
基于城市空间增长模拟的城镇规模体系预测

——以常州市为例^{*1}

黄金川^{1, 2, 3} 林浩曦^{*1, 2, 3} 漆潇潇^{1, 2} 陈云谦⁴

(1. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 中国北京 100101;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国北京 100101;

3. 中国科学院大学, 中国北京 100049;

4. 北京大学城市与环境学院, 中国北京 100871)

【摘要】: 应用地理空间模型定量推演城市空间增长, 进一步探索市域城镇等级体系结构和空间功能分区, 提高建设用地演化模拟的应用导向性, 是当前城市模拟研究的重点和难点。以常州市为对象, 以约束性元胞自动机模型为基础, 集成邻域思想、约束条件、空间聚类、Logistic 回归、演化迭代等要点, 构建城镇建设用地空间扩展的模拟预测模型和计算实验系统, 探索基于城镇建设用地模拟的城镇规模体系情景分析方法。利用五期遥感影像解译数据为信息源, 运用 GIS 空间分析方法进行建设用地适宜性评价; 剖析城镇建设用地拓展的微观机制和地域演变模式, 并通过引入城市规划和土地利用规划等规划因子, 采用用地转换规则差异代替驱动因子差异来优化空间聚类算法, 模拟和预测城镇建设用地总量和空间布局; 在此基础上论证城乡建设用地增减挂钩政策的适用性, 并基于人地挂钩机制预测各级城镇人口规模, 为常州市相关空间规划和政策制定提供依据。

【关键词】: 城镇体系; 功能分区; 约束性元胞自动机; 空间演化模拟; 常州

【中图分类号】: F124 **【文献标志码】**: A **【文章编号】**: 1000 - 8462 (2017) 10 - 0049 - 10

DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2017.10.007

¹ 收稿时间: 2017 - 03 - 05; 修回时间: 2017 - 06 - 27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41690145)

作者简介: 黄金川 (1973—), 男, 河南开封人, 副研究员, 硕士生导师。主要研究方向为城市地理与区域规划。E-mail: huangjc@igsnrr.ac.cn。

***通讯作者**: 林浩曦 (1990—), 男, 广东中山人, 博士研究生。主要研究方向为城市地理与区域规划。E-mail: linhx.14b@igsnrr.ac.cn

随着计算模型与地理空间分析的深度结合，加之大范围高分辨率遥感数据的广泛应用，地理空间模型在定量推演城市空间发展中得到广泛应用^[1-2]，并在探讨用地演变的空间转换规则、模拟长时间跨度的城市扩张历程等方面有着独特优势。尽管如此，现有研究多以模型技术为主，对各类空间规划编制的辅助性与应用导向性较弱^[3]。城镇建设用地空间演化模拟亟需与城镇体系结构、空间功能分区等城市空间规划需要的内容挂钩，才能在城乡空间发展辅助规划上实现突破。

中国城市增长兼具“自上而下”的政府宏观层面控制发展特征和“自下而上”的市场微观层面自发增长特征^[4]，因此本文在宏观层面根据社会经济条件确定城镇建设用地增量，微观层面采用约束性元胞自动机模型（Cellular automata, CA）对其进行空间分配，即在传统 CA 模型的基础上加入自然、交通、规划、社会经济等动力或阻力条件，并通过 Logistic 回归来定量刻画这些因素对城市空间演化的影响，然后通过转换规则函数计算每个元胞的城镇化概率，对新增城镇建设用地进行空间分配，实现从微观角度模拟并预测复杂系统的发展演化^[5]。具体而言，本文以常州市为对象，以约束性 CA 模型为基础，集成邻域思想、约束条件、空间聚类、Logistic 回归、演化迭代等要点^[6-7]，定量刻画自然、交通、规划、社会经济等要素对城市空间演化的影响，综合运用基于层次分析法与有序加权回归法结合的用地适宜性评价模型、K-Means 空间聚类分区模型、基于线性回归的宏观预测模型和基于约束性 CA 的微观分配模型，构建常州市空间演化多情景模拟预测与分析模型，对常州空间发展进行虚拟计算实验，以探索城市地域空间演化机制、研判城市用地空间增长的演化趋势^[8]，基于此实现对 2030 年常州市域城镇建设用地扩展和城镇体系结构的多情景模拟预测，为相关空间规划和政策制定提供依据。

1 数据来源和功能分区

本文采用的数据主要有遥感影像解译的常州市土地利用数据、自然地理环境要素数据、交通系统现状和规划数据、《常州市城市总体规划（2011—2020）》和《常州市土地利用总体规划（2006—2020）》等上位规划中的相关图件以及相关统计年鉴和普查中的社会经济统计数据。

1.1 遥感信息提取

本文在收集季相一致、质量较好、少云无云、完全覆盖常州市域的六期遥感影像数据（1990—2015 年）的基础上，使用遥感图像处理软件 PCI Geomatica 9.0 和 ERDAS 对遥感影像进行空间配准、几何纠正、图像增强、裁剪拼接等预处理，继而采用面向对象分类的软件 eCognition 完成土地利用变化信息提取，包括耕地、林地、草地、未利用地、河渠、湖泊、建设用地、农村居民点和其他建设用地共九类用地，并根据数字高程模型、行政区划和百度地图等辅助资料对解译结果予以校正。解译结果显示，常州市 2015 年建设用地面积为 1 054.6 km²，开发强度达到 24.1%，比 1990 年提高了 16.6 个百分点，已接近 28% 的市域尺度国土开发强度警戒线。其中，城镇建设用地面积从 121.9 km² 猛增至 666.0 km²，农村居民点（含其他建设用地）面积呈现“先升后降”的发展态势，耕地面积则从 3 203.3 km² 降至 2 447.3 km²，城镇人均建设用地面积约 183.4 m²，远远高于国家城乡规划用地标准的要求，且城镇建设用地增速一直高于城镇人口增速，人地矛盾日益突出。常州市城镇开发建设受铁路、公路及水系等区域交通设施影响较大，用地扩展总体呈集中趋势，主要沿既有建成区外围进行外溢—回填式扩张，但局部地区如市区的嘉泽镇、湟里镇和金坛区、溧阳市的大部分乡镇建设集约度较弱。根据土地利用转移矩阵对各期土地利用类型转换的分析可知，1990—2005 年间 95% 以上的新增城镇建设用地都源自耕地，明显高于全国 145 个城市同期平均水平 70%。但是，自从 2006 年城乡建设用地增减挂钩政策试点工作实施以来，新增城镇建设用地的来源结构发生重大变化，耕地占比下降至 65%，农村居民点占比则上升到 32%（图 1）。

