

引用格式:胡最,王慧.多因素约束的城市空间扩张元胞自动机构建及其应用研究[J].地球信息科学学报,2020,22(3):616-627. [Hu Z, Wang H. MCES-CA based urban expansion simulation of Hengyang city[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):616-627.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190240

多因素约束的城市空间扩张元胞自动机构建及其应用研究

胡 最^{1,2}, 王 慧¹

1. 衡阳师范学院城市与旅游学院, 衡阳 421002; 2. 萨尔茨堡大学地理信息科学系, 奥地利 萨尔茨堡 5020

MCES-CA based Urban Expansion Simulation of Hengyang City

HU Zui^{1,2}, WANG Hui¹

1. College of City&Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China;
2. Department of Z_GIS, University of Salzburg, Salzburg 5020, Austria

Abstract: Urban Expansion (UE) is a critical parameter to examine urbanization level. In fact, UE is often accompanied with people, strategies, and urban elements extending over the old edge of city. Hence, UE is a highly complex socioeconomic phenomenon. Dynamic models are very effective to reveal the features and mechanisms of UE. In particular, Cellular Automata (CA) is one of the kinetic models to simulate the natural evolution process and famous for its broad range of applications. A large amount of research findings argue that CA is one of the most potential tools to understand UE. In this study, a multi-factor restricted expansion simulation model of CA (MCES-CA) was proposed according to CA's main features and the main influencing elements of UE. This paper took a middle-zone city named Hengyang City as the case study area. Hengyang City is located in southern Hunan Province of China, and has been positioning to develop into the regional central city of southern Hunan. Hence, it is high significant to reveal the main features and mechanisms of Hengyang City's expansion based on MCES-CA. Firstly, we downloaded LANDSAT images and ASTER DEMs through the internet, and collected Hengyang City's Planning datasets from the Planning Bureau of Hengyang Government. Next, we developed the MCES-CA model by the Model Builder Tools of ArcGIS. Then, we ran it to observe the entire expansion process of Hengyang City from 2001 to 2017. We employed the Expanding Intensity Index (EII) and Expanding Velocity Index (EVI) to assess the MCES-CA model. Results show: (1) Hengyang City presented different expansion directions in different ages. (2) The spatial expansion process of Hengyang City was composed of two main stages. (3) The main factors of shaping the expansion process of Hengyang City were geo-environments and development planning. (4) The simulation results were in accordance with the real states of Hengyang's UE. Our findings suggest that MCES-CA is a potentially popular tool to capture the EU processes of cities because it is easy to build and complete.

收稿日期:2019-05-17;修回日期:2019-10-14.

基金项目:国家自然科学基金项目(41771188);衡阳师范学院基金项目(16D14);湖南省社科评审委课题(XSP17YBZC008);湖南省人居环境基地项目(RJ18k04)。[**Foundation items:** National Science Foundation of China, No.41471188; Foundation of Hengyang Normal University, No.16D14; Foundation of Social Science Council of Hunan Province, No. XSP17YBZC008; Opening Foundation of Hunan Human Inhabitation Base, No.RJ18k04.]

作者简介:胡 最(1977—),男,湖南宁乡人,博士,教授,从事GIS原理与技术应用、数字地形分析、地图符号、地理模拟和文化景观基因研究。E-mail: fuyanghuzui@163.com

For future research, we can improve the simulation accuracy of MCES-CA by refining transformation rules.

Key words: Urban Expansion; urbanization; influencing factors; Cellular Automata; simulation; features; precisions; Hengyang City

***Corresponding author:** HU Zui, E-mail: fuyanghuzui@163.com

摘要:城市空间扩张是复杂的社会经济进程,伴随着人口、政策和城市要素向外推进等现象,是评判城市化水平的重要指标。元胞自动机(Cellular Automata, CA)是可以模拟事物发展演化过程的系统动力学模型,可以有效揭示城市空间扩张过程的特征和机制,具有广阔的应用前景。根据Geo-CA的内涵与特征,以湖南省衡阳市为例,考虑城市空间扩张的主要影响因素,本文提出了多因素制约的城市空间扩张过程元胞自动机模拟模型(Multi-factors Constrained Expanding Simulation CA, MCES-CA)。结合多期LANDSET影像、DEM和规划数据等数据源,论文构建并实现了MCES-CA模型,取得了较好的模拟结果。经检验,MCES-CA的模拟精度总体达89.24%。模拟结果显示衡阳主城区的空间扩张具有多方向、多阶段的特征,受到城市的自然环境和发展规划等因素的制约。本文研究表明,MCES-CA是一种简洁、易实现且高效的的城市空间扩张模拟工具,今后应该结合人工智能方法提高模拟结果的精度。

关键词:城市空间扩张;城市化;约束因素;元胞自动机;模拟;特征;精度;衡阳主城区

1 引言

目前,中国正经历快速城镇化^[1]阶段,面临着较严峻的生态、环境、资源、人口流动、土地利用、区域空间变化等问题^[2-7]。这需要人们探索快速增长的城市人口与维持良好的经济、生态和社会发展效益的途径。实际上,这也是各级部门管理城市的重要依据。

长期以来,地理学对中国城市发展面临的紧迫问题做出了重要理论贡献^[1]。结合数量模型研究城市空间扩张可能面临的各种情境并揭示相应规律成为城市科学领域的热点。其中,城市扩张过程研究成果比较丰富^[8],从方法来看有系统动力学模型和过程耦合模型,从技术途径来看有单一模型与多模型集成的复合模型。总体上,人工智能模型在今后相当长的时期内将成为城市空间扩展过程动态研究的方法首选^[9]。

元胞自动机(Cellular Automata, CA)是基于离散格网的动力学模型,结构简单、自底向上且易于扩展。实际上,CA是一种通用的建模思想:CA只包含元胞、邻居和状态的定义,以及由当前状态转换到下一状态的规则。此外,CA对模拟对象及其过程没有任何特殊的要求。Tobler等人较早将CA引入到城市扩展研究^[10]。此后,CA作为一种重要的地理过程方法直接促成了地理自动机(Geographic Automata Systems, GASs)^[11]的形成。现今,CA被纳入基于人工智能的城市扩张模拟框架,以帮助人们揭示更多的城市奥秘^[8-12]。

城市扩张是一个非常复杂的社会经济过程,涉及到城市规划、地理环境、水系等诸多因素的影

响。本文以湖南省衡阳市为例,结合遥感影像等数据与地理元胞自动机(Geo-CA)研究2001—2017年的空间扩张特点。值得指出的是,衡阳拥有较大的人口体量、良好的交通区位和丰富的矿产资源,但其城市化水平却低于同时期的全国和湖南全省的平均水平。这也严重滞后了城市的经济社会发展。因此,综合考虑城市规划、地形、河流等因素,探究多因素综合影响下的CA城市空间扩张模拟,既可以为衡阳的城市发展与社会经济建设提供参考,又可以为全国其他类似地级城市的研究积累案例,具有重要的意义。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

