多重情景,将开、闭运算作用在城市未来用地发展模拟结果中。其中,开运算的实质为首先进行一次腐蚀操作后进行膨胀操作,根据上述膨胀腐蚀的定义,其可被表达为式(6)。

$$X \circ B = (X \ominus B) \oplus B \quad (6)$$

而闭运算则首先进行膨胀操作而后进行腐蚀操作,即为式(7)。

$$X \cdot B = (X \oplus B) \ominus B \quad (7)$$

开、闭运算是膨胀与腐蚀常用的操作集合,图像处理中常常利用形态学开闭运算得方法对区域进行边缘平滑和内部填充等^[38]。当其运用在城市边界的划定中,开运算能够切断细长的城市单元而实现分离,并起到平滑城市单元块的作用;而闭运算能够填充城市单元的缺口与空洞,从而连通城市单元块。因此,通过开、闭运算能够实现依据未来城市模拟结果以实现边界的划定,并确保最终得到的城市开发边界在保持城市总体的发展形态下进行划定,同时不会偏离与规划的总体目标。本文的 FLUS-UGB 模型采用了大小为 $n \times n$ ($n \geq 3$) 并去除4个边角的结构元素,其能够有效地保留边界特征而存在较少的冗余信息。利用该结构元素首先进行一次闭运算以连接需要调整的城市区块,而后进行一次开运算以删除一些不适用于UGBs划分的孤立的单元,如图4所示。

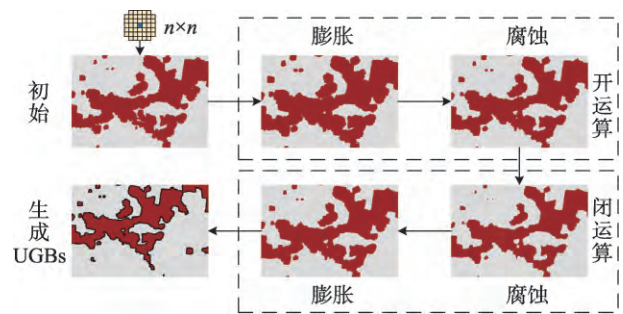


图4 基于形态学膨胀腐蚀UGBs划定的流程图

Fig. 4 Flow diagram of the UGBs delineation based on morphological method of erosion and dilation

3 应用实例

3.1 研究区及数据

本文选取广东省珠江三角地区(Pearl River Delta, PRD)作为研究区域,珠江三角洲位于广东省

南部,占地面积约为54 000 km²,包括广州、深圳、珠海、佛山、中山、江门、东莞、惠州与肇庆市^[39]。在外部促进与内部整合的条件下,珠江三角洲地区的城市发展迅猛,而为了城市的可持续发展,合理规划城市发展边界以控制城市增长是十分必要的。同时,珠江三角洲区域的城市群分布多变,城市边界分布十分复杂,因此本文选取该地区城市开发边界划定的研究将更具有代表性。本文利用2000–2013年的珠江三角洲土地利用数据,城市土地利用类型主要考虑城市与非城市2类,研究所使用的数据均为30 m分辨率,图幅的尺寸为13 836像元×104 40像元,本文所使用的一系列自然、社会、经济等驱动力因素如图5所示。

3.2 FLUS城市模拟及精度验证

本文将FLUS模型应用中,根据上述选取的空间变量,能够确定神经网络模型的输入层中有13个神经元,输出层则对应城市与非城市2类。而后通过按0.1%采样比例对城市土地利用数据与空间驱动因子数据进行随机采样,获取研究区域的训练样

本集,并应用于神经网络的训练中。将得到珠江三角洲城市的发展概率数据,结合上述元胞邻域影响、自适应惯性系数的共同作用,计算出元胞单元的总发展概率。

本文以2000年珠江三角洲区域土地利用数据(图6(a))为初始状态,通过FLUS模型模拟得到2013年珠江三角洲区域的土地利用情况(图6(c)),对比2013年珠三角区域真实的土地利用情况(图6(b)),可以看出利用FLUS模型进行城市土地利用模拟的结果与真实数据城市用地的分布大体一致。为了验证FLUS模型的模拟精度,引入Kappa系数与Fom系数进行模型精度评价。通过计算得到Kappa值为0.715,总体精度为94.539%,Fom值为0.269。结果表明,FLUS模型的模拟精度较高,即能够较好地呈现真实的城市发展形态,因而将其应用于预测城市未来用地发展的可靠性也较高。