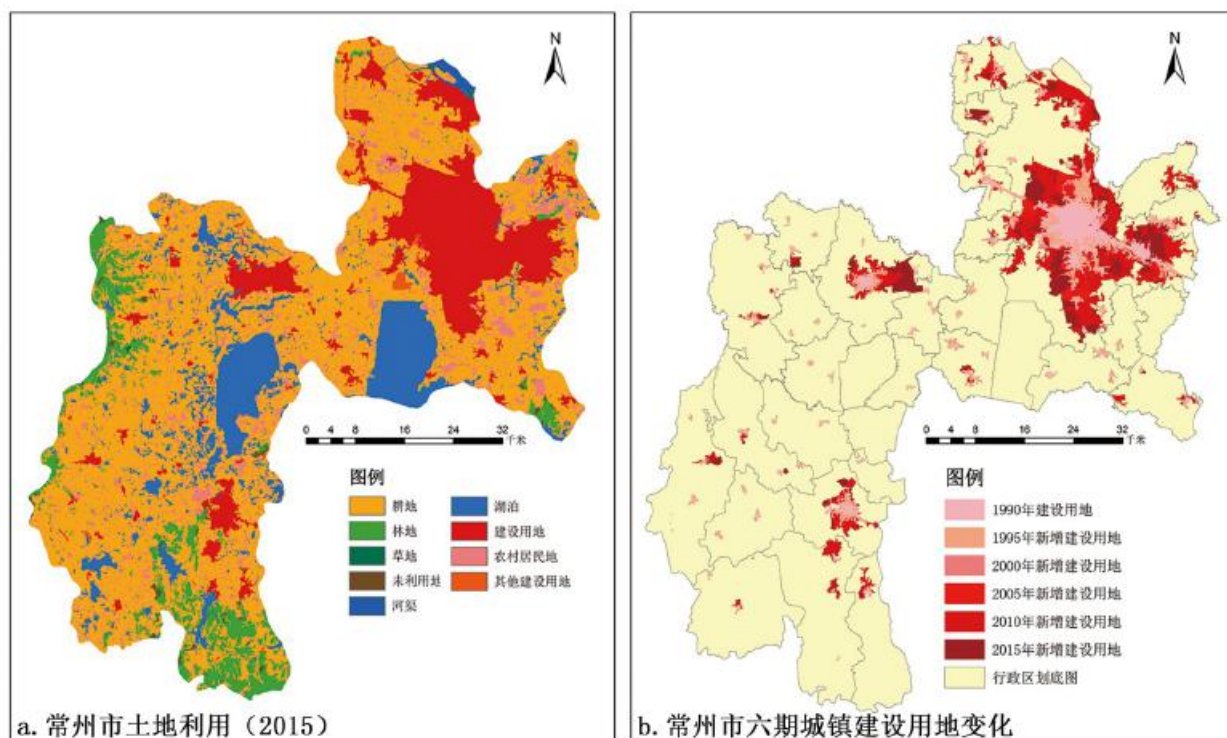


图1 常州市土地利用图(遥感影像解译)
Fig.1 The land-use map of Changzhou (by remote sensing interpretation)

1.2 城市演化因素

城镇人口对空间的需求是城市扩张的原初动力和直接诱因,其增加必然导致城市居民对住房、交通和公共设施等需求加强^[9]。据本文测算,1990—2015年常州市城镇人口(X)与城镇建设用地面积(Y)的相关系数(R^2)高达0.93,呈高度的线性相关,线性回归方程为: $Y = 2.0926X - 70.037$ 。因此,城镇人口是城镇建设用地扩张的关键驱动因子,也是衡量城市土地扩张的重要指标。

从宏观动力看,经济发展和人口增长是城镇建设用地扩张的主要动因;从微观视角看,人口增长需要生活空间,经济发展需要生产空间,并由此衍生交通流空间和生态空间的支撑需要。宏观经济要素映射到土地利用、职住空间结构上,再辅以交通导向和生态环境约束,形成了多要素间的相互反馈作用关系,共同塑造着城市的结构与形态^[10]。据此,本文将影响城市开发建设的因素分为全局变量、邻域变量和政策变量^[11](表1)。其中,全局变量可细分为自然地理、社会经济、交通和规划要素;邻域变量是对具体地块及其邻域范围内开发强度的测算;政策变量以市域功能分区为总体框架,对城镇开发实施引导和约束作用。统一所有数据的投影坐标系并进行配准,使数据信息的空间位置和分辨率保持一致。

表1 约束性CA模型变量

类型	一级指标	二级指标	因子	数据来源
自然地理要素	地形因子		坡度	常州市数字高程模型
			高坡	

		水系因子	与河流湖泊距离	常州市水系分布图
		建设因子	与城镇建设用地距离	与农村居民点
	社会经济要素		距离	常州市遥感影像图
		人口因子	人口总数、人口密度	第六次全国人口普查
全局变量			与国道、省道、县道、乡镇道路等距离	
			与火车站距离	
	交通要素	交通线路因子	与高速公路出入口距离	百度地图与《常州市城市总体规划（2011—2020）》图集
			与港口、码头距离	与机场距离
			与汽车客运站距离	
		开发区因子	与开发区距离	常州市开发区分布图
	规划要素			
		土地利用规划约束因子	土地规划管控区	常州市土地利用总体规划
邻域变量	邻域要素	邻域因子	邻域内的开发强度	常州市土地利用遥感影像解译图
政策变量	限制性要素	限制性因子	市域功能分区评价	常州市市域功能分区图

为便于运算，通过 ArcMap 软件的距离分析与缓冲区分析将矢量数据进行栅格化处理，将与矢量要素距离的信息赋予至每个栅格，辅助刻画栅格城镇化的概率，栅格大小设为 500 m。

1.3 市域功能分区

市域功能分区是影响城市空间演化的重要政策变量。为科学指导常州市用地结构调整，确定土地的最适宜用途，解决建设用地增加与耕地减少、生态平衡等矛盾，需要在市域自然条件的基础上进行用地建设适宜性评价，勾勒出生产、生活、生态的“三生”空间基本框架^[12]。首先，以遥感影像解译识别的地类为基础，利用层次分析法和有序加权回归法结合生成的权重对生态本底条件、城市扩展阻力、交通路网动力、地质灾害约束等多因素进行加权叠加分析，进行用地建设适宜性评价，得出建设开发适宜性分区（图 2a）^[13]。其次，根据用地建设适宜性评价结果，结合常州市生态红线规划、主体功能区规划、生态敏感区规划和城市总体规划等相关空间规划，采用图层叠加的方法形成市域功能分区（图 2b），即将适宜建设区以外的空间进一步划分为林地生态空间、水域生态空间、一般耕地空间和基本农田空间。再次，基于乡镇街道的行政区划单元，从生态保护责任承担、城镇建设用地增量占比和现状开发强度等三个维度，将常州市细分为城镇优化提升区、城镇重点拓展区、城镇适度发展区、