衡阳是湖南省副中心城市,地处26°07'05"N—27°28'24"N和111°32'16"E—113°16'32"E之间,年均降水量达1293 mm。衡阳城区地处衡阳盆地腹心,位于湘江与耒水、蒸水交汇处,呈典型的“三道水口锁大江”格局^[13],以良好的区位成为中南地区的工业重镇与交通枢纽(图1)。衡阳城区包括主城区的雁峰、石鼓、珠晖和蒸湘四区以及远郊的南岳区。

总体上,衡阳城市化水平相对较低。截至2017年末,城镇化率达52.46%^[14]。但是,衡阳的城市化水平仍有进一步提升的优势:①市域范围内拥有较为庞大的人口基数。截至2017年末,市域常住人口达720.53万人;其中,衡阳市城区常住人口达156万人^[15];②区位优势,扼两广交通要道,境内高铁、高速公路和航空可通达全国,具有承接珠三角地区产

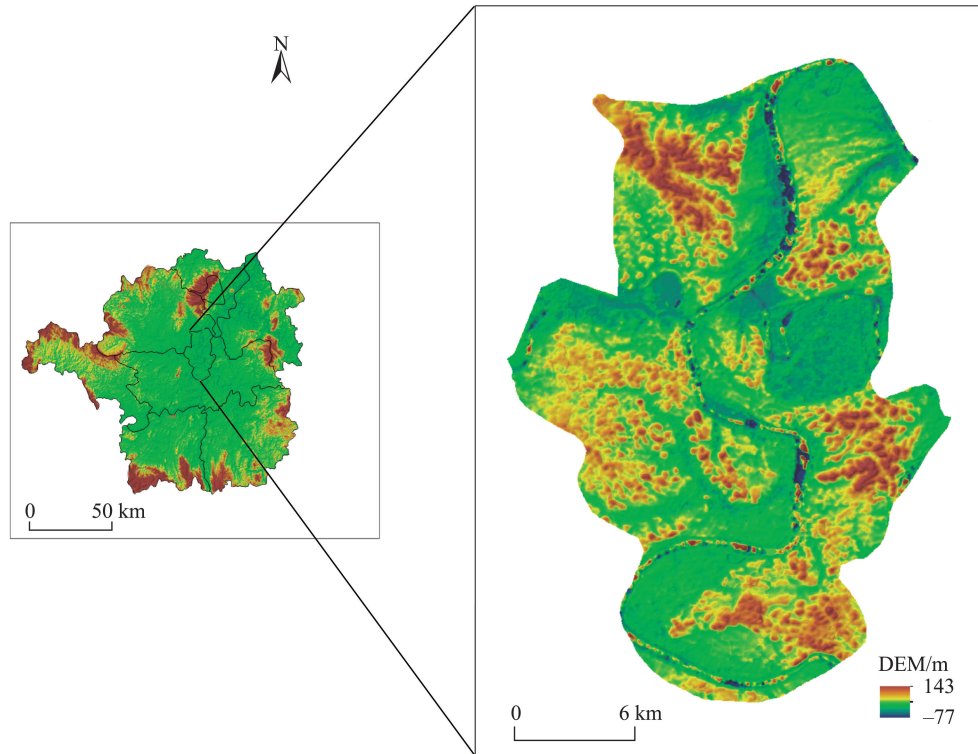


图1 衡阳市主城区区位

Fig. 1 Location of Downtown Hengyang City

业转移的地理优势;③ 铅、锌、铜等有色金属藏量颇丰,自然资源丰富;城市腹地广阔,市域面积达1.5万多 km^2 。因南岳区距离主城区有50 km的空间距离,故本文仅考虑位居主城的四区。

2.2 数据来源

本文所用到的遥感影像数据(自2001—2017年间的Landsat影像数据)均从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/sources/>)^[16]下载并进行几何校正等预处理。以2001年的遥感影像作为基准,本文提取主城区的城市空间形态数据作为模拟基准。在实验过程中,本文再提取其他年份主城区的城市空间形态数据作为相应年份的模拟结果检验数据。此外,本文还将SRTM 30 m空间分辨率的DEM数据、各年份的城市用地规划、城区的河流水系作为模拟的限制因子。本文研究数据的总体处理流程如图2所示。

3 研究方法

3.1 地理元胞自动机(Geo-CA)的特征

CA是一种时间、空间和状态都离散的动力学系统模型,由邻居、状态和转换规则共同构成。

CA自提出至今已经有数十年的历史了^[17]。人们对其特征进行了深入的研究,如:生物机体组织生长、社会经济发展、城市空间扩展^[9]等。

$$CA \sim (S, T, N) \quad (1)$$

国外学者较早注意到了CA在地理过程与地理现象模拟中的潜在价值^[17]。国内学者在深入剖析地理系统复杂性特征的基础上提出了地理元胞自动机(Geo-CA)^[18]:① 元胞及其发展演变的时间、空间与状态转换过程都存在于地理空间;② 元胞状态的发展变化依赖于外部输入或外界条件的激发;③ 元胞的演化是一种非线性的发展变化过程,受到周围环境(即邻居状态)的影响与制约;④ 元胞的转换规则是地理空间中地理对象或现象的状态函数的数学映射关系;⑤ 元胞具有在接受特定信息且状态发生转换的情况下绘制自身的能力^[9]。

Geo-CA包括地理空间维度、空间位置、元胞状态、输入信息、转换规则和绘制机制(图3),是一种复杂的地理系统演化发展过程描述模型。地理空间维度可以是0维、1维、2维、3维或多维。空间位置是描述地理对象、现象和过程的基本参数。状态是描述某时刻的元胞的存在属性特征。输入信息是元胞的邻居以及它们的存在状态,是促使元胞的