3.3 多情景下未来城市模拟

城市未来土地利用的模拟同时需要考虑不同的约束条件,进而能在模型预测中控制城市未来的

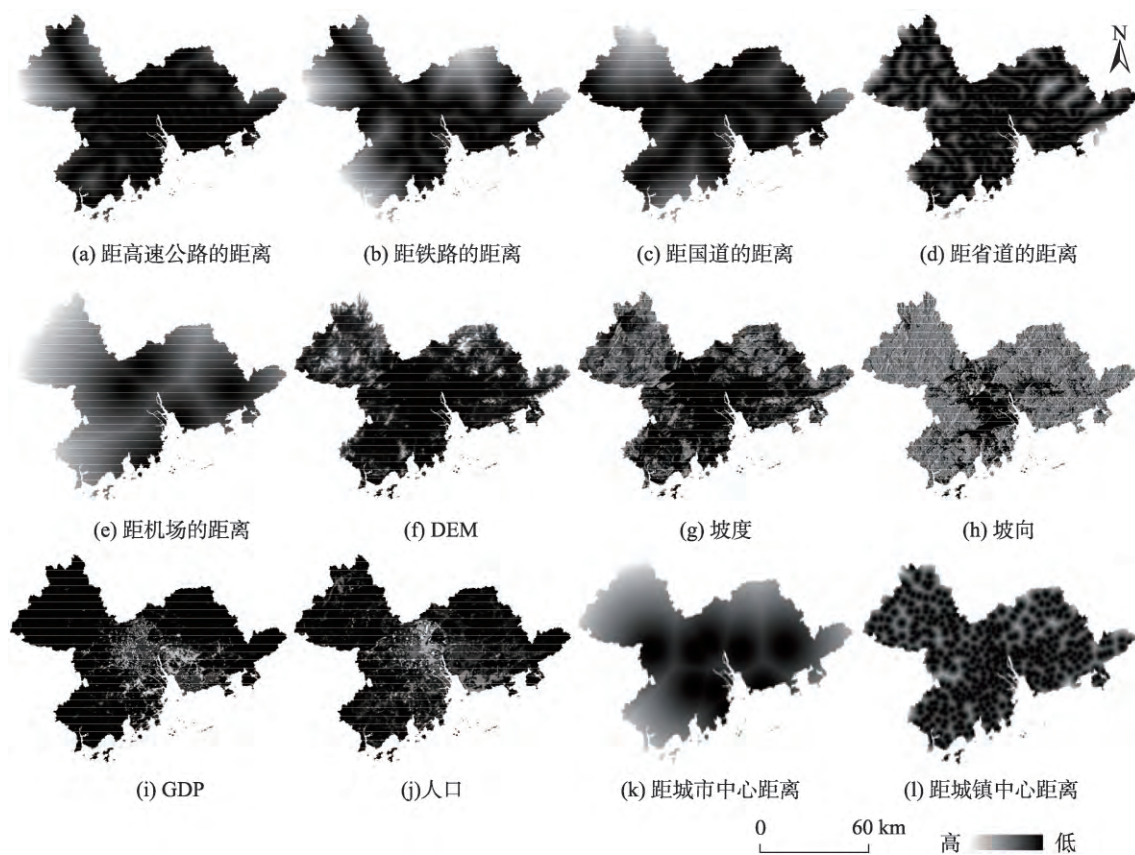


图5 珠江三角洲区域土地利用模拟空间变量

Fig. 5 Spatial variables of land use simulation in PRD area

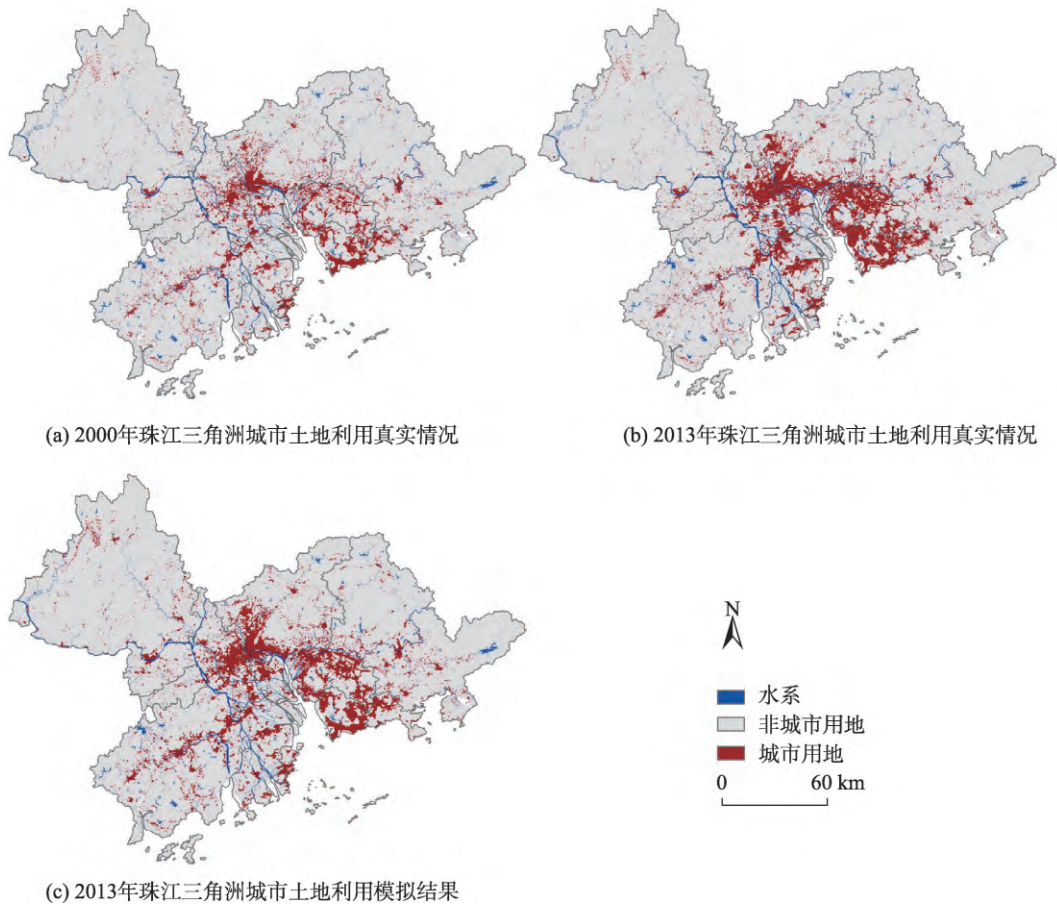


图6 珠江三角洲2000–2013年城市用地动态模拟及实际情况对比

Fig. 6 Comparisons of actual and simulated land use in PRD region from 2000 to 2013

发展趋势和城市扩张的强度与方向。本文在对城市未来发展的模拟中加入了相关规划约束条件,并规定模型在这些限制区域内,禁止非城市用地向城市用地的转变,使得模拟结果在规划约束的条件下发展。本文基于基准条件、耕地保护条件与生态控制条件建立了3种城市用地发展情景。

3.3.1 基准情景

在基准情景条件下,将不考虑人为的城市的规划控制、保护等因素,仅在原始自然条件下进行城市发展的模拟,此为无限制条件下城市发展的情景。因珠江三角洲地区目前没有制定长期的城市总体规划,而基准情景能够提供在没有政策干预前提下未来城市的无约束发展形态,从而能够为政府做出相关城市发展约束政策提供了参考。利用SD模型预测该情景下的2050年城市用地规模为11 540.09 km²,模拟结果如图7所示。