现代农业发展区、林地生态保护区和水域生态保护区等六个空间政策分区，明确每个乡镇街道所属的空间功能分区（图 2c）。

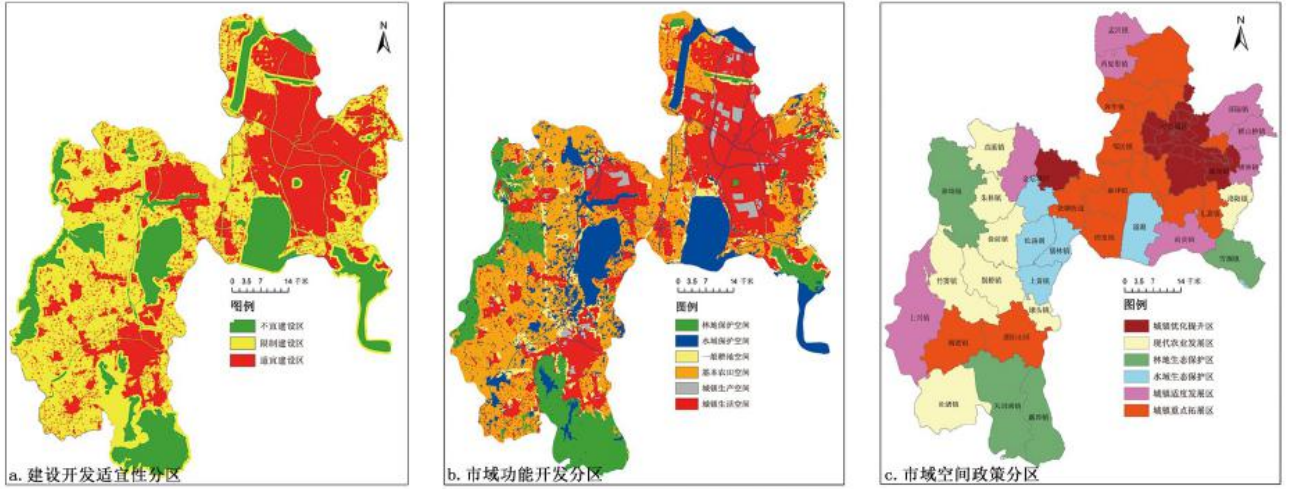


图2 空间功能分区
Fig.2 The functional regionalization

2 城市增长模型和方法

城市空间增长模型主要由转换规则函数、空间聚类分析、Logistic 回归和迭代算法共同构成。

2.1 转换规则函数

传统的 CA 模型只考虑邻域影响，但在城镇建设用地扩张中，元胞的动态演化十分复杂，除受局部个体间的相互影响，还受各种尺度下不同因素的作用。因此，采用多准则判断方法(Multi-criteria evaluation)，建立综合的多层次规则，才能有效模拟地理实体的演化过程^[14]。具体而言，微观分配模型采用基于 Logistic 回归的约束性 CA 模型进行构建，综合考虑全局变量、邻域变量、政策变量和随机因子后形成如下转换规则函数^[15]：

$$P_i = K \times P_{proximity}(i) \times P_{neigh}(i) \times P_{restric}(i) \times P_{rand}(i) \quad (1)$$

式中： P_i 为 i 元胞的城镇化概率； K 为常数。各变量的计算公式如下：

$P_{proximity}$ 表示基于全局变量的元胞城镇化概率， $Z_{i,j}$ 为基于 Logistic 回归的元胞得分， $b_1 \sim b_n$ 为 Logistic 回归的权重参数， $x_1 \sim x_n$ 为某元胞对应的全局变量数值，计算公式如下：

$$P_{proximity} = \frac{1}{1 + e^{-Z_{i,j}}} \quad (2)$$

$$Z_{i,j} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_n x_n \quad (3)$$

P_{neigh} 表示基于邻域变量的元胞城镇化概率, $U_{r_{ij}}$ 为邻域城镇化元胞数, $U_{t_{ij}}$ 为邻域元胞总数, 计算公式如下:

$$P_{neigh} = \sum U_{r_{ij}} / \sum U_{t_{ij}} \quad (4)$$

$P_{restric}$ 表示基于政策变量的元胞城镇化概率, $con()$ 为条件函数, 取值区间为 $[0, 1]$, 位于城镇发展空间取值为 1, 位于农业生产空间或者生态保护空间取值为 0, 计算公式如下:

$$P_{restric} = con(\text{功能分区}) \quad (5)$$

P_{rand} 表示随机因素。 γ 为 $(0, 1)$ 的随机数, 随机因子 σ 在 $[1, 10]$ 间取整数, 其作用是调节随机参数对元胞城镇化概率的影响, σ 越大则随机因素的影响越大, 本文将 σ 设为 1。计算公式如下:

$$P_{rand} = 1 + (-\ln \gamma)^\sigma \quad (6)$$

2.2 空间聚类分析

由于常州市面积大、各地区发展不平衡、城乡差异较大、城镇化驱动机理不一, 因此不同地区的历史增长经验和法则也不甚一致, 若简单地在全域范围内构建统一的转换规则对城镇建设用地扩张进行模拟, 势必捉襟见肘。因此本文选用 K-Means 聚类分区算法^[16], 以乡镇街道为基本单元, 以用地转换规则的差异代替驱动力因子体系的差异来改进传统的空间聚类分区算法, 采用每个乡镇街道内的新增城镇建设用地与各微观分配因子之间的偏相关系数对乡镇街道进行空间聚类分区, 最终把转换规则相似的单元归为一类(图 3)。结果显示, 分区 1 城镇扩张的关键因子是交通路网与规划政策; 分区 2 城镇扩张的关键因子是交通与既有城镇用地; 分区 3 城镇扩张的关键因子是人口和交通站点等。据此, 在微观分配模拟中, 通过每个分区特有的转换规则进行模拟预测, 以体现常州市用地转换规则的空间差异, 提高模型的精度与准确性。