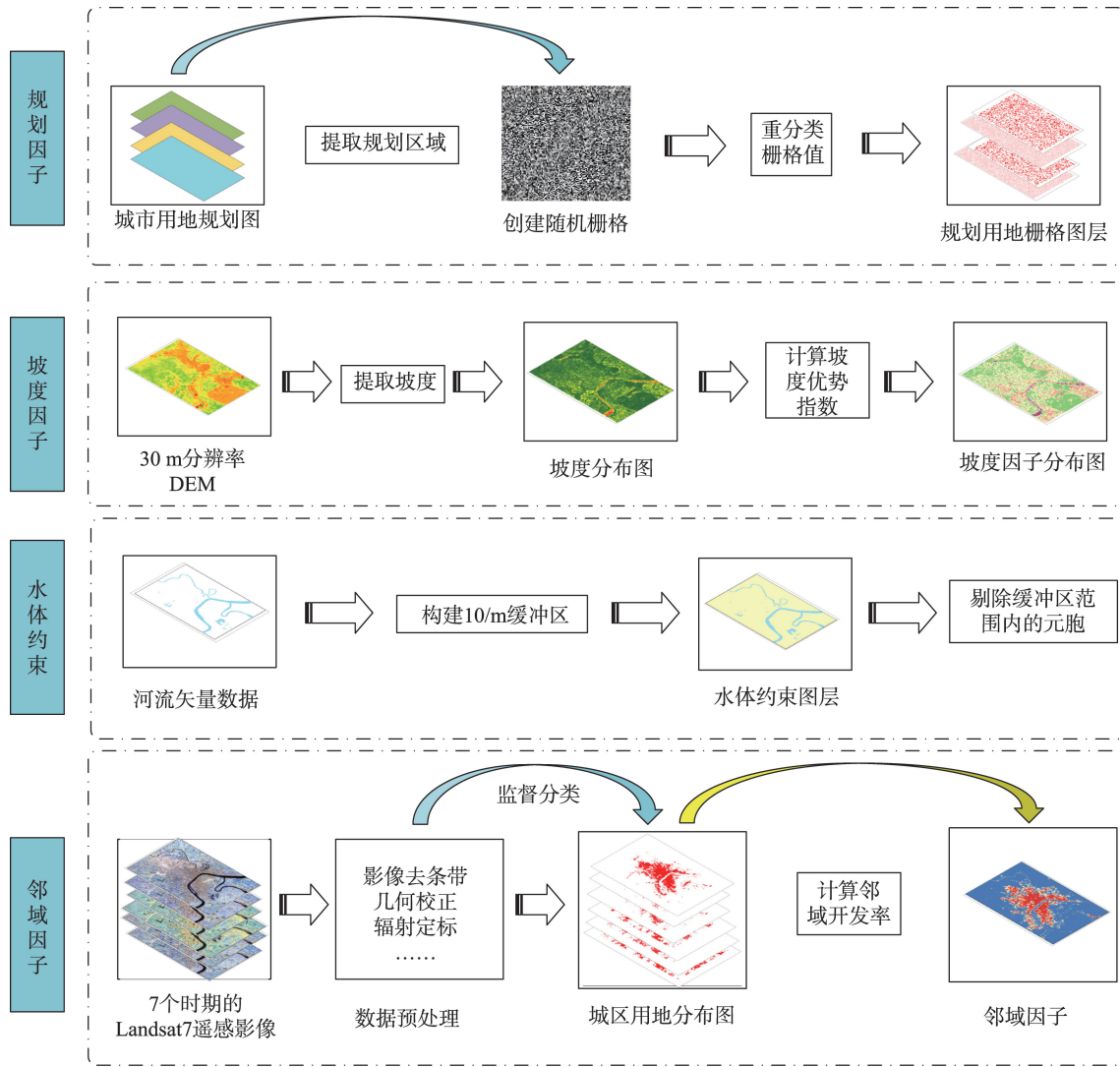


图2 实验数据处理流程

Fig. 2 Flowchart of data processing

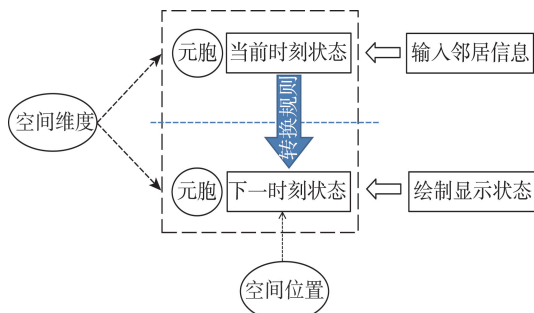


图3 Geo-CA的概念

Fig. 3 Conceptual framework of Geo-CA

状态发生转换的基本前提。转换规则是元胞在某时刻根据输入信息发生状态转换的规则集合。绘制机制是将某时刻元胞的存在状态可视化的方法。需要说明的是,CA 的运行规则、参数和机制等

都需要根据具体情况来分析。

(1)CA 拥有广阔的应用范畴,对格网、元胞、邻居等都没有特定的要求。如:人们可以用CA 描述单个城市的发展特征^[19-20],也可以模拟区域的城市群发展动态^[21]。地理学格网空间主要有栅格和矢量2种,其空间剖分方式有三边形、四边形、六边形^[22]等。因此,Geo-CA 的相关研究也包括了栅格元胞自动机与矢量元胞自动机^[23],对元胞邻居的定义包括了冯诺伊曼型和摩尔型。此外,近年来也有研究将元胞的邻居扩展到4×4、5×5等以提高模拟精度^[24]。

(2)CA 拥有很强的过程模拟能力,构建不同的元胞转换规则就可以模拟很多复杂的变化过程。如:结合空间数据挖掘的理论或方法构建转换规则

库来定义 Geo-CA 的发展演化过程^[23-24]。

显然, CA 是一种简约的模拟框架, 因而可以模拟复杂的地理过程与现象。这表明 CA 具有“寓复杂于简单”的哲理。然而, CA 也存在明显的不足^[8-9], 如: 元胞的位置固定不变。此外, 很多地理动态过程也难以通过 CA 精确的描述或表达相关变化特征, 这些也是导致很多现象或过程的模拟结果存在一定不足的重要原因。

3.2 MCES-CA 模型

3.2.1 MCES-CA 的构建

CA 可以容纳丰富的内涵, 只要结合具体问题给出元胞及其状态的定义、转换方法和转换规则就可以构建适用于不同需要的模拟模型(图4)。因此, 很多 GIS 软件平台自带的建模工具或者 API 接口都可以用于创建 CA 模型。

结合面向对象的分析方法, 这里主要探讨构造多元因子约束的城市空间扩展模拟 CA 模型(Multi-factors Constrained Expansion Simulation CA, MCES-CA)的构建思路。

(1) 给定元胞单元的定义。一个地理元胞单元

包括地理空间坐标、当前状态、邻居及其状态、当前时刻、当前用地类型、是否可以转换。

(2) 给定元胞邻居的定义。本质上, 元胞的邻居仍然是元胞, 可以根据元胞的定义进行派生。

(3) 定义元胞的状态。元胞的状态可以根据研究的实际需要来定义。在模拟城市空间扩展时可以根据城市用地的相关国家规范来定义不同的状态(表1)。

(4) 指定元胞的状态转换规则。元胞的状态转换与邻居的数量和状态相关。如: 现实世界中, 当某个元胞所代表的地块周围有 3~4 个地块是住宅区时, 该地块很可能转变成为商业用地。

值得注意的是, 为了提高模拟精度, 元胞状态的转换条件需要加入城市规划、地形、交通等制约因素。如, 很多城市在开通地铁后, 地铁沿线的房价出现上涨, 从而导致某些用地转变为住宅用地, 这在模拟过程中可以作为某类用地转换为住宅用地的影响因素。

