

# 基于元胞自动机模型的土地利用情景模拟与驱动力分析

孙玮健<sup>1</sup> 张荣群<sup>1</sup> 艾东<sup>2</sup> 王大海<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 土地利用格局的形成过程比其最终形成的结果更为重要。本文以哈尔滨市双城区为例, 利用不同时期的土地利用数据, 在土地利用变化关键驱动因素分析的基础上, 选取了对土地利用变化影响较大的距离变量、邻近土地利用类型数量、单元自然属性、社会经济因素等 4 方面 14 个驱动力因子, 建立了基于元胞自动机(CA)与人工神经网络(ANN)相结合的土地利用空间格局模拟模型。在此基础上, 对研究区自然禀赋、社会经济快速发展、基本农田保护及土地利用规划等不同情景驱动机制下的土地利用空间格局进行了时空模拟, 以此解析土地利用变化过程与驱动力因素的响应关系。模拟结果显示: 自然禀赋情景下, 各地类变化趋势与现在保持一致; 在社会经济快速发展情景下, 建设用地面积增加明显, 主要由旱地和其他用地转入; 在基本农田保护情景下, 耕地面积比较稳定, 各地类变化趋势较为缓和; 在土地利用规划情景下, 各地类变化较为合理, 兼顾耕地保护和经济发展。研究结果显示, 该方法对哈尔滨市双城区土地利用格局变化的驱动机制具有较好的解释作用。

**关键词:** 土地利用; 驱动力; 情景设置; 地理元胞自动机; 人工神经网络

**中图分类号:** TP183 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0254-08

## Driving Force Analysis and Scenarios Simulation of Land Use Based on Cell Automata Model

SUN Weijian<sup>1</sup> ZHANG Rongqun<sup>1</sup> AI Dong<sup>2</sup> WANG Dahai<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Simulation of land use spatial pattern can reveal the geological regularity and identify the driving factors of regional land use change from multi-scales, which is an important way to clarify land use changes process and pattern for the future period. This paper took Shuangcheng District in Harbin City as a case and developed a simulation model based on Cellular automata (CA) combined with Artificial neural network (ANN). Totally 14 driving force factors were selected from four aspects which had significant impact on land use change, including the distance variables, number of adjacent land use type, unit natural attribute and socio-economic factors. They were used in the ANN-CA model to simulate land use change of Shuangcheng District from 2002 to 2013. The accuracy of simulation was verified by using the actual interpretation data in 2013 and it was 85.26%, which showed the model could be used to simulate the LUCC of Shuangcheng District. Furthermore, the land use pattern in 2024 was simulated under four scenarios: natural endowment scenario, rapid economic development scenario, basic farmland protection scenario and land use planning scenario. The results showed that land use pattern presented obvious spatial diversity under different scenarios, different driving factors resulted in diverse changes of various land-use types, and socio-economic factors played an important role in the conversion of land use types. The study outcomes could provide scientific decision support for the sustainable utilization of land resources in Shuangcheng District.

**Key words:** land use; driving force; scenarios settings; geographical cellular automata; artificial neural network

收稿日期: 2017-07-12 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(20131100201)

作者简介: 孙玮健(1990—), 男, 博士生, 主要从事 3S 技术及其在资源环境领域的应用研究, E-mail: 825345806@qq.com

通信作者: 张荣群(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 3S 技术及其在资源环境领域的应用研究, E-mail: zhangrq@cau.edu.cn

## 引言

土地是人类赖以生存和发展的基础,土地利用/覆被变化(Land use/Land cover change,LUCC)直接影响着人类的生存环境,如气候、土壤、植被、生物多样性等,是全球气候和环境变化研究的重要内容<sup>[1-4]</sup>。土地利用/覆被变化是各种因素在时空上共同作用的结果,过程错综复杂,具有变化不连续性、景观镶嵌、类别混合等特点<sup>[5-6]</sup>,因此需要在深刻认识LUCC驱动力的基础上,选择简化和抽象化后的各种模型,利用动态模型模拟系统中各组成部分之间的相互作用,模拟LUCC的过程<sup>[7]</sup>。传统的土地利用/覆被变化模拟是以较大的行政区划单位或自然地理单元为研究对象,利用基于偏微分方程的连续预测模型和经验统计预测模型模拟各土地利用类型总量在时间维度上的变化趋势<sup>[8-10]</sup>,缺乏空间角度上对于LUCC各种驱动力因素相互作用的分析。后来提出的智能体模型、CLUE-S模型等虽然实现了时空模拟多种驱动力因素影响下的土地利用空间格局<sup>[11-14]</sup>,但多是从宏观角度分析土地利用格局变化过程、研究区域的整体变化规律和特征,无法模拟微观尺度上具体点位的变化情况。