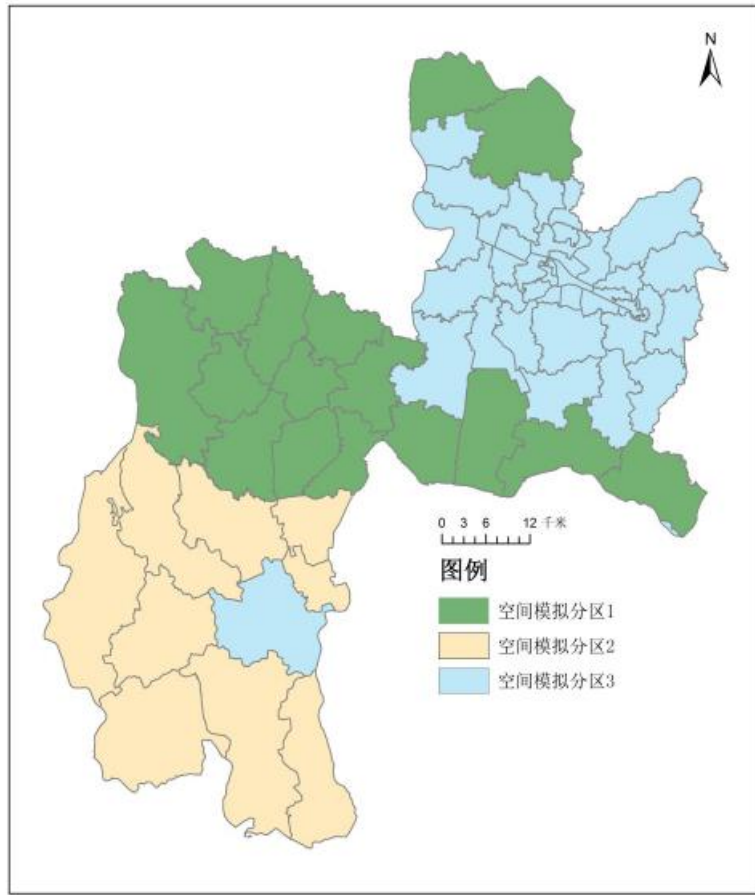


图3 空间聚类分区
Fig.3 The spatial clustering regionalization

2.3 Logistic 回归

多变量 Logistic 回归是基于经济学原理的一种离散选择模型，是解决（0，1）二值响应变量回归问题的有效方法，它的误差项服从二项分布而非正态分布，因此在拟合时采用最大似然估计法进行参数估计^[17]。以元胞状态变化作为因变量（0，1），以全局变量中的自然地理、社会经济、交通和规划要素为自变量^[18]，导入 SPSS 中采用 Logistic 回归计算各影响因子的权重系数^[19]，以获取各影响因子对城镇空间扩展的作用机制。

分区 1 的转换规则为：

$$P_{proximity} = -3.979 \times P_{土规因子} - 1.01 \times P_{火车站} + 0.41 \times P_{水系距离} - 4.01 \times P_{建设用地距离} + 13.45 \quad (7)$$

分区 2 的转换规则为：

$$P_{proximity} = -1.171 \times P_{土规因子} + 0.43 \times P_{户籍人口} - 2.03 \times P_{建设用地} - 2.01 \times P_{其他类型道路} - 0.289 \times P_{省道} - 2.738 \quad (8)$$

分区 3 的转换规则为：

$$P_{proximity} = -1.386 \times P_{土规因子} - 2.04 \times P_{建设用地} - 2.02 \times P_{乡村道路} - 0.145 \times P_{地形坡度} - 2.679 \quad (9)$$

总体来看，规划因素对城镇扩张的影响最大，而土地利用规划的约束作用尤其明显，其对金坛的约束作用最大、溧阳次之、市区最末。此外，与建设用地的距离也对城镇扩张产生较大影响，且呈负相关，表明大多数新增城镇建设用地都是以围绕建成区进行外延或回填扩张为主、飞地式扩张为辅。路网因子是影响常州城镇扩张的第三类因素，尤其与乡镇道路、省道及其他低等级道路关系密切，但铁路对市区城镇建设用地演变的显著影响期已过去，而溧阳的铁路由于通车较晚，铁路因子的贡献还未充分显现。

2.4 迭代运算

迭代是重复反馈过程的活动，每一次对过程的重复称为一次“迭代”，其目的是逼近所需目标或结果。就城镇建设用地空间演化模拟而言，结合交通与规划要素等作用，可能在原有城镇建设用地之外形成新的增长点，迭代后可能会围绕新的增长点扩张，以模拟真实情况中重大政策、基础设施等因素造成的用地扩张。只有通过多次迭代才能让用地增长的过程更真实、更连续^[20-21]，而不仅是机械地在建成区外围圈层式扩张。具体而言，将到模拟期末增长的用地按研究需要分配到各时间段、各分区，根据每次迭代增加的元胞数来确定城镇化阈值，得分高于城镇化阈值的元胞转化为城镇建设用地，它们会对后续其他元胞的转化概率造成影响，如此每一次迭代的结果会作为下一次迭代的初始值，通过不断调试设置时间步长和空间步长可达到最佳效果。

3 模拟验证与情景分析

3.1 模拟结果验证

由于遥感解译、数据转换和空间校正等造成的数据误差，加上普适性的数学模型无法涵盖研究区域全部的转换规则、部分用地演变未能用现有驱动力体系解释等因素，致使模拟结果不可能与实际情况完全吻合，将模拟结果与实际土地利用图进行像元矩阵比较是检验城市增长模型效果的有效方法^[22]。统计发现，2010—2015 年，常州市新增城镇化元胞为 148 008 个，而模拟错误的数量为 34 485 个，包括实际发生转化而现实未发生转化和实际未发生转化而现实发生转化两种情况，总体模拟准确率为 76.7%（图 4）。与国内外相关研究比较，该精度比较理想，从支撑应用的角度看也能很好地预测常州市城市发展的总体走向，具有较好的预测能力。