根据上述分析, 借鉴程序设计中的抽象数据模型(ADT)表示方法, 本文建立了 MCES-CA 的 ADT

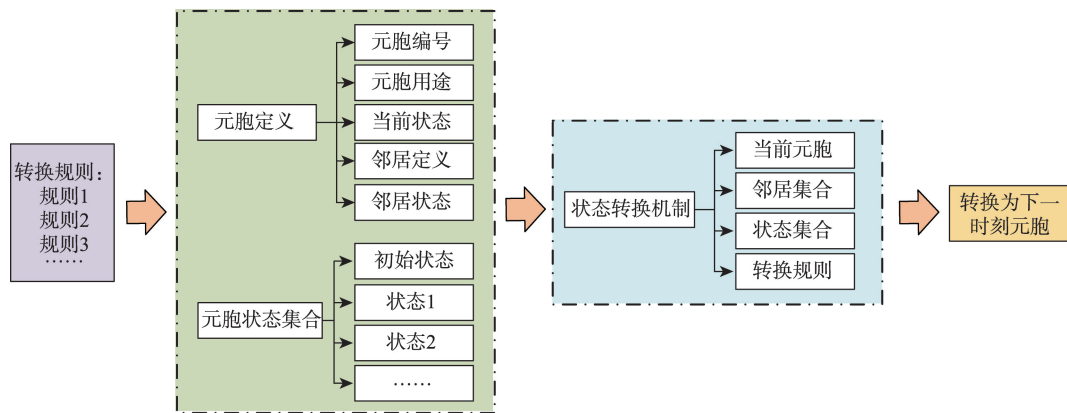


图4 CA的建模思路

Fig. 4 Modeling flowchart for CA

表1 MCES-CA 的 ADT 描述

Tab. 1 ADT descriptions for MCES-CA

类名	元胞	邻居	状态	转换规则
数据成员	空间坐标	空间坐标	工业	周围有铁路、港口、仓储等用地时转换成工业用地
	ID 标识号	ID 标识号	仓储	周围有铁路、港口、工业等用地时转换成仓储用地
	当前状态值	当前状态值	铁路	通过规划设定
	邻居集合	当前用地类型	道路	通过规划设定
	当前用地类型		港口	通过规划设定
	是否转换		居住	周围有工业、道路等用地时转换成居住用地
			设施	通过规划设定

描述,如表1所示。

结合MCES-CA的特征和ADT描述结果,本文

根据 ArcGIS 的 ModelBuilder 设计了具体的模型构建与运行流程(图5)。

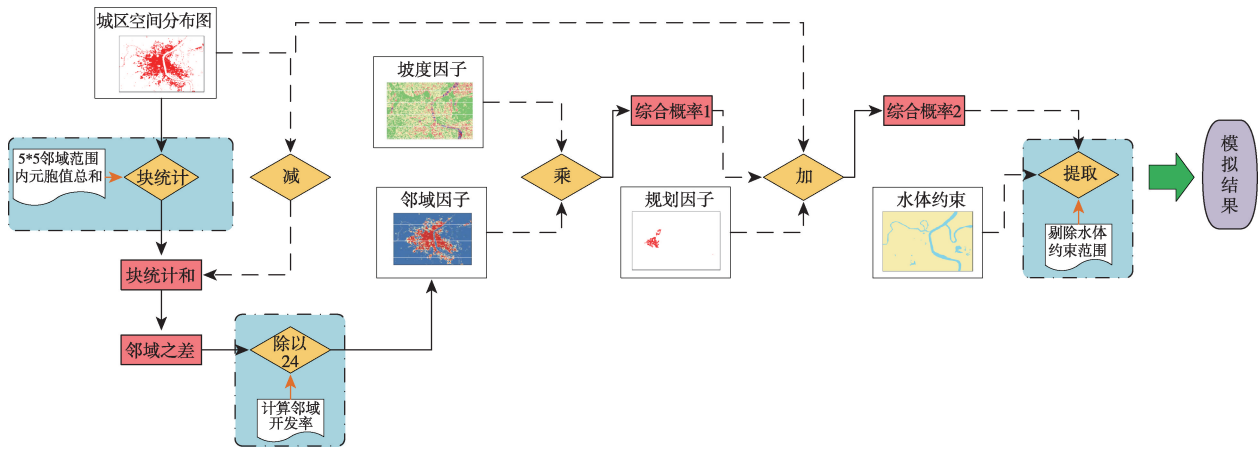


图5 MCES-CA的构建流程

Fig. 5 Modeling flowchart for MCES-CA

3.2.2 邻域因子

借鉴同类研究的经验^[24],为了提高模拟精度,本文将Moore邻域扩展为5×5窗口范围内的邻域元胞的集合。根据栅格代数运算的相关规则,5×5分析窗口实际上是以目标元胞为中心,包括周围24个相邻栅格作为邻居的集合。公式表示为:

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n C(x, y) \quad (2)$$

式中: V_i 表示为元胞 (x, y) 的邻域开发率; N 表示为邻域元胞的数量; $C(x, y)$ 表示 (x, y) 元胞的状态,城区为1,非城区为0,如图6所示。

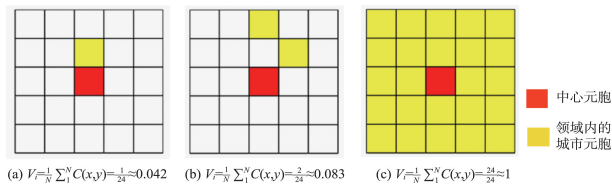


图6 邻域元胞的开发率

Fig. 6 Development rate of CA cell's neighbors

3.2.3 坡度因子

地形因素在很大程度上决定了城市空间用地的格局。根据《城市用地竖向规划规范(CJJ 83-99)》,不同用地类型在不同的坡度等级中的适宜性也不同(表2)。因此,在构建MCES-CA时需要引入量化后的地形因素。本文通过DEM数据提取地形坡度并分成5个坡度等级,然后借鉴区位商研究方法^[24]统计不同的用地类型在不同的坡度等级中的分布情况(式(3))。最后,本文将实际地形量化

表2 城市主要建设用地适宜规划坡度

Tab. 2 Appropriate slopes for different urban uses

用地名称	最小坡度/%	最大坡度/%
工业用地	0.2	10
仓储用地	0.2	10
铁路用地	0	2
城市道路用地	0.2	8
港口用地	0.2	5
居住用地	0.2	25
公共设施用地	0.2	20
其他	-	-

为影响城区空间扩展的坡度因子。

$$P_{S1} = \frac{S_{ij}}{S_i} \times \frac{S}{S_j} \quad (3)$$

式中: P_{S1} 表示坡度分布优势指数, S_{ij} 表示 j 级坡度上 i 类的面积, S_i 表示 i 类的总面积, S 表示研究区总面积, S_j 表示 j 级坡度的总面积。

根据式(3)计算各类用地在各个坡度等级中的坡度分布优势指数值(表3)。地形分布优势指数大于1表示某用地类型在该坡度等级范围内的适宜性较高。反之,若坡度分布优势指数小于1,则表明某

表3 衡阳市中心城区用地的坡度优势指数

Tab. 3 Slope Advantage Index for main urban area of Hengyang City

用地类型	0~2°	2~5°	5~15°	15~25°	25~64°
城区	1.56	0.18	2.49	1.36	0.33
非城区	0.6	1.53	0.04	0.81	1.99