3.3.2 耕地保护情景

当前耕地数量与质量的维护对农业可持续发

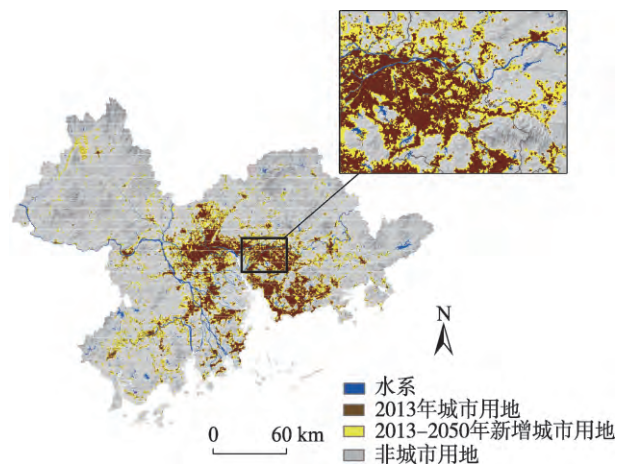


图7 基准情景珠江三角洲2050城市用地发展预测

Fig. 7 Prediction of urban land use in 2050 at PRD region in baseline scenario

展至关重要,因而耕地保护情境下则基于基准条件下考虑城市的耕地保护政策与规划等。耕地保护情景将严格控制耕地转为非耕地,即在耕地区域禁

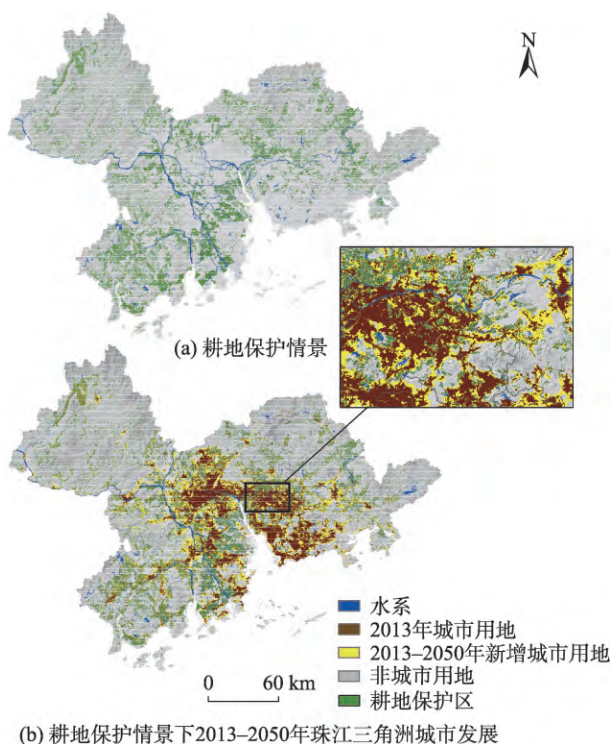


图8 耕地保护情景及珠江三角洲2050城市用地发展预测
Fig. 8 Prediction of urban land use in 2050 at PRD region in farmland protection scenario

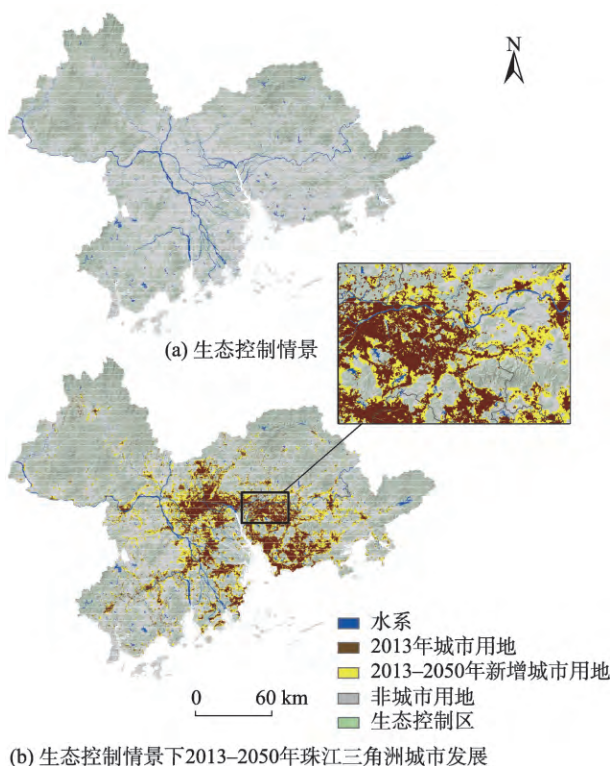


图9 生态控制情景及珠江三角洲2050城市用地发展预测
Fig. 9 Prediction of urban land use in 2050 at PRD region in ecological control scenario

止城市的发展,以防止城市化进程中耕作用地被侵占,从而控制耕地的快速流失,并为政府在优先保护耕地前提下进行未来城市发展规划提供了参照。在耕地保护情景下(图8(a)),利用SD模型预测珠江三角洲区域在2050年城市用地规模为11 498.83 km²,城市发展的模拟预测如图8(b)所示。