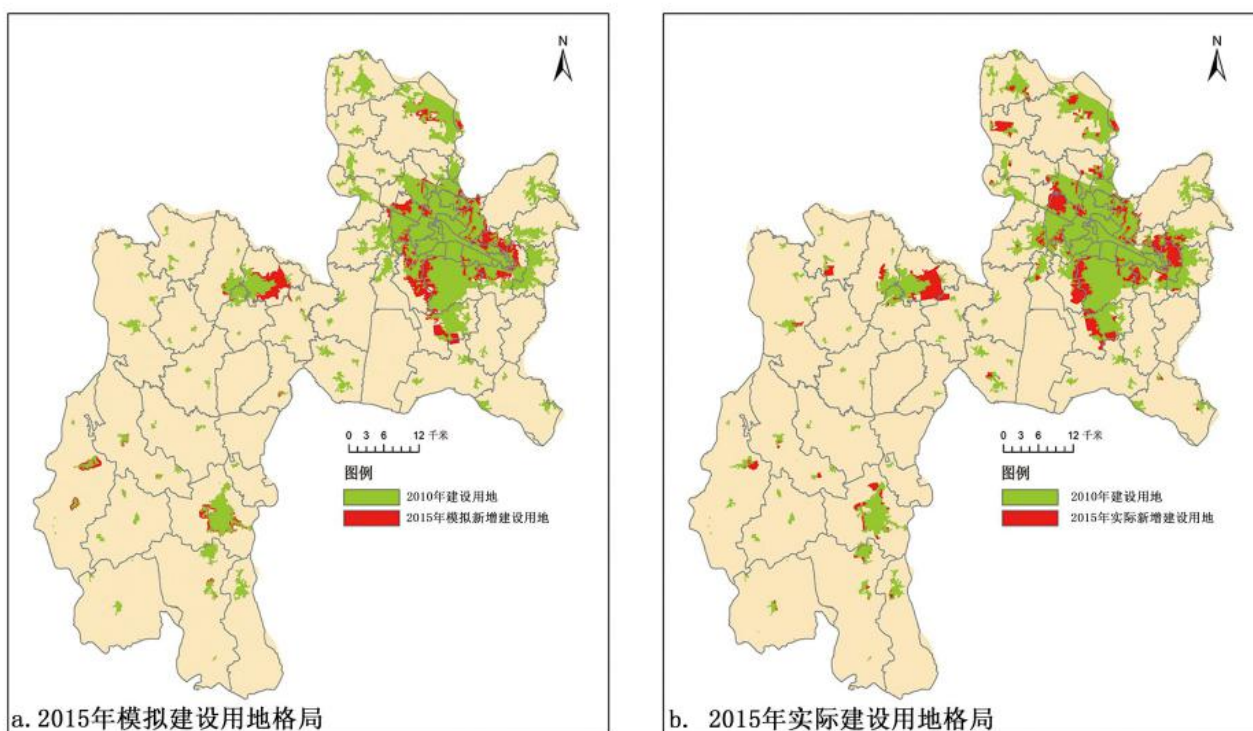


图4 城镇建设用地模拟与实际对比(2015)

Fig.4 The comparison of simulated and actual urban construction land(2015)

此外，为验证本文对空间聚类分区算法改进的有效性，本文基于改进后的空间聚类分区、一般的空间聚类分区和不分区均进行2015年城镇建设用地格局的检验性模拟。结果显示，基于改进后空间聚类分区的拟合精度比一般的空间聚类分区和不分区的拟合精度分别高出1.7和12.8个百分点，说明以用地转换规则差异代替驱动力因子体系差异的改进是行之有效的。

3.2 多情景模拟分析

以2015年城镇建设用地布局为基础，主要从人口增长和交通路网两大角度设定情景，对2030年常州市城镇建设用地的发展态势进行模拟预测^[23]。人口增长情景是对宏观社会经济发展政策的模拟，通过改变城镇人口增长情况来影响城镇建设用地增量，并从城乡建设用地增减挂钩的角度对未来新增城镇建设用地的可行性进行论证；交通路网情景是以基准人口情景为基础，将规划路网（含铁路和高速公路）纳入考虑，对比不同交通建设方案下常州城镇建设用地布局的差异。

不同情景下城镇建设用地扩张的态势差异明显。在高人口情景下，连绵建成区所在地开发建设条件和发展基础较好，对周围的辐射带动作用强，城市扩张较明显，存在“马太效应”；在低人口情景下，城市扩张量与其原有规模的相关性较低，表现为一定的去中心化效应；在中人口情景下，按照城市的自有规律进行扩张，外延式、蔓延式、填充式等扩张模式均有发生。对比人口增长情景下城镇建设用地的集中式、圈层式扩张，交通路网情景下城镇建设用地的扩张明显与交通布局的关系密切，多沿城际铁路和高速公路等重要对外交通设施分布（图5）。