用地类型在该坡度等级范围内的适宜性较差。

在实际模拟中,为了避免元胞的存在状态转换概率出现大于1的计算误差,本文将坡度优势指数按式(4)进行标准化。此外,为了使全部的指数值适合模型的运行,本文将标准化后的坡度因子扩大100倍(图7)。

$$P_s = \frac{P_{s1}}{\sum_{i=1}^n P_{ij}} \quad (4)$$

式中: P_{s1} 表示标准化前的坡度分布优势指数; P_s 表示标准化后的坡度优势分布指数; i 表示坡度级; j 表示土地类型; n 表示坡度级数。

3.2.4 水体约束

根据国家城市建设用地的相关法规,水域周边10 m 范围内不得建设房屋。这也是模拟城区扩展过程的一个重要限制因素。因此,本文首先提取衡阳主城区的水体数据并构建10 m缓冲区作为水体对模拟结果的约束影响因子。其次,本文将水体约束因子图层与模拟结果进行叠置分析,以剔除模拟结果中不适宜发展成为城区的元胞进而提高模拟精度。

3.3 模型运行

根据图5,本文在ArcGIS平台中构建了MCES-CA,并进行相关模拟实验。

(1)将衡阳主城区2001年土地利用数据作为初

始元胞输入,然后将相应的邻域因子、坡度因子、规划因子、水体作为状态转换的约束条件输入。

(2)设置初始的元胞转换阈值和时间尺度。本文将模型迭代的时间尺度设定为1年,初始转换阈值设定为初始元胞与限制因子叠置分析结果的三分之一。设定初始阈值之后,模型开始迭代运行。每一次迭代结束后,将结果中小于转换阈值的元胞置为非城区,反之则置为城区,然后适当提高元胞的转换阈值以进入下一次迭代。当模型的迭代结果逼近根据相应年份遥感影像提取的城区时即终止迭代,然后将此时的元胞转换阈值确定为最佳转换阈值。

4 结果分析

4.1 结果与精度检验

根据上述过程和方法,本文最终得到了衡阳主城区空间扩张的模拟结果(图8)。

模型迭代结束后,本文通过构建城区扩张模拟结果与根据对应年份遥感影像提取的实际城区用地情况的混淆矩阵来检验模型的精度(图8)。以2002、2003和2004年为例,2002年的模型总体精度为89.24%,Kappa系数为0.64;2003年的模型总体精度为92.27%,Kappa系数为0.75;2004年的模型总体精度为89.87%,系数为0.69。3个年份的kappa系数值

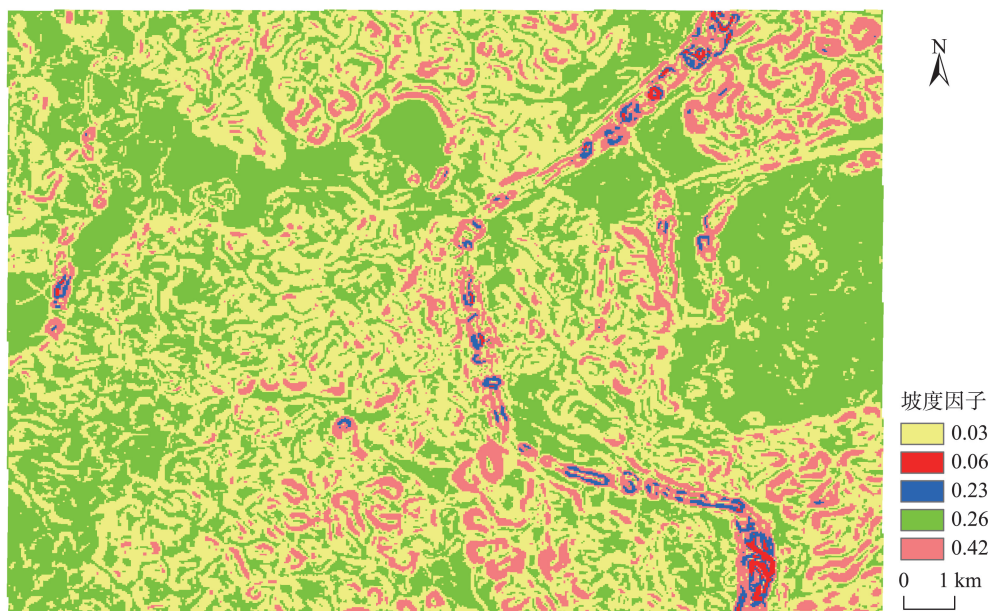


图7 坡度因子分布

Fig. 7 Distribution map of the slope pattern

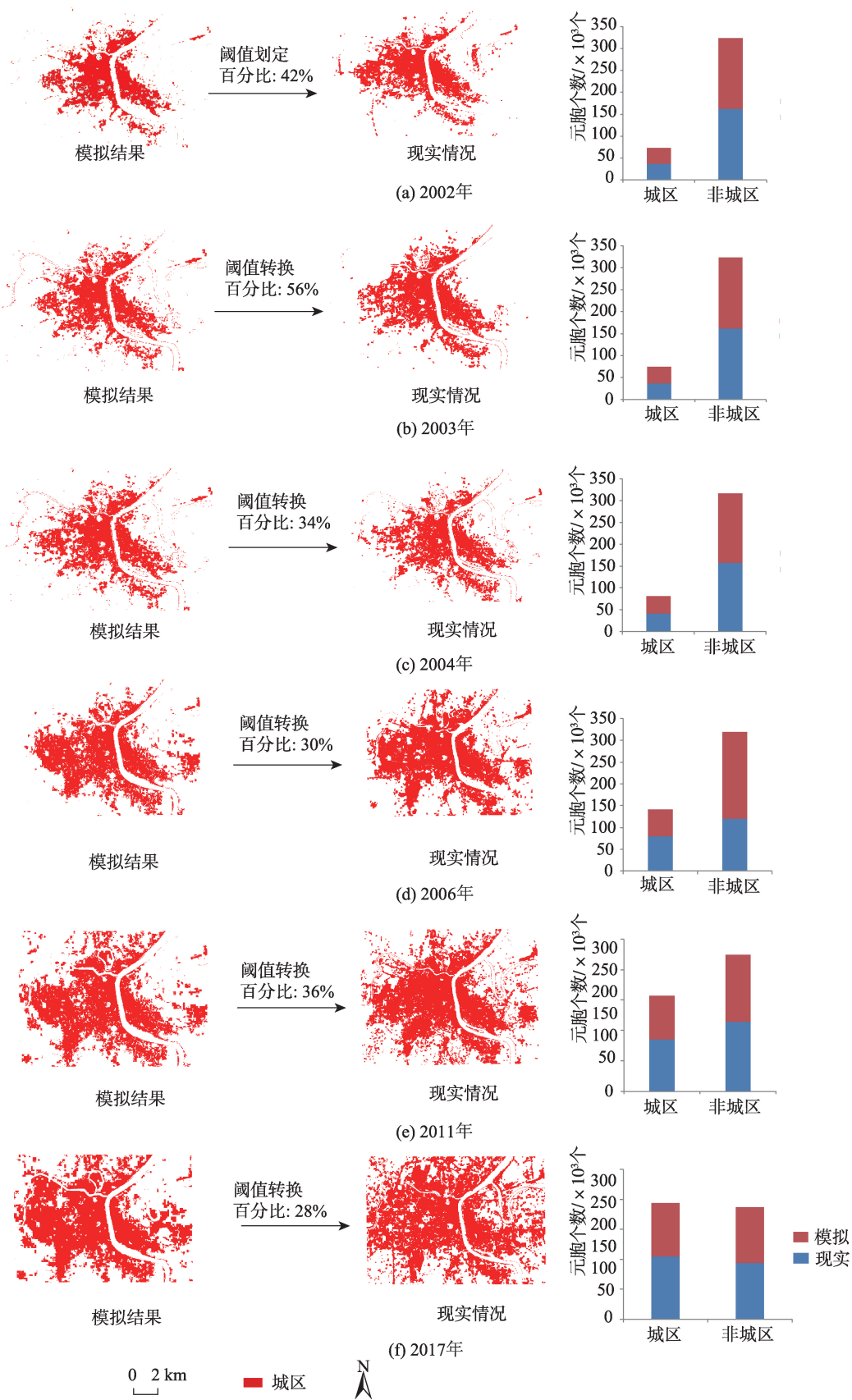


图8 模拟结果及相应年份的对比

Fig. 8 Simulation results versus actual historical land uses in 2002, 2003, 2004, 2006, 2011 and 2017