3.3.3 生态控制情景

生态控制情景与耕地保护情景类似,其基于基准条件下考虑生态控制区的保护。生态控制区能够在尊重城市自然生态系统和合理环境承载力的前提下,维护生态系统的科学性、完整性和连续性,防止城市无序蔓延。因而在生态控制情景下,将禁止生态控制区内发展为城市,该情景能够协调城市发展与生态格局间的共同发展,从而提升生态质量并实现城市的可持续发展。在生态控制情景下(图9(a)),利用SD模型预测珠江三角洲区域在2050年城市用地规模为11 509.42 km²,城市发展的模拟预测如图9(b)所示。

3.4 多情景下UGBs的划定

UGBs是依据城市未来用地发展形态进行划定,本文以FLUS模型预测得到的珠江三角洲城市未来用地发展为基础,利用了上述形态学基于膨胀腐蚀的开闭运算方法,并采用C++编程实现UGBs划定,并将其耦合成为FLUS系统(<http://www.geosimulation.cn/flus.html>)中的子模块,FLUS的系统及其功能模块如图10所示。

采用4种不同大小的结构元素进行UGBs划定的实验对比,结果如图11所示。本文分别采用大小为3×3、5×5、7×7和9×9的结构元素进行划定,结果显示采用7×7的结构元素进行UGBs的划定能够使

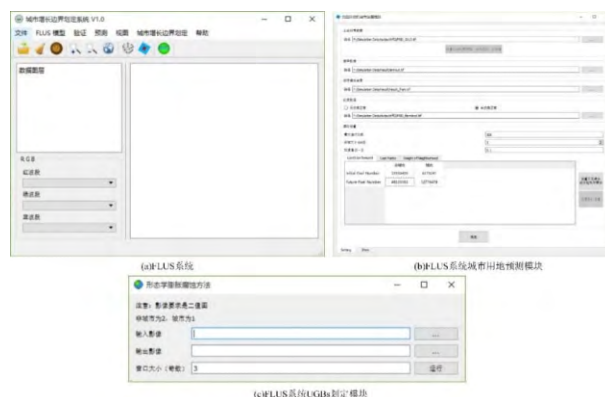


图10 FLUS系统中城市用地模拟及UGBs划定
Fig. 10 Urban land use simulation and UGBs delimitation in FLUS system

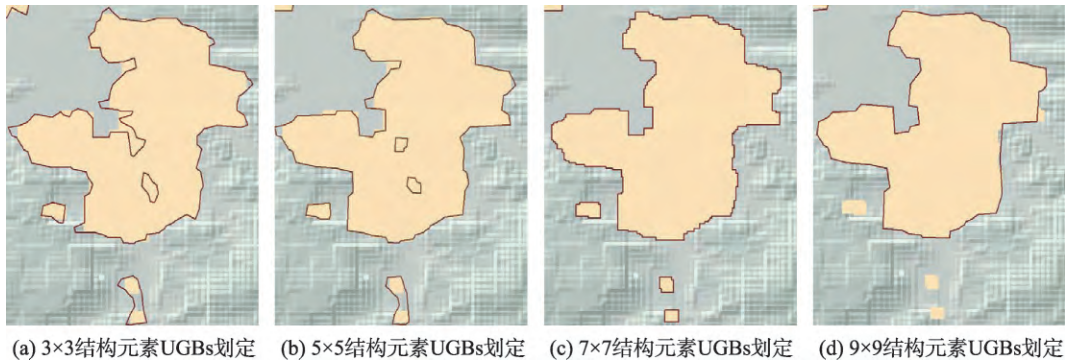


图 11 4种结构元素大小的UGBs划定局部图
Fig. 11 The UGBs from four structural elements in details

边界整体平滑且连续性较强,边界线能较好地贴合城市区域轮廓,同时能够保持珠江三角洲地区城市复杂的边缘形状特征。

根据上述结果,即采用7×7的结构元素对珠江三角洲地区进行UGBs的划定,图12分别为在基准情景下(图12(a))、耕地保护情景下(图12(b))和生态控制情景下(图12(c))的UGBs划定结果。从图示中显示该方法在复杂的城市区域也能较好地保持边界的边缘细节,在城市破碎度与分维度较高的区域也能够提取出边界的形态特征。其通过形态学的膨胀腐蚀方法从而删除小而分散的紧凑性较差的城市单元,因而有效地增强了城市连片区域的集中性与整体性。