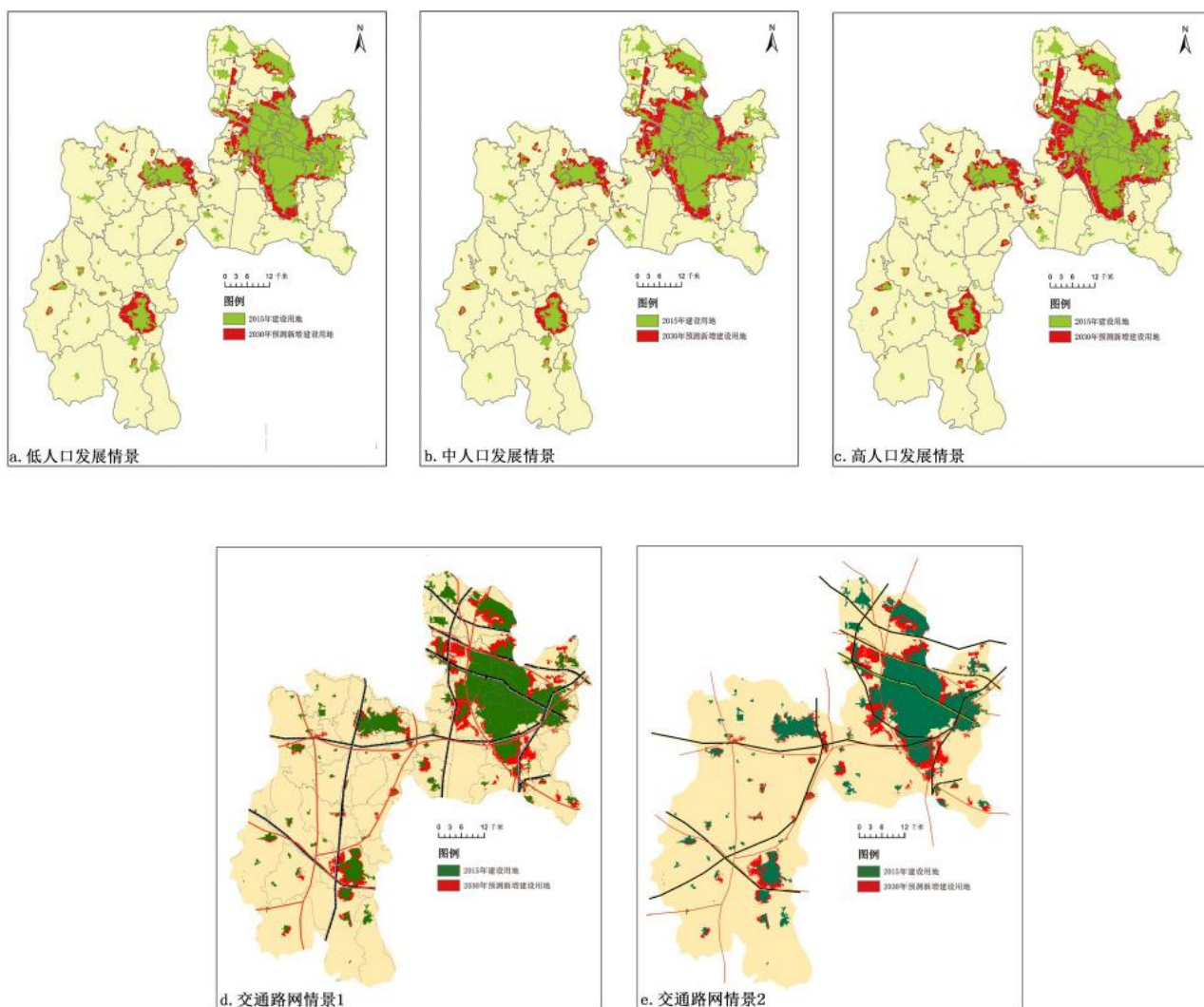


图5 多情景城镇建设用地布局模拟

Fig.5 The multi-scenario simulated layout of urban construction land

4 城镇规模体系预测

新型城镇化背景下，人口与土地挂钩不仅成为健康城镇化的主要政策抓手，而且也为市域城镇体系规模结构的预测提供了新视角和新思路。在城市空间增长模拟的基础上，本文尝试论证城乡建设用地增减挂钩政策的适用性，并运用人地挂钩机制预测城镇规模体系，为常州市相关空间规划和政策制定提供依据，是人地挂钩机制下对土地与人口发展的应用性尝试。

4.1 城乡建设用地增减挂钩

长期以来，在我国城镇化进程中，土地的城镇化快于人口的城镇化，不解决人的城镇化，城市发展就会导致盲目扩大城市规模，造成土地被大量占用和浪费。因此，在全面推进新型城镇化过程中，必须使城市发展与人口增长相适应，提高户籍人口城镇化率和城镇化质量，促进城乡基本公共服务均等化，建立进城落户人口与建设用地供应更加紧密的挂钩机制，实现土地城镇化与人口城镇化相协调。严格控制建设用地增量是新型城镇化的基本要求，实施城乡建设用地增减挂钩是新时期推动城镇开发建设的重要政策抓手^[24]。第六次全国人口普查显示，2010年常州市城镇人口为290.1万，农业人口为168.9万。而公安部

门的人口数据显示,2014 年常州市城镇人口上涨至 353.4 万,农业人口则略微下降至 164.0 万。假定在高人口增长情景下,常州市 2030 年总人口为 658.0 万,城镇化率为 78.6%,新增城镇人口为 163.8 万,本地城镇化率为 14.2%;中人口增长情景下新增城镇人口为 137.1 万,本地城镇化率约为 22.2%;低人口增长情景下新增城镇人口为 114.3 万,本地城镇化率约为 32.1%。根据遥感影像解译的土地利用结果,常州市城镇人均建设用地面积为 183.4 m²,农村人均建设用地面积为 220.6 m²。按照通用标准,假定新增部分城镇人均建设用地为 100 m²,在高人口增长情景下,未来新增城镇建设用地需求量为 163.8 km²,但农村建设用地可释放量仅能满足新增城镇建设用地量的 31.3%。同理,中人口增长情景下能满足 49.1%,低人口增长情景下能满足 70.8%。因此,在新增城镇建设用地来源结构趋势转变明显的背景下,城乡建设用地增减挂钩政策能在一定程度上为新增城镇建设用地的结构优化调整提供重要抓手。

4.2 城镇人口规模体系预测

按照《城市规划原理》,城镇体系规划是指一定地域范围内,以区域生产力合理布局和城镇职能分工为依据,确定不同人口规模等级和职能分工的城镇分布和发展规划,还包括提出市域城乡统筹发展战略、实施空间管制约束等内容。考虑到人口是相对综合性的指标,能较为全面地体现各级城镇的发展情况,且囿于篇幅,本文并未对城镇职能分工作和城市发展战略等作过多探讨,所指的市域城镇体系预测狭义地指向城镇人口规模等级结构预测,具体包括市域总人口和各级城镇的人口规模。

不同于传统的人口规模预测方法,本文考虑到未来我国城镇人口增量严格受人地挂钩政策的影响,根据《关于建立城镇建设用地增加规模同吸纳农业转移人口落户数量挂钩机制的实施意见》和现行城乡规划标准,基于城镇人口增长与建设用地指标的关系,可以借助不同情景下城镇建设用地的模拟结果来反推各级城镇人口规模,进而对市域城镇人口规模结构进行预测。值得注意的是,城市增长模型中将影响城市开发建设的因素分为全局变量、邻域变量和政策变量,充分考虑了地形、水系、建设、人口、交通、开发区、土地利用规划、邻域开发、限制开发等因子,因此基于城镇建设用地增量的人口预测实际已经间接地考虑了各种因素的约束和影响。

为直观反映常州市未来城镇规模结构的变化,本文以乡镇街道为基本分析单元,借助不同情景下城镇建设用地的模拟结果来反推各级城镇人口规模,进而对市域城镇规模结构进行预测,为常州市城市总体规划修编提供乡镇街道尺度的发展规模预测支撑。首先,根据 2010 年市域总人口、城镇人口、各级乡镇街道城镇建设用地面积计算 2010 年各乡镇街道的城镇人均建设用地面积。综合考虑城镇容纳空间等因素,根据现状人均城镇建设用地实施差别化的用地标准,如现状人均城镇建设用地不超过 100 m²的城镇,按人均 100 m²安排新增城镇建设用地;现状人均水平在 100~150 m²之间的城镇,按照人均 80 m²安排;现状人均水平超过 150 m²的城镇,按照人均 50 m²安排。然后,结合国家现行的城乡规划标准,进一步核定规划期末各乡镇街道的城镇人均建设用地面积。最后,再结合前文预测的各乡镇街道城镇建设用地面积推算规划期末各乡镇街道的城镇人口规模,并按照小城镇(5 万人以下)、II 型小城市(5~20 万人)、I 型小城市(20~50 万人)、中等城市(50~100 万人)、大城市(100 万人以上)等五个规模等级标准,分析比较常州市各期的城镇规模结构(表 2)。