均在0.6~0.8之间,可见MCES-CA的模拟精度较高。

MCES-CA的运行结果表明:将邻居扩展到5×5分析窗口,可以提高模拟精度;在模拟过程中通过设置制约因子并将其与模拟过程结果进行叠置分析等栅格运算,剔除了存在误差的元胞,有效提高了模拟精度;通过模型迭代确定元胞最佳转换阈值有利于提高模拟精度。

4.2 扩张总体特征

本文根据模拟结果构建了衡阳主城区空间扩张过程图谱(图9),可以明确:衡阳主城区自2001—2017年的城市空间扩张具有方向性突出和阶段性明显的特征。

(1)从城市空间扩张的方向性特征来看,自2001—2006年衡阳主城区主要向西部扩张;自2006—2011年衡阳主城区主要向东部扩张;自2011—2017年衡阳主城区主要向北部扩张。

(2)从2001—2017年衡阳主城区的空间扩张程度来看,又具有鲜明的阶段性特征。大体上以2004年为界,可以分为2个阶段。①2001—2004年的缓慢扩张阶段;②2004—2017年期间的快速扩张阶段。其中,第二阶段以2006和2011年为界又体现了明显不同的阶段性特征。自2004—2006年衡阳主城区呈现出急剧扩张的态势。在此期间,城区几乎扩张了近1倍。自2006—2011年衡阳主城区空间扩张又趋于平缓。自2011—2017年衡阳主城区又恢复了快速的空间扩张态势。总体上,衡阳主城区空间扩张过程模拟结果呈现出的阶段性特征与

衡阳市主城区的实际发展过程吻合。

城市的空间扩张除了受到自然地形、水系等因素的影响之外,还受到政策、城市规划、社会投资等多种因素的限制。MCES-CA对衡阳主城区的空间扩张过程模拟表明:在城市发展过程研究中考虑城市发展规划、用地情况等复杂社会因素对城市空间形态的影响可以有效提高模拟结果的精度。

4.3 扩张数量特征

定量分析城市的空间扩张过程有利于测度城区在特定时期内的发展态势。根据模拟结果,本文从扩张强度指数和扩张速度指数方面分析衡阳市主城区在2001—2017年的扩张特征(图10)。这里以一年为时间单位进行计算,使得扩张强度从本质上表现为年平均扩张速度的标准化^[21]。

扩张强度指数是指单位时间内城区用地的扩张面积与初始时期的城区用地面积的百分比(式(5))。该指数反映的是城区面积的变化速率。

$$L_i = \frac{\Delta U_i}{\Delta t \times T_A} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ΔU_i 为某一时段城区扩展数量; Δt 为某一时段的时间跨度; U_A 为某一时段初期的城区面积; T_A 为研究区域的土地总面积。

根据2001—2017年衡阳市中心城区的面积(表4),本文计算了此期间衡阳市中心城区的扩张强度(图10)。结果表明,中心城区在此期间表现出了较大的扩张强度。其中,2004—2005年城区空间扩张强度达到了整个研究时段内的最高峰值,城区面积

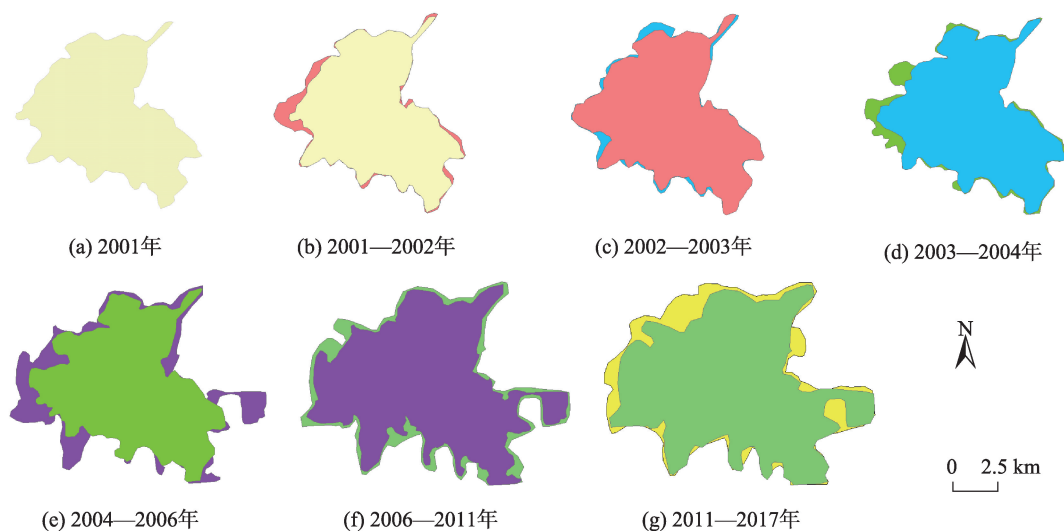


图9 2001—2017年衡阳主城区空间扩张过程图谱

Fig. 9 Expanding-process maps of Hengyang City for 2001 to 2017

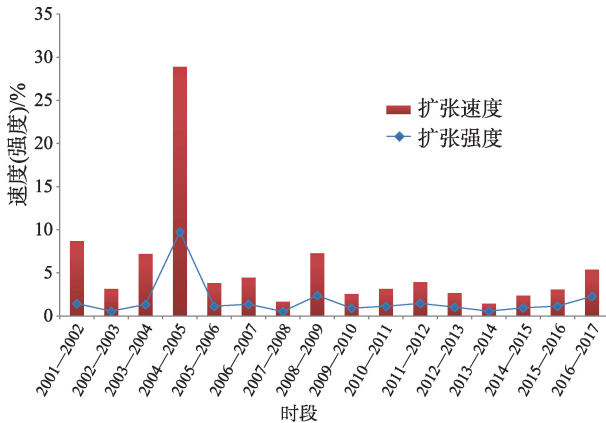


图10 衡阳市主城区空间扩张的数量特征

Fig. 10 Quantitative features of the urban expansion of Downtown Hengyang City

表4 2001—2017年衡阳市主城区建成区面积

Tab. 4 Urban areas of Downtown Hengyang from 2001 to 2017

年份	面积/km ²	年份	面积/km ²
2001	29.85	2010	64.76
2002	32.44	2011	66.80
2003	33.46	2012	69.42
2004	35.87	2013	71.27
2005	53.41	2014	72.28
2006	55.45	2015	73.98
2007	57.91	2016	76.05
2008	58.86	2017	80.13
2009	63.15		