4 结论与讨论

城市增长边界在促进城市可持续发展、保护城市外部空间和生态自然环境等方面有重要作用,而科学的UGBs划定方法是当前研究的热点问题^[12-3]。本文构建了FLUS-UGB模型,其框架包括基于“自顶向下”的系统动力学模型与“自底向上”的元胞自动机模型耦合的未来城市用地模拟FLUS模型,以及基于形态学方法进行边界划定的UGB模型,从而用于多情景下未来城市发展的动态模拟及科学且高效地实现UGBs的划定以作为城市未来发展规划的参考。

本研究同时将模型应用于广东省珠江三角洲区域,考虑多类空间驱动因子,采用了珠江三角洲地区2000–2013年的城市土地利用数据,通过验证得出FLUS模型具有较高的模拟精度,其中计算得到Kappa值为0.715,总体精度为94.539%,Fom值

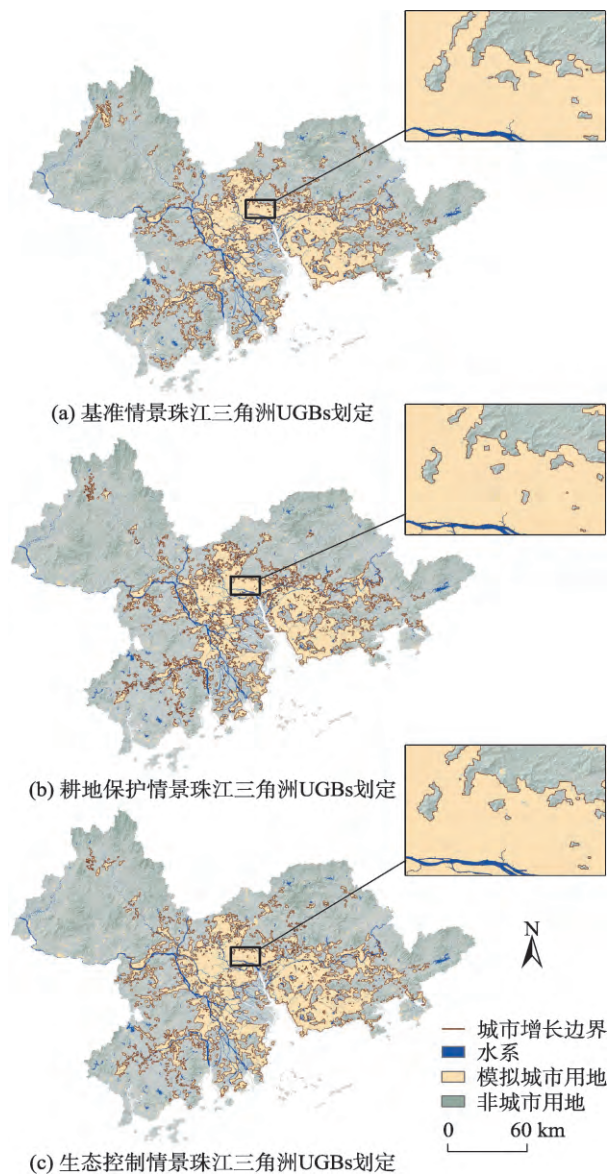


图 12 3种情景下珠江三角洲2050年UGBs划定图
Fig. 12 The UGBs of PRD region under three planning scenarios in 2050

为0.269。而后基于FLUS模型进行未来城市用地发展模拟,并考虑了3种约束城市发展的条件:基准、耕地保护与生态控制情景,得到2050年珠江三角洲区域的城市发展结果。

针对于UGBs的划定,本文利用FLUS模拟得到2050年珠江三角洲区域的城市模拟结果作为输入,通过基于形态学膨胀腐蚀方法的开运算与闭运算从而实现UGBs划定。结果显示,基于FLUS-UGB模型的城市开发边界划定能够较好地保持复杂城市区域的边缘形状特征,并且综合考虑了城市发展所受到的相关自然、政策条件制约以及城市未来的空间结构,因而能够真实地表达城市发展形态及其边界的分布。FLUS-UGB模型相较于传统的UGBs划定方法剔除了主观因素的划定影响,同时其能有效降低UGBs划定的时间成本,以缩短UGBs制定的周期,从而促使快速城市化进程中复杂多变的城市UGBs能够及时得到修订与完善。