表 2 常州市各级城镇的人口规模预测

乡镇街道	2010 年/千人	2015 年/千人	2030 年/千人	2015—2010 年		2030—2015 年	
				增量/千人	占比/%	增量/千人	占比/%
中心城区	1 825.70	2 243.80	2 836.70	410.1	55.98	592.92	46.62
溧阳市区	197.7	265.2	416.2	64.51	8.81	151	11.87

金坛城区	172.38	216.94	304.3	44.56	6.08	87.36	6.87
遥观镇	83.94	106.66	155.9	22.72	3.1	49.24	3.87
邹区镇	72.33	90.52	119.5	18.19	2.48	28.98	2.28
礼嘉镇	7.7	24.83	89	17.13	2.34	64.17	5.05
奔牛镇	42.62	55.53	77.2	12.91	1.76	21.67	1.7
孟河镇	59.43	71.67	80.3	12.25	1.67	8.63	0.68
郑陆镇	41.82	54.86	81.9	13.04	1.78	27.04	2.13
横林镇	76.64	80.27	85.2	11.63	1.59	4.93	0.39
前黄镇	22.31	34.99	72.4	12.68	1.73	37.41	2.94
尧塘街道	14.21	23.48	54.6	9.27	1.27	31.12	2.45
横山桥镇	37.52	49.55	78.7	12.03	1.64	29.15	2.29
雪堰镇	35.32	47.29	69.6	11.98	1.63	22.31	1.75
湟里镇	30.91	39.51	54.9	8.59	1.17	15.39	1.21
天目湖镇	28.81	36.35	46.9	7.53	1.03	10.55	0.83
嘉泽镇	15.21	21.33	35.3	6.13	0.84	13.97	1.1
薛埠镇	24.51	30.25	38.7	5.74	0.78	8.45	0.66
西夏墅镇	8.9	14.67	34.3	5.77	0.79	19.63	1.54
上兴镇	13.91	16.71	20.3	2.8	0.38	3.59	0.28
戴埠镇	24.01	24.2	24.9	3.19	0.44	0.7	0.05
直溪镇	12.51	15.92	22.9	3.41	0.47	6.98	0.55
南渡镇	10.1	12.53	16.1	2.42	0.33	3.57	0.28
竹箦镇	12.31	14.9	18.2	2.59	0.35	3.3	0.26
朱林镇	4.6	7.34	17.7	2.73	0.37	10.36	0.81
儒林镇	1.8	3.5	9.4	1.7	0.23	5.9	0.46
指前镇	6.8	8.92	13.2	2.11	0.29	4.28	0.34
社渚镇	6.5	8.47	12.1	1.96	0.27	3.63	0.29
别桥镇	5.3	7.22	11.7	1.92	0.26	4.48	0.35
洛阳镇	1.4	1.49	1.5	0.18	0.02	0.01	0
上黄镇	1.4	1.81	2.8	0.41	0.06	0.99	0.08
埭头镇	2.5	2.53	2.7	0.43	0.06	0.17	0.01
合计	2 901.10	3 633.60	4 904.80	732.61	100.00	1 271.88	100.00

为了与常州市城市总体规划的目标单元一致,预测时将中心城区、金坛市区所辖乡镇街道合并。2015年,常州市域城镇规模结构为缺失中等城市的“1个大城市+2个I型小城市+6个II型小城市+23个小城镇”。其中,中心城区城镇人口为224.4万,溧阳市区为26.52万,金坛城区、遥观镇、横林镇、邹区镇、孟河镇和奔牛镇为II型小城市,其余23个小城镇为人口规模5万人以下的小城镇。在中人口发展情景下,常州市的城镇规模结构为“1个大城市+2个I型小城市+12个II型小城市+17个小城镇”,其中,中心城区城镇人口为283.7万,溧阳市区为41.6万。与2015年相比,溧阳市区仍未迈入中等城市行列,礼嘉镇、前黄镇和尧塘街道等II型小城市的城镇人口增加较快,发育程度大幅提高,而埭头镇、戴埠镇和洛阳镇等发展速度明显滞后于平均水平(图6)。

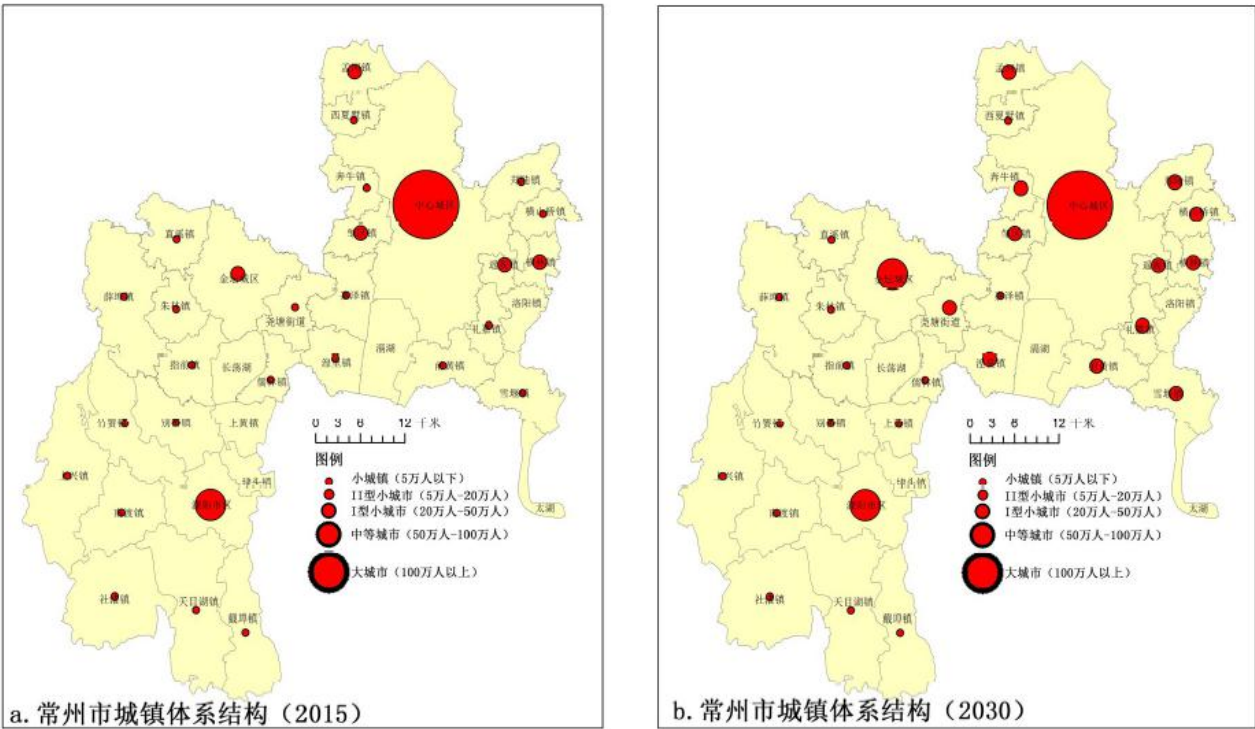


图6 常州市2015年和2030年城镇体系结构比较
Fig.6 The comparison of urban system structure between 2015 and 2030 of Changzhou City