增加了 17.54 km²; 2001—2002 年则是第二高峰值, 城区面积增加了 2.59 km²。

扩张速度指数描述的是单位时间内城市建成区面积的变化速度, 公式如下:

$$M_i = \frac{\Delta U_i}{\Delta t \times U_A} \times 100\% \quad (6)$$

式中: ΔU_i 为某一时段城区扩展数量; Δt 为某一时段的时间跨度; U_A 为某一时段初期的城区面积。

从扩张速度计算结果(图10)来看: 在整个研究时段内, 2004—2005年城区空间扩张最为迅速, 之后扩张速度下降明显; 2008—2009年城市扩张速度又有所增加, 之后的扩张速度呈现先缓慢下降再逐渐增加的特点。

总体上, 根据不同年份的城市建成区面积计算得到的衡阳主城区空间扩张强度与扩张速度的特征(图10)与研究时段内的城区空间扩张过程特征(图9)相符合。

4.4 扩张机理特征

城市空间扩张是在社会经济发展进程中开始的, 随着城市人口的增长和城市化等因素的影响, 城市用地总量和用地方向快速向城区以外的空间推进^[28]。城市空间扩张是经济、政治、交通等社会人文因素与地形、水系、环境等自然因素综合作用的结果。

4.4.1 自然环境因素

衡阳主城区地处衡阳盆地腹心, 位于耒水和蒸水与湘江汇合区域。湘江自南向北纵贯市区。从地形特征上看, 衡阳主城区南部、东部多低缓丘坡和丘陵, 这对城区扩张有一定的制约作用。蒸水汇入湘江段以北多丘陵地形, 不利于城市发展。湘江以西地带与蒸水河曲之间为平缓的冲积地形, 利于城市发展。湘江以东地带与耒水沿岸多丘坡, 城市建设难度较大。这也是城市主要向西扩张的地形原因。从河流水系对城市扩张的影响来看, 湘江干流衡阳段以及蒸水与耒水均可常年通航。其中, 湘江干流建有千吨级航运码头。这吸引了一定的航运产业聚集。同时, 主城区南部的湘江干流段被划定为二级饮用水源保护区并建有自来水厂负责城市供水。受保护的湘江河段的河岸及其周边地区开发也受到了相应的限制。

4.4.2 城市规划因素

衡阳一直定位为省域副中心和湘南区域性中心城市。衡阳地扼两广交通咽喉, 为中国南方重要的铁路枢纽和中南地区工业重镇。这样的城市发展定位和区位优势在城市空间扩张过程中具有重要的影响。

自2000年以来, 衡阳在经济社会发展中积极抢抓机遇, 谋划承接珠江三角洲地区产业转移、融入“3+5”环洞庭湖城市圈等区域发展战略。在城市发展过程中, 衡阳提出了“西进、东扩、北拓”的城市发展规划。在此背景下, 衡阳积极布局并设立了高新技术产业开发区、大学城、白沙洲工业园、珠晖工业园等园区; 同时通过调整自身的城市交通发展规划积极与国家交通路网发展规划对接。随着武广高铁、怀邵衡铁路等快速铁路干线和南岳机场的建成, 极大地扩展了衡阳主城区与外界的交通空间。这些都有效地促进了衡阳主城区的空间扩张并吸引了大量的城市人口, 对特定时期内城市的空间扩张过程产生了重要的影响。

4.4.3 其他因素

自2004年以来,衡阳积极开展主城区交通干道建设、市政设施建设和城市绿化等多项工程建设,这些也有利于促进城市对外扩张。如,将市政府以及所属行政机构搬迁至华新开发区,在衡高校异地迁建新校区,各区政府逐渐搬迁新址,积极规划并修建城区主干道与环线干道,沿蒸水、耒水和湘江干流城区段修建风光带,等。此外,衡阳市政府积极改善营商环境,对外吸引大量投资并推进产业建设,如设立综合保税区、发展城郊休闲观光农庄,等。

5 结论

CA是一种通用的动力学过程模拟工具,可以结合实际问题构建相应的CA模型。人们可以在各种开发环境中实现CA模型,也可以在已有GIS软件平台上进行流程化搭建。本文通过分析CA的主要特征,选取多年的遥感影像作为基本数据源,结合衡阳主城区自2001—2017年的发展特征,通过ArcGIS定义并实现了MCES-CA模型。

CA广受质疑之处在于其模拟精度有待提高。人们尝试通过多种方法来改进CA的模拟精度,如:定义矢量元胞来改进形状固定的栅格元胞难于表达地物真实形状特征,通过关联分析、数据挖掘等方法剔除数据相关性以改进转换规则,等。但是,前述改进方法取得的效果仍然有限,因为矢量与栅格在特定的空间分割尺度机制下是等效且可以相互转换的。显然,探求有效改进CA模拟精度的方法和途径在今后相当长的时期内仍将是一个需要持续深入的难题。

值得说明的是,本文通过扩张邻域、对影响因子进行叠置以剔除误差元胞、迭代确定最佳转换阈值等方法在很大程度上有效提高了模拟结果的精度。这值得今后的同类研究加以借鉴。因此,本文从影响因素入手提高模拟精度的尝试具有一定的参考意义。

当然,针对元胞的位置、形状和尺寸困惑,笔者认为今后应该探索扩展CA的空间维度,引入基因表达式编程、神经网络迭代等人工智能算法剔除元胞转换之间的相关性等方法来寻求突破。

参考文献(References):

[1] 方创琳,王振波,马海涛.中国城市群形成发育规律的理论认知与地理学贡献[J].地理学报,2018,73(4):651-665.