FLUS-UGB模型能够科学地进行多情景下城市未来用地发展模拟及UGBs的划定,并有效地解决复杂城市群的边界划定的问题。该方法可以为今后中国UGBs的制定提供技术参考,并将其应用于城市未来规划与管控中。然而,本文的研究仅考虑了3种城市约束情景条件,今后可对多重城市约束情景下的UGBs划定进行研究,同时可以考虑将该模型应用于多个城市区域,从而验证模型的普遍适用性。

参考文献(References):

- [1] Wei Y D, Ye X. Urbanization, urban land expansion and environmental change in China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014,28(4):757-765.
- [2] 王婧,方创琳.城市建设用地增长研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2011,30(11):1440-1448. [Wang J, Fang C L [J]. Growth of urban construction land: progress and prospect[J]. *Progress in Geography*, 2011,30(11):1440-1448.]
- [3] Long Y, Han H, Lai S K, et al. Urban growth boundaries of the Beijing metropolitan area: Comparison of simulation and artwork[J]. *Cities*, 2013,31(2):337-348.
- [4] Han H Y, Lai S K, Dang A R, et al. Effectiveness of urban construction boundaries in Beijing: An assessment[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2009,10(9):1285-1295.
- [5] Pendall R, Martin J, Fulton W. Holding the line: Urban containment in the United States[R]. Washington D C: The Brookings Institution Center on Urban and Metropolitan Policy, 2002.
- [6] 龙瀛,韩昊英,毛其智.利用约束性CA制定城市增长边界[J]. *地理学报*, 2009,64(8):999-1008. [Long Y, Han H Y, Mao Q Z. Establishing urban growth boundaries using constrained CA[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(8): 999-1008.]
- [7] Ma S, Li X, Cai Y. Delimiting the urban growth boundaries with a modified ant colony optimization model[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2017,62:146-155.
- [8] Hepinstall- Cymerman J, Coe S, Hutyrá L R. Urban growth patterns and growth management boundaries in the Central Puget Sound, Washington, 1986-2007[J]. *Urban Ecosystems*, 2013,16(1):109-129.
- [9] Tayyebi A, Perry P C, Tayyebi A H. Predicting the expansion of an urban boundary using spatial logistic regression and hybrid raster - vector routines with remote sensing and GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014,28(4):639-659.
- [10] Ball M, Cigdem M, Taylor E. Urban growth boundaries and their impact on land prices[J]. *Environment & Planning A*, 2014,46(12):3010-3026.
- [11] 周春山,张润朋,金万富,等.基于基础设施综合服务水平导向的城市增长边界划定——以广州市为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2017,33(5):42-49. [Zhou C S, Zhang R P, Jin W F, et al. Urban growth boundary delimitation oriented by comprehensive service level of infrastructure: A case study of Guangzhou[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017,33(5):42-49.]
- [12] 王振波,张蕾,张晓瑞,等.基于资源环境承载力的合肥市增长边界划定[J]. *地理研究*, 2013,32(12):2302-2311. [Wang Z B, Zhang Q, Zhang X R, et al. Urban growth boundary delimitation of Hefei city based on the resources and environment carrying capability[J]. *Geographical Research*, 2013,32(12):2302-2311.]
- [13] Bhatta B. Modelling of urban growth boundary using geoinformatics[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2009,2(4):359-381.
- [14] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1998,12(7):699-714.
- [15] Li X, Yeh A G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2000,14(2):131-152.
- [16] Wu F. Calibration of stochastic cellular automata: The application to rural-urban land conversions[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002,16(8): 795-818.
- [17] Santé I, García A M, Miranda D, et al. Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010,96(2):108-122.
- [18] Tayyebi A, Pijanowski B C, Pekin B. Two rule-based ur-