元胞自动机模型是一种时间、空间、状态都离散,空间相互作用和时间因果关系都为局部的网格动力学模型,实现了自下而上模拟复杂系统时空演化过程<sup>[15-17]</sup>,解决了无法模拟地理现象在空间邻域上相互作用的问题。本文选取面临耕地保护和区域经济快速发展双向压力下的黑龙江省哈尔滨市双城区为例,利用元胞自动机模型,并选用人工神经网络作为其转换规则<sup>[18]</sup>,共同建立双城区土地利用格局模拟模型,实现多种驱动力因素影响下的双城区土地利用格局变化情景模拟,为当地土地资源的可持续开发利用和政府部门决策提供科学依据和决策支持。

## 1 研究区域与数据处理

### 1.1 研究区概况

双城区位于哈尔滨市西南部(图1),隶属于哈尔滨市管辖区,地处松花江南岸,地理位置为 $125^{\circ}41' \sim 126^{\circ}42' E$ 、 $45^{\circ}08' \sim 45^{\circ}43' N$ ,东西长85 km,南北宽65 km,全境总面积3 112 km<sup>2</sup>。成土母质为第四纪沉积物,形成了冲击沉积物质、冲击物质和风积物质3种地质类型。全区由冲积平原和河流阶地组成,地势平坦。属温带大陆性气候,年均气温4.4℃,有效积温2 700~2 900℃,年均降水量481 mm。水热条件配置较好,加之肥沃的黑土,为

农业的发展提供了优越的自然条件,双城区农业开发历史悠久,为重要的商品粮生产基地。近年来,随着地方经济的快速发展、人口数量的增加以及工业化、城市化等发展趋势,致使建设用地规模不断扩大,导致了区域发展对建设用地需求不断增加和耕地面积亟需保护的双向压力,土地资源亟需保护。

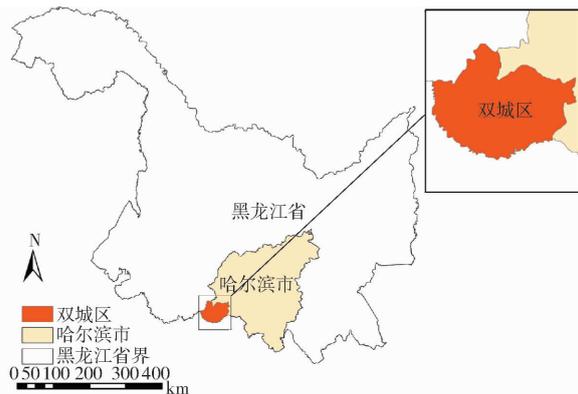


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

### 1.2 数据处理

本文采用2002年和2013年9月下旬的Landsat ETM+和OLI遥感数据,根据国家土地资源遥感监测分类系统,结合双城区土地利用特点,将土地利用类型划分为旱地、水田、建设用地、水体和其他用地等5种土地利用类型。在此基础上,采用支持向量机的监督分类与人机交互式的解译方法进行信息提取<sup>[19]</sup>,得到2个时期的土地利用分类图,如图2所示。分类后选取样本点,利用GPS进行图像分类精度的实地验证,结果表明各种土地利用/覆被的分类精度平均值达到87.00%以上,分类结果可以满足土地利用/覆被变化模拟的精度需要。在此基础上,研究中还需要利用双城区地形图、土地利用现状图、

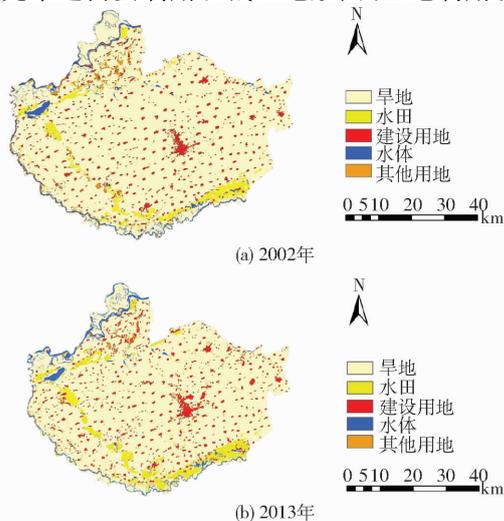


图2 2002年和2013年双城区土地覆被分类图

Fig. 2 Land cover classification map of 2002 and 2013 in Shuangcheng District

水利工程图、交通图等,统计年鉴和相关的调查报告等资料。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 元胞自动机模型