- [Fang C L, Wang Z B, Ma H T. The theoretical cognition of the development law of China's urban agglomeration and academic contribution[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(4):651-665.]
- [2] 任宇飞,方创琳,蔺雪芹.中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价[J].地理学报,2017,72(11):2047-2063. [Ren Y F, Fang C L, Lin X Q. Evaluation of eco-efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(11):2047-2063.]
- [3] 张引,杨庆媛,闵婕.重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析[J].地理学报,2016,71(5):817-828. [Zhang Y, Yang Q Y, Min J. An analysis of coupling between the bearing capacity of the ecological environment and the quality of new urbanization in Chongqing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016,71(5):817-828.]
- [4] 鲍超.中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系[J].地理学报,2014,69(12):1799-1809. [Bao C. Spatio-temporal coupling relationships among urbanization, economic growth and water use change in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(12):1799-1809.]
- [5] 刘涛,齐元静,曹广忠.中国流动人口空间格局演变机制及城镇化效应—基于2000和2010年人口普查分县数据的分析[J].地理学报,2015,70(4):567-581. [Liu T, Qi Y J, Cao G Z. China's floating population in the 21st century: uneven landscape, influencing factors, and effects on urbanization[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015,70(4):567-581.]
- [6] 高金龙,包菁薇,刘彦随,等.中国县域土地城镇化的区域差异及其影响因素[J].地理学报,2018,73(12):2329-2344. [Gao J L, Bao J W, Liu Y S, et al. Regional disparity and the influencing factors of land urbanization in China at the county level, 2000-2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(12):2329-2344.]
- [7] 陈好凡,王开泳.撤县(市)设区对城市空间扩展的影响机理—以杭州市为例[J].地理研究,2019,38(2):221-234. [Chen Y F, Wang K Y. Influence and mechanism of "Turning Counties (Cities) into Districts" on urban space expansion: Taking Hangzhou as a case study[J]. *Geographical Research*, 2019,38(2):221-234.]
- [8] 崔学刚,方创琳,李君,等.城镇化与生态环境耦合动态模拟模型研究进展[J].地理科学进展,2019,38(1):111-125. [Cui X G, Fang C L, Li J, et al. Progress in dynamic simulation modeling of urbanization and ecological environment coupling[J]. *Progress in Geography*, 2019,38(1):111-125.]
- [9] Ning Wu, Elisabaete A. Silva. Artificial intelligence solutions for urban land dynamics: A review[J]. *Journal of Planning Literature*, 2010,24(3):246-265.
- [10] Gale S, Olsson G. *Philosophy in Geography. Theory and decision library*[M], Springer, Dordrecht 1979,20:379-386.
- [11] Paul M. Torrens, Itzhak Benenson. *Geographic automata systems*[J]. *International Journal of Geographical Infor-*

- mation Science, 2005,19(4):385-412.
- [12] A. M. Garcia, I. Sante, M. Boullon, et al. Calibration of an urban cellular automaton model by using statistical techniques and a genetic algorithm. application to a small urban settlement of NW Spain[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013,27(8):1593-1611.
- [13] 刘沛林. 诗意栖居: 中国传统人居思想及其现代启示[J]. 社会科学战线, 2016(10):25-33. [Liu P L. Romantic settling-a modern perspective of the thinking of China's traditional settlements[J]. Fronts of Social Sciences, 2016 (10):25-33.]
- [14] 赵莉, 杨俊, 李闯, 等. 地理元胞自动机模型研究进展[J]. 地理科学, 2016,36(8):1190-1196. [Zhao L, Yang J, Li C, et al. Geographic cellular automata model research progress [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(8):1190-1196.]
- [15] http://tjj.hengyang.gov.cn/sjfb/sjcx/201801/t20180131_1952078.html[EB/OL].
- [16] http://tjj.hunan.gov.cn/tjfx/tjgb/szgb/hys/201803/t20180313_4971055.html[EB/OL]
- [17] 唐瓔, 刘正军, 杨树文. 基于三指数合成影像的西北地区城市建筑用地遥感信息提取研究[J]. 地球信息科学学报, 2019,21(9):1455-1466. [Tang Y, Liu Z J, Yang S W. Mapping urban built-up land in northwest China based on Three-index Synthetic remote sensing imagery[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(9):1455-1466.]
- [18] 周成虎. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999. [Zhou C H. Geographical cellular automata research[M]. Beijing: Science Press, 1999.]
- [19] 韩效, 刘民岷. 基于改进元胞自动机的成都城市扩展仿真模拟[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2014,37(6): 923-928. [Han X, Liu M Q. Simulation of Chengdu City expansion based on improved cellular automata[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2014,37(6):923-928.]
- [20] 沈体雁. 基于MODIS遥感影像及元胞自动机的京津冀地区城市模拟研究[J]. Intelligent information technology application association. Proceedings of 2011 International Conference on Ecological Protection of Lakes-Wetlands - Watershed and Application of 3S Technology (EPLWW3S 2011 V2)[C]. Intelligent Information Technology Application Association: 智能信息技术应用学会, 2011:4. [Shen T Y. Research on the urban expansion of Jing-Jin Area based on the MODIS and cellular automata[J]. Intelligent Information Technology Application Association. Proceedings of 2011 International Conference on Ecological Protection of Lakes - Wetlands - Watershed and Application of 3S Technology (EPLWW3S 2011 V2) [C]. Intelligent Information Technology Application Association: 2011:4.]
- [21] 甘喜庆. 基于约束 logistic-CA 模型的城市扩展空间形态研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. [Gan X Q. Research on urban extended spatial morphology based on constrained logistic-CA model[D]. Changsha: Central South University, 2008.]
- [22] 桂预凤, 杨慧, 张永红. 扩展邻域元胞自动机模型城市扩展研究[J]. 测绘科学, 2014,39(12):61-64. [Gui Y F, Yang H, Zhang Y H. Study on urban expansion of extended neighborhood cellular automata model[J]. Science and Mapping Science, 2014,39(12):61-64.]
- [23] 王树良, 丁刚毅, 钟鸣. 大数据下的空间数据挖掘思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013,8(1):8-17. [Wang S L, Ding G Y, Zhong M. Thoughts on spatial data mining under Big Data[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2013,8(1):8-17.]
- [24] 刘鹏华, 刘小平, 姚尧, 等. 耦合约束动态地块分裂和矢量元胞自动机的城市扩张模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2018,34(4):74-82. [Liu P H, Liu X P, Yao Y, et al. Urban expansion simulation by integrating constrained dynamic land parcel subdivision and vector-based Cellular Automata[J]. Geography and Geo-Information Science, 2018,34 (4):74-82.]
- [25] 柳颖. 区位商视角下粤港澳大湾区制造业与服务业集聚分析[J]. 市场周刊, 2019(2):67-68. [Liu Y. Analysis of the concentration of manufacturing and service industry in Guangdong, Hong Kong and Macao Dawan District from the perspective of location businessmen[J]. Marketing Monthly, 2019(2):67-68.]
- [26] 王海军, 夏畅, 张安琪, 等. 基于空间句法的扩张强度指数及其在城镇扩展分析中的应用[J]. 地理学报, 2016,71(8): 1302-1314. [Wang H J, Xia C, Zhang A Q, et al. The expansion strength index based on space syntax and its application in urban expansion analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(8):1302-1314.]
- [27] 刘盛和. 城市土地利用扩展的空间模式与动力机制[J]. 地理科学进展, 2000,21(1):43-50. [Liu S H. The Spatial Model and Dynamic Mechanism of Urban Land Use Expansion[J]. Progress in Geography, 2000,21(1):43-50.]
- [28] 汤玲英, 徐阳亮, 王聪, 等. 基于多时相 Landsat 的衡阳市城区扩张模式研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018,41(2): 116-118,123. [Tang L Y, Xu Y L, Wang C, et al. Study on the urban expansion model of Hengyang City based on multi-temporal Landsat[J]. Surveying and Spatial Geography Information, 2018,41(2):116-118,123.]
- [29] 梅珍珍, 李刚, 赵志忠, 等. 海口市城市空间扩张机理研究[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2009,22(2):219-223. [Mei Z Z, Li G, Zhao Z Z, et al. The study of urban spatial expansion mechanism in Haikou[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2009,22(2):219-223.]