- ban growth boundary models applied to the Tehran Metropolitan Area, Iran[J]. *Applied Geography*, 2011,31(3):908-918.
- [19] 李咏华.生态视角下的城市增长边界划定方法——以杭州市为例[J]. *城市规划*, 2011,35(12):83-90. [Li Y H. Method of determining urban growth boundary from the view of ecology: A case study of Hangzhou[J]. *City Planning Review*, 2011,35(12):83-90.]
- [20] Li X, Yeh A G. Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems[J]. *Environment & Planning A*, 2001,33(8):1445-1462.
- [21] 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. [Zhang D C, Liu X P, Yao Y, 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.]
- [22] 刘小平,黎夏,叶嘉安,等.利用蚁群智能挖掘地理元胞自动机的转换规则[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2007,37(6):824-834. [Liu X, Li X, Yeh A G, et al. Mining the conversion rules of geographical cellular automata by using ant colony intelligent[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese)*, 2007,37(6):824-834.]
- [23] 马世发,张婷,李少英.多尺度联合驱动的城市增长模拟建模[J]. *地理与地理信息科学*, 2017,33(2):19-24. [Ma S F, Zhang T, Li S Y. A multi-scale synergistic CA model for urban growth simulation[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017,33(2):19-24.]
- [24] 韩昊英,冯科,吴次芳.容纳式城市发展政策:国际视野和经验[J]. *浙江大学学报(人文社会科学版)*, 2009,39(2):162-171. [Han H Y, Feng K, Wu C F. Urban containment policy: A global experience[J]. *Journal of Zhejiang University (Humanities and Social Sciences)*, 2009,39(2):162-171.]
- [25] 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 and Urban Planning*, 2017,168:94-116.
- [26] 戴青云,余英林.数学形态学在图像处理中的应用进展[J]. *控制理论与应用*, 2001,18(4):478-482. [Dai Q Y, Yu Y L. The advances of mathematical morphology in image processing[J]. *Control Theory and Applications*, 2001,18(4):478-482.]
- [27] 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.
- [28] 何春阳,史培军,陈晋,等.基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2005,35(5):464-473. [He C Y, Shi P J, Chen J, et al. Land use scenario simulation based on system dynamics and cellular automaton model[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences (in Chinese)*, 2005,35(5):464-473.]
- [29] 王其藩.系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1995:12-22. [Wang Q F. *System dynamics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995:12-22.]
- [30] Liu X, Ou J, Li X, et al. Combining system dynamics and hybrid particle swarm optimization for land use allocation[J]. *Ecological Modelling*, 2013,257(2):11-24.
- [31] Li L, Simonovic S P. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds[J]. *Hydrological Processes*, 2002,16(13):2645-2666.
- [32] 黎夏,叶嘉安.基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. *地理研究*, 2005,24(1):19-27. [Li X, Yeh A G. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks[J]. *Geographical Research*, 2005,24(1):19-27.]
- [33] 乔纪纲,邹春洋.基于神经网络的元胞自动机与土地利用演化模拟——以广州市白云区为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2012,35(7):29-32. [Qiao J G, Zou C Y. The simulation of cell automaton and land use evolution based on neural network: Taking Baiyun district of Guangzhou as a case study[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012,35(7):29-32.]
- [34] 陈伟强,潘元庆,马月红,等.基于约束性CA模型的城市开发边界划定方法[J]. *农业工程学报*, 2017,33(4):278-284. [Chen W Q, Pan Y Q, Ma Y H, et al. Partition method of urban development boundary based on constrained cellular automata model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(4):278-284.]
- [35] 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.
- [36] 王树文,闫成新,张天序,等.数学形态学在图像处理中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2004,40(32):89-92. [Wang S W, Yan C X, Zhang T X, et al. Application of mathematical morphology in image processing[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004,40(32):89-92.]
- [37] 王颖,顾朝林.基于格网分析法的城市弹性增长边界划定研究——以苏州市为例[J]. *城市规划*, 2017,41(3):25-30. [Wang Y, Gu C L. Grid-based spatial evaluation of establishing urban growth boundary: A case study of Suzhou city[J]. *City Planning Review*, 2017,41(3):25-30.]
- [38] 杨琨,曾立波,王殿成.数学形态学腐蚀膨胀运算的快速算法[J]. *计算机工程与应用*, 2005,41(34):54-56. [Yang K, Zeng L B, Wang D C. A fast arithmetic for the erosion and dilation operations of mathematical morphology[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005,41(34):54-56.]
- [39] 游珍,王露,封志明,等.珠三角地区人口分布时空格局及其变化特征[J]. *热带地理*, 2013,33(2):156-163. [You Z, Wang L, Feng Z M, et al. Spatio-temporal pattern and variation characteristics of population distribution at county level in the Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 2013,33(2):156-163.]