组成元胞自动机的基本要素有元胞、状态、邻域和转换规则<sup>[20]</sup>。表达式为

$$S_i^{t+1} = f(S_i^t, S_N^t) \quad (1)$$

式中  $S_i^{t+1}$ ——元胞  $i$  在  $t+1$  时刻的状态

$S_i^t$ ——元胞  $i$  在  $t$  时刻的状态

$S_N^t$ —— $t$  时刻元胞  $i$  的邻域状态集合

$f$ ——转换规则

元胞自动机的基本原理是元胞  $i$  在  $t+1$  时刻的状态是其在  $t$  时刻状态和邻域状态的函数<sup>[21]</sup>。

模型中的元胞状态定义为双城区土地利用类型,依次为旱地、水田、建设用地、水体、其他用地。元胞空间为二维,形状为四边形,元胞大小设定为  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ,邻域采用经典的 8 邻域的 Moore 模型。

元胞自动机模型的核心是其转换规则,转换规则中的参数设定对于模拟结果会产生直接影响,土地利用变化的时空发展过程是非线性系统动力学过程,因此选用人工神经网络作为元胞自动机的转换规则<sup>[22]</sup>。神经网络具有自组织、自学习、联想以及记忆的优势,能够有效地简化模型结构,用户不需要定义转化规则<sup>[23-25]</sup>,系统能够从原始数据中自动获取和校验模型中各空间变量的权重系数,能够挖掘出符合变化过程的转换规则,同时减少了人为因素的主观影响,适合文中土地利用变化时空模拟研究。

#### 1.3.2 ANN-CA 模型结构

本文采用的 ANN-CA 模块由训练模块和预测模块两部分组成,2 个模块共用一个神经网络。训练模块利用训练数据自动挖掘模型参数,预测模块用训练好的模型进行预测模拟。在此模型中,各影响因子的处理、分析及模拟结果的显示均在 ArcGIS 中操作,ANN 负责提供地理元胞自动机的转换规则。

神经网络的设计采用面向对象的建模思路。研究中使用经典的 BP 神经网络算法,网络结构分为三层:第 1 层为数据输入层,共 14 个神经元,分别对应土地利用变化各影响因子;第 2 层为隐含层,根据 Kolmogorov 定理,对于 3 层非线性神经网络,其隐含层的神经元个数至少为输入层的  $2/3$ <sup>[26]</sup>,研究中经过反复实验,隐含层神经元确定为 10 个,采用 tansig 激励函数;第 3 层为输出层,由 5 个神经元组成,分别对应 5 类土地利用类型的转换概率,采用 logsig 激励函数。本文的技术路线图如图 3 所示。

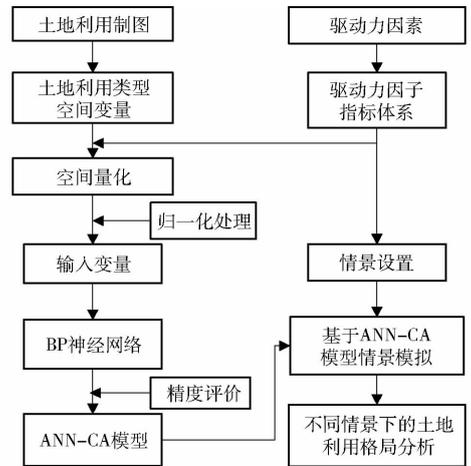


图3 技术路线图

Fig. 3 Technology road map

## 2 模型构建

### 2.1 ANN-CA 模型参数

根据前人关于土地利用驱动力因素的研究<sup>[27]</sup>,土地利用类型的变化取决于和其相关的距离变量,包括各元胞与最近道路和居民点的距离、窗口中邻近现有类型的其他土地利用类型元胞的数量、单元的社会因素及其自然属性等驱动力因子。通过剔除明显共线因子,本文选取 14 个驱动力因子作为 ANN-CA 模型的输入变量,这些驱动力因子的获取方法如下:

(1) 距离变量:利用已有的矢量格式的道路线图、居民点点图层和 2002 年的土地利用类型分布图,利用 ArcGIS 分析工具中的近邻分析功能,计算 2002 年土地利用类型点图层中每一个点与最近道路和居民点的距离,生成的结果数据保存在 2002 年土地利用类型点图层属性表中。

(2) 邻近现有土地类型数量:经过多次反复实验,验证领域窗口大小为  $3 \times 3$  时精度较高,因此研究设定领域窗口为  $3 \times 3$ 。

(3) 单元自然属性:高程数据的处理是在 ArcGIS 中将已经提取出来的双城区数字高程模型转为整型。降水量、蒸发量等驱动力因子在图层中进行空间赋值,利用空间分析功能中的 Kriging 插值建立驱动力因子的空间数据库。

(4) 社会经济因素:人口密度、粮食产量和人均 GDP 等数据同降水量等数据的处理方式相同。

所有数据转换为 UTM 投影, WGS84 坐标系,并统一生成 ASCII\_GRID 格式的数据。为了避免各空间变量量纲不统一而可能产生误差,最后将所有数据进行归一化处理,使其范围在  $0 \sim 1$  之间。模型中,输入层的 14 个神经元对应的 14 个驱动力因子原始数据范围见表 1。

表 1 模型输入变量  
Tab.1 Model input variables

空间变量	获取方法	原始数据范围
与最近道路的距离 ( $x_1$ )	利用 Analysis Tools	0 ~ 6.2 km
与最近居民点的距离 ( $x_2$ )	模块中的 Near 命令	0 ~ 5 km
邻近旱地的单元数量 ( $x_3$ )		0 ~ 9 单元
邻近水田的单元数量 ( $x_4$ )		0 ~ 9 单元
邻近建设用地的单元数量 ( $x_5$ )	利用 Matlab 编写	0 ~ 9 单元
邻近水体的单元数量 ( $x_6$ )		0 ~ 9 单元
邻近其他用地的单元数量 ( $x_7$ )		0 ~ 9 单元
高程 ( $x_8$ )	利用 ARC/INFO TIN 转换为 ARC/INFO GRID	120 ~ 210 m
年降水量 ( $x_9$ )	利用 Spatial Analysis	509.3 ~ 539.4 mm
年平均气温 ( $x_{10}$ )	模块中的 Kriging 插值	4.8 ~ 5.4 °C
现有土地利用类型 ( $x_{11}$ )		建设用地、水体、旱地、水田、其他用地
人口密度 ( $x_{12}$ )		127 ~ 350 人/km <sup>2</sup>
粮食产量 ( $x_{13}$ )	利用 Spatial Analysis 模块中的 Kriging 插值	7.1 ~ 7.6 t/km <sup>2</sup>
人均 GDP ( $x_{14}$ )		11 184 ~ 13 105 元

本文主要研究双城区 5 种土地利用类型的变化情况,在特定时刻某种类型的元胞只能转化为别的土地利用类型或者保持不变。因此本研究使用元胞的转移概率作为模型的输出变量,并将转移概率最大的土地利用类型确定为当前元胞转换的类型。

## 2.2 ANN-CA 模型训练

为了实现土地利用变化的时空模拟,本文建立了地理元胞自动机的训练、验证和模拟预测数据库,将 2002 年土地利用空间变量作为训练数据库、验证数据库。由于空间变量的数据量较大,因此本研究采用随机抽取样本的方法,从建立的双城区空间数据库中抽取约 1% 的数据用于模型训练和验证,将 2002 年土地利用空间变量的全部数据作为 ANN-CA 模型的模拟数据库。运行模型时,首先将训练数据输入 BP 神经网络自动获取模型参数,然后输入验证数据进行验证,如果验证精度满足要求,则利用该模型模拟 2013 年的土地利用类型空间分布。

## 2.3 模型精度评价

土地利用格局的形成与演化受到自然、社会、经济、技术等多种因素的共同影响,精确模拟土地利用变化是非常困难的,因此模拟土地利用的整体格局和变化趋势显得更加重要。图 4 所示为哈尔滨市双城区 2013 年实际土地利用与模拟土地利用的对比图,模拟结果整体空间布局与实际整体空间布局保持了较高的一致性,其中中部、南部地区的建设用地和水田模拟精度较高。西北部一些地区建设用地、其他用地、旱地交错分布,相互间转换较为频繁,所以模拟结果误差相对较大。

对于模拟精度的评价,本文采用逐点比较的方法,将 2013 年实际土地利用图与模拟土地利用图进行对比,计算各土地利用类型的模拟精度和 Kappa

系数,精度评价结果如表 2 所示。从表中可以看出,旱地、建设用地、水体的模拟精度和 Kappa 系数分别为 86.93%、81.52%、82.12% 和 0.848、0.787、0.812;这 3 种地类模拟精度都在 80% 以上,具有较高的精度。水田和其他用地的模拟精度和 Kappa 系数分别为 78.64%、75.18% 和 0.752、0.735,相对于其他 3 种地类精度较低,但也都达到 75% 以上;各类型土地模拟总精度为 85.26%,说明模拟结果与实际土地利用情况具有较好的一致性。综上可知,本文建立的 ANN-CA 模型对于双城区土地利用模拟具有较好的适用性。

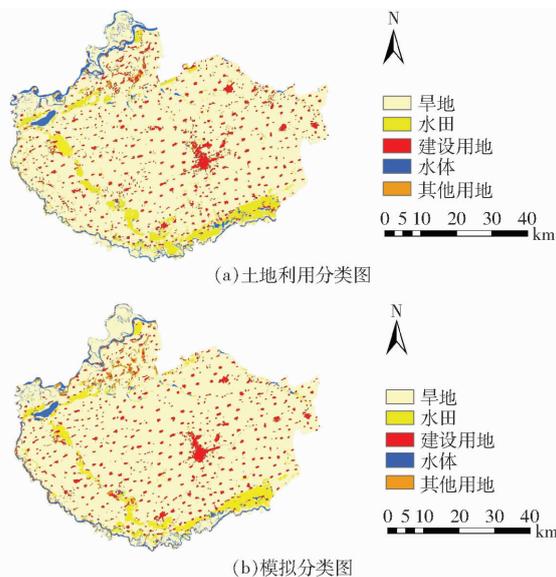


图 4 2013 年双城区土地利用分类图和模拟分类图  
Fig. 4 Land use classification map and simulation classification map of 2013 in Shuangcheng District

## 3 驱动力情景模拟分析

根据国内外相关情景设计的研究成果<sup>[28-30]</sup>,结

表2 模拟结果精度评价  
Tab.2 Accuracy assessment of simulation result

参数	土地利用类型				
	旱地	水田	建设用地	水体	其他用地
2013年实际数据/hm <sup>2</sup>	259 967	18 189	22 981	7 166	2 897
2013年模拟数据/hm <sup>2</sup>	262 589	16 853	20 859	7 481	3 418
模拟精度/%	86.93	78.64	81.52	82.12	75.18
Kappa系数	0.848	0.752	0.787	0.812	0.735
模拟总精度/%			85.26		

合2002—2013年双城区土地利用变化特征并综合考虑哈尔滨市双城区土地利用的资源环境条件和社会经济技术因素,建立自然禀赋、社会经济快速发展、基本农田保护和土地利用总体规划等4种情景,对双城区2024年土地利用格局变化进行了时空模拟分析。

### 3.1 情景设定

#### (1)情景1:自然禀赋情景

该情景模式下,双城区土地利用变化的驱动力因素并没有发生大的改变,各土地利用类型的变化依然遵循2002—2013年研究区土地利用变化趋势。即旱地和其他用地面积减少,水田和建设用地的规模继续增加,水体面积保持稳定。在此情景下,得到未来各种土地利用类型的空间分布。

#### (2)情景2:社会经济快速发展情景

2002—2013年是双城区经济快速发展的阶段,其发展水平和增速较以往阶段都有显著提高,人均GDP从11 184元增长到52 209元。在此背景下,该情景根据哈尔滨市十二五规划、十三五规划大纲及双城市2002—2013年的经济发展水平,设定双城区2013—2024年人均GDP继续保持较高增长水平,人均GDP年增加14%,同时适当调整其他影响经济发展的因素,在此情景下得到各个土地利用类型的空间分布。

#### (3)情景3:基本农田保护情景

双城区耕地数量较多,土壤肥力较高,机械化程度很高,粮食总产量在哈尔滨市各区县中位于前列,为了保护双城区耕地,同时促进建设用地的集约利用率提高,该情景设定双城区范围内耕地的转变条件,严格控制研究区内旱地、水田向建设用地的转变,在此约束条件下得到研究区各地类的空间分布。

#### (4)情景4:土地利用总体规划情景

双城区属于哈尔滨市区的卫星城,工业和农业发达,根据双城区2013—2030土地利用总体规划,为了保护双城区耕地质量,优化各乡镇土地利用空间布局,提高当地土地利用集约化程度,该情景对不同类型土地面积做了相应规划,包括城乡建设用地

和工矿用地在内的建设用地规模控制在25 273 hm<sup>2</sup>以内,基本农田面积保持在197 400 hm<sup>2</sup>以上,耕地总面积中基本农田要占80%以上,适当改变种植结构,提高粮食作物中水稻的比例,同时加大力度保护双城区范围内的湿地、林草地等生态用地,维持当地土地生态系统的稳定。在此基础上,模拟各地类的空间分布。

### 3.2 土地利用变化驱动力分析

在2002—2013年土地利用变化数据的基础上,根据不同的情景适度调整模型参数,在此基础上借助ANN-CA模型对2024年不同情景下双城区各种土地利用类型的需求量进行模拟(图5),并得到相应情景下的各土地利用类型面积(表3)。由图5可以看出,不同情景下土地利用类型的空间分布格局也呈现差异性。

在自然禀赋情景下,建设用地的规模继续扩大,主要分布在研究区中心的双城镇周边和西北部靠近太平国际机场的临江乡和永胜乡等地区,这些地区经济发展速度较快,特别是工业发展需要大量的建设用地,这些地区建设用地主要来源于各乡镇周边的耕地;同时,在灌溉条件较好的地区,由于种植结构的转变,有一些旱地转变成了水田,水体和其他用地的变化趋势较小。在社会经济快速发展情景下,建设用地较2013年增加明显,共增加5 667 hm<sup>2</sup>,主要由于旱地和其他用地转入,水体为了满足经济发展也呈下降趋势,而水田呈增加趋势。在基本农田保护情景下,由于对耕地的面积做了限制,所以建设用地、水体和其他用地的变化趋势较为缓和,变化较大的是水田面积,主要通过改造旱地得到。在土地利用规划情景下,各地类变化趋势较为合理,兼顾了社会经济发展和基本农田的保护,建设用地的变化趋势较为缓和。为了提高研究区的农业经济效益,一部分旱地改变了种植结构被开发成水田,在该情景下,包含了各种生态用地的其他用地面积较2013年有所增加,在一定程度上也改善了生态环境,促进了区域可持续发展。经济快速发展的背景下,土地利用变化过程涉及因素错综复杂,社会、人为等驱动

力因素对于土地利用变化的影响程度日益加大,其中存在一些难以空间量化的因素,变量的获取方式和指标体系的选择都会对模拟结果产生一定影响,后续研究中也需结合其他模型进行深入研究;同

时由于神经网络内部的自组织、自学习等特性,模型中一些参数的具体意义还不能够深入理解,如何改进神经网络的结构来提高元胞自动机转换规则的精度也是今后研究的重点。

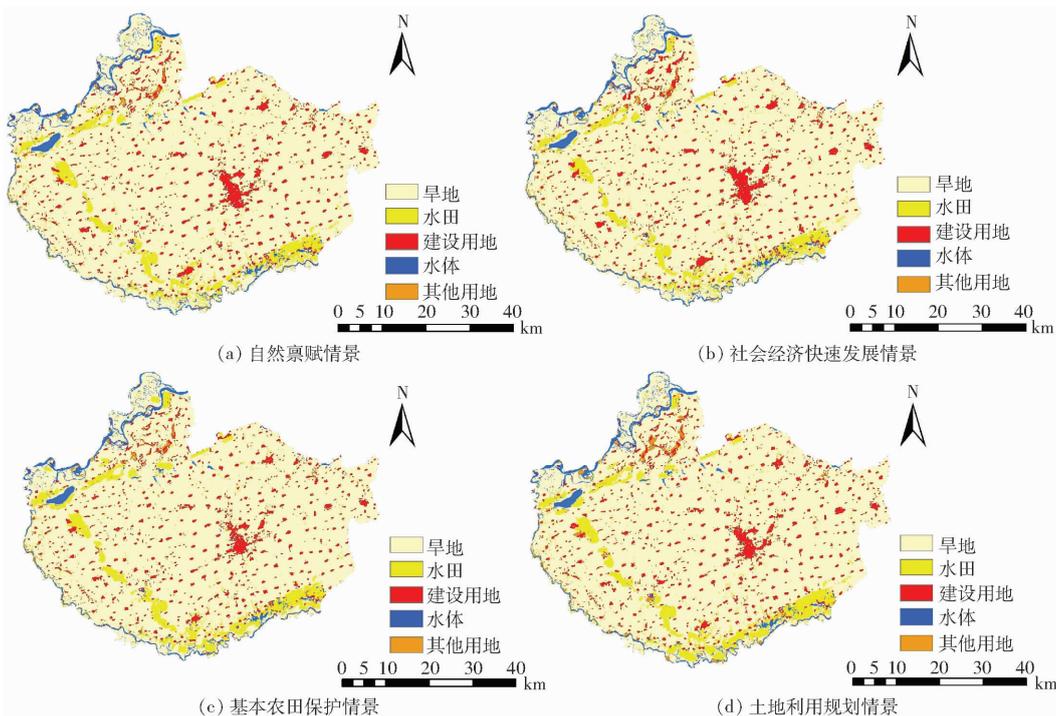


图5 不同情景下的双城区2024年土地利用格局

Fig. 5 Simulation of land use pattern under different scenarios in Shuangcheng District in 2024

表3 双城区不同情景下土地利用类型面积

Tab. 3 Area of land-use types under different scenarios in Shuangcheng District

hm<sup>2</sup>

年份	模拟情景	旱地	水田	建设用地	水体	其他用地
2013年		259 967	18 189	22 981	7 166	2 897
	自然禀赋情景	253 526	22 761	25 464	6 869	2 580
2014年	社会经济快速发展情景	252 951	22 402	27 648	6 068	2 131
	基本农田保护情景	253 012	24 470	23 589	7 102	3 027
	土地利用总体规划情景	250 143	25 537	24 407	7 265	3 848

## 4 结论

(1) 本文在分析各种驱动力因素的基础上,利用地理元胞自动机与人工神经网络建立的双城区土地利用格局模拟模型,充分考虑了地理现象在空间上的相互作用和时间上的因果关系,较为理想地实现了土地利用变化驱动力的可视化分析,在精细尺度上研究了土地利用变化和驱动力因子之间的响应关系,为土地利用变化研究提供了新的方法途径。

(2) 以2013年实际解译数据对比验证,土地利用模拟总精度为85.26%,说明了ANN-CA模型能够适用于研究区土地利用变化模拟。在此基础上,研究构建了4种情景方案进行模拟,得到了不同情景下的土地利用变化情况,对比不同情景下的模拟结果,获取了容易发生土地利用变化的敏感区域和关键的驱动力因素,可以为双城区土地利用规划的制定提供科学的决策支持,使土地利用规划在保护基本农田的基础上最大程度地满足社会经济发展的合理用地需求。

## 参 考 文 献

- 1 MOONEY H A, DURAIAPPAH A, LARIGAUDERIE A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(Supp. 1): 3665 - 3672.
- 2 STERLING S M, DUCARNE A, POLCHER J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle[J]. Nature

- Climate Change, 2013, 3(4): 385 – 390.
- 3 MILLER M L, RINGELMAN K M, SCHANK J C, et al. SWAMP: an agent-based model for wetland and waterfowl conservation management[J]. Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International, 2014, 90(1): 52 – 68.
- 4 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3 – 14.  
LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatio-temporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3 – 14. (in Chinese)
- 5 MEYFROIDT P, LAMBIN E F, ERB K H, et al. Globalization of land use: distant drivers of land change and geographic displacement of land use[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(5): 438 – 444.
- 6 BENOÎT M, LAMBIN E F. Land-cover-change trajectories in southern cameroon[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2000, 90(3): 467 – 494.
- 7 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 456 – 468.  
TANG Huajun, WU Wenbin, YANG Peng, et al. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4): 456 – 468. (in Chinese)
- 8 赵冬玲, 杜萌, 杨建宇, 等. 基于 CA – Markov 模型的土地利用演化模拟预测研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 278 – 285. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160339&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160339&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.039.  
ZHAO Dongling, DU Meng, YANG Jianyu, et al. Simulation and forecast study of land use change based on CA-Markov model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 278 – 285. (in Chinese)
- 9 黄庆旭, 史培军, 何春阳, 等. 中国北方未来干旱化情景下的土地利用变化模拟[J]. 地理学报, 2006, 61(12): 1299 – 1310.  
HUANG Qingxu, SHI Peijun, HE Chunyang, et al. Modelling land use change dynamics under different aridification scenarios in northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(12): 1299 – 1310. (in Chinese)
- 10 吴季秋, 俞花美, 肖明, 等. 基于 CA – Markov 模型的海湾土地利用动态预测[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(6): 531 – 539.  
WU Jiqiu, YU Huamei, XIAO Ming, et al. Dynamic prediction for gulf land use based on CA – Markov model[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(6): 531 – 539. (in Chinese)
- 11 袁满, 刘耀林. 基于多智能体遗传算法的土地利用优化配置[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 191 – 199.  
YUAN Man, LIU Yaolin. Land use optimization allocation based on multi-agent genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 191 – 199. (in Chinese)
- 12 VALBUENA D, VERBURG P H, BREGT A K, et al. An agent-based approach to model land-use change at a regional scale[J]. Landscape Ecology, 2010, 25(2): 185 – 199.
- 13 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 基于多智能体的居住区位空间选择模型[J]. 地理学报, 2010, 65(6): 695 – 707.  
LIU Xiaoping, LI Xia, CHEN Yimin, et al. Agent-based model of residential location[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(6): 695 – 707. (in Chinese)
- 14 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷. 基于 SD 和 CLUE – S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J]. 地理研究, 2011, 30(3): 564 – 576.  
LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE – S model at regional scale: a case study of Ganzhou district of Zhangye city[J]. Geographical Research, 2011, 30(3): 564 – 576. (in Chinese)
- 15 GARCÍA A M, SANTÉ I, BOULLÓN M, 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.
- 16 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 461 – 475.  
YANG Jun, XIE Peng, XI Jianchao, et al. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: a case study of Dalian Economic and Technological Development Zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 461 – 475. (in Chinese)
- 17 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): 188 – 195.  
HE Chunyang, CHEN Jin, SHI Peijun, et al. Study on the spatial dynamic city model based on CA (cellular automata) model [J]. Advance In Earth Sciences, 2002, 17(2): 188 – 195. (in Chinese)
- 18 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 Xia, YE Jia'an. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks [J]. Geographical Research, 2005, 24(1): 19 – 27. (in Chinese)
- 19 林楠, 姜琦刚, 杨佳佳, 等. 基于资源一号 02C 高分辨率数据的农业区土地利用分类[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 278 – 284. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150139&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150139&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.039.  
LIN Nan, JIANG Qigang, YANG Jiajia, et al. Classifications of agricultural land use based on high-spatial resolution ZY1 – 02C remote sensing images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 278 – 284. (in Chinese)
- 20 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1 – 163.
- 21 ZHANG Yihan, LI Xia, LIU Xiaoping, et al. Self-modifying CA model using dual ensemble Kalman filter for simulating urban land-use changes[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 29(9): 1612 – 1631.

- 22 黎夏,叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟[J]. 地理学报,2002,57(2):159-166.  
LI Xia, YE Jia'an. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 159-166. (in Chinese)
- 23 PACIFICI F, CHINI M, EMERY W J. A neural network approach using multi-scale textural metrics from very high-resolution panchromatic imagery for urban land-use classification[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1276-1292.
- 24 赵晶,陈华根,许惠平. 元胞自动机与神经网络相结合的土地演变模拟[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(8):1128-1132.  
ZHAO Jing, CHEN Huagen, XU Huiping. Simulation of land use evolution based on cellular automata and artificial neural network[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(8): 1128-1132. (in Chinese)
- 25 QIANG Y, LAM N S N. Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2015, 187(3): 1-16.
- 26 黎夏,叶嘉安. 地理模拟系统:元胞自动机与多智能体[M]. 北京:科学出版社,2007.
- 27 任志远,李冬玉,杨勇. 关中地区土地利用格局模拟与驱动力分析[J]. 测绘科学,2011,36(1):105-108.  
REN Zhiyuan, LI Dongyu, YANG Yong. Simulation and driving force analysis of land use pattern in Guanzhong region, Shaanxi province[J]. Science of Surveying & Mapping, 2011, 36(1): 105-108. (in Chinese)
- 28 韩会然,杨成凤,宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. 地理科学进展,2015,34(8):976-986.  
HAN Huiran, YANG Chengfeng, SONG Jinping. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios [J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 976-986. (in Chinese)
- 29 谢中凯,李飞雪,李满春,等. 政府规划约束下的城市空间增长多智能体模拟模型[J]. 地理与地理信息科学,2015,31(2):60-64.  
XIE Zhongkai, LI Feixue, LI Manchun, et al. Multi-agent-based simulation model of urban spatial expansion under government planning[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(2): 60-64. (in Chinese)
- 30 张利,周亚鹏,门明新,等. 基于不同种类生态安全的土地利用情景模拟[J]. 农业工程学报,2015,31(5):308-316.  
ZHANG Li, ZHOU Yapeng, MEN Mingxin, et al. Land use scenario simulation with different types of ecological security[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 308-316. (in Chinese)

(上接第 122 页)

- 10 孙通,徐惠荣,应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2008,29(1):122-126.  
SUN Tong, XU Huirong, YING Yibin. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 29(1): 122-126. (in Chinese)
- 11 陆元洲,江朝晖,李想,等. 植物水分含量检测综述[J]. 中国农学通报,2015,31(9):168-177.  
LU Yuanzhou, JIANG Zhaohui, LI Xiang, et al. The review of plant moisture content detection [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(9):168-177. (in Chinese)
- 12 方孝荣,高俊峰,谢传奇,等. 农作物冠层光谱信息检测技术及方法综述[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(7):1949-1955.  
FANG Xiaorong, GAO Junfeng, XIE Chuanqi, et al. Review of crop canopy spectral information detection technology and methods [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(7): 1949-1955. (in Chinese)
- 13 THOMAS J R, NAMKEN L N, OERTHER G F, et al. Estimating leaf water content by reflectance measurement[J]. Agronomy Journal, 1971, 63:845-847.
- 14 CURRAN P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3):271-278.
- 15 殷哲,雷廷武,陈展鹏,等. 近红外传感器测量不同种类土壤含水率的适应性研究[J]. 农业机械学报,2014,45(3):148-151.  
YIN Zhe, LEI Tingwu, CHEN Zhanpeng, et al. Adaptability of near infrared sensor for moisture measurement of different soils [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 148-151. (in Chinese)
- 16 曾水生,李艳大,舒时富,等. 光谱技术在水稻生长监测中的应用研究进展[J]. 农学学报,2015,5(2):100-104.  
ZENG Shuisheng, LI Yanda, SHU Shifu, et al. Application of spectrum technique in monitoring rice growth [J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(2):100-104. (in Chinese)
- 17 田庆久,宫鹏,赵春江,等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J]. 科学通报,2000,45(24):2645-2650.
- 18 林毅,李倩,王宏博,等. 高光谱反演植被水分含量研究综述[J]. 中国农学通报,2015,31(3):167-172.  
LIN Yi, LI Qian, WANG Hongbo, et al. Research summary of vegetation