5 结论与讨论

本文主要研究结论如下:①将常州市城市总体规划、土地利用总体规划等规划因子纳入城市空间演化的驱动力体系,反映规划对用地的引导和约束作用,成功模拟出西夏墅镇建设用地区域连片(开发区建设)和金坛西扩(战略发展方向)等政策因素导致的用地扩张;②对全市域进行空间功能分区,包括用地建设适宜性评价、市域功能开发分区,勾勒出生产、生活、生态空间的基本框架,使建设用地扩张强度与相应的政策管控要求相联系;③模型总体模拟精度为76.7%,且以用地转换规则的差异代替驱动力因子体系的差异来改进空间聚类分区算法后,拟合精度比传统空间聚类分区和不分区的拟合精度分别高出1.7个和12.8个百分点,具有较好的预测能力;④基于城乡建设用地增减挂钩原理对城镇建设用地预测总量进行合理性论证,确保在用地增量规划逐渐转向存量规划下预测成果的可用性;⑤利用城镇建设用地空间演化模拟结果反推乡镇街道层级的人口分布格局,实现规划城镇人口的合理分配,进而预测出2030年常州市的城镇规模结构。

应用地理空间模型定量推演城市空间增长,进一步探索市域城镇体系的规模结构,提高了城市建设用地演化模拟的应用价值,但是城市空间扩展受多方面复杂因素的影响,由于数据的有限获得性、政策的难以空间化等客观因素的制约,本文尚未能

将影响城市空间演化的因素全面纳入分析框架。后续研究，应从以下方面逐步深化：一是采用时间成本函数，考虑地表阻力、不同交通方式等造成的时间成本差异，用时间距离代替目前的空间距离；二是引入多智能体模型等算法，将企业、政府、市民等各类主体行为纳入预测框架；三是将经济、生态、土地、交通等影响城市发展的骨干要素分别形成子模型，使得经济联系和就业的影响、人口迁移的影响等纳入模型分析，使多个领域相互联系并形成体系。

参考文献：

- [1] Batty M, Longley P A. The fractal simulation of urban structure [J]. Environment and Planning A, 1986, 18(9): 1 143 - 1 179.
- [2] 刘伦, 龙瀛, 麦克·巴蒂. 城市模型的回顾与展望——访谈麦克·巴蒂之后的新思考 [J]. 城市规划, 2014, 38(8): 63 - 70.
- [3] 刘妙龙, 陈鹏. 基于细胞自动机与多主体系统理论的城市模拟原型模型 [J]. 地理科学, 2006, 26(3): 292 - 298.
- [4] 陈彦光. 中国城市发展的自组织特征与判据——为什么说所有城市都是自组织的 [J]. 城市规划, 2006, 30(8): 24 - 30.
- [5] 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 等. 基于约束性 CA 方法的北京城市形态情景分析 [J]. 地理学报, 2010, 65(6): 643 - 655.
- [6] White R, Engelen G, Uijee I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics [J]. Environment and Planning B, 1997, 24(3): 323 - 343. [7] Ward D P, Murray A T. An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing regions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 7(5): 235 - 250.
- [8] 闫梅, 黄金川. 国内外城市空间扩展研究评析 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(7): 1 039 - 1 050.
- [9] 谈明洪, 李秀彬, 吕昌河. 我国城市用地扩张的驱动力分析 [J]. 经济地理, 2003, 23(5): 635 - 639.
- [10] 高金龙, 陈江龙, 苏曦. 中国城市扩张态势与驱动机理研究学派综述 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(5): 743 - 754.
- [11] 刘翠玲, 龙瀛. 京津冀地区城镇空间扩张模拟与分析 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 217 - 228.
- [12] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析 [J]. 地理学报, 2016, 71(1): 49 - 65.
- [13] 张有坤, 樊杰. 基于生态系统稳定目标下的城市空间增长上限研究——以北京市为例 [J]. 经济地理, 2012, 32(6): 53 - 58.
- [14] 黎夏, 刘小平. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟 [J]. 地理学报, 2007, 62(10): 1 097 - 1 109.

-
- [15] Wu F L. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(8): 795 -818.
- [16] 柯新利, 邓祥征. 内嵌空间聚类算法的分区地理元胞自动机建模与应用 [J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(3): 365 - 371.
- [17] 聂婷, 肖荣波, 王国恩, 等. 基于 Logistic 回归的 CA 模型改进方法——以广州市为例 [J]. 地理研究, 2010, 29(10): 1909 -1919.
- [18] 龙瀛, 毛其智, 沈振江, 等. 综合约束 CA 城市模型: 规划控制约束及城市增长模拟 [J]. 城市规划学刊, 2008(6): 83 - 91.
- [19] Wu F L. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region [J]. Computers Environment and Urban Systems, 1996, 20(6): 367- 387.
- [20] 柯新利, 邓祥征, 何书金. 地理元胞自动机模型的尺度敏感性及其原因 [J]. 地理研究, 2010, 29(5): 863 - 872.
- [21] 吴大放, 刘艳艳, 王朝晖. 基于 Logistic - CA 的珠海市耕地变化机理分析 [J]. 经济地理, 2014, 34(1): 140 - 147.
- [22] 张启春. 城市 CA 模型建模原则与模拟结果检验方法研究 [J]. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2005, 26(3): 262 - 266.
- [23] Yeh G O, Li X. A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS [J]. Environment and Planning B, 2001, 28(5): 733 - 753.
- [24] 马世发, 艾彬, 欧金沛. 约束性 CA 在城乡建设用地指标空间化中的应用 [J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1 245 - 1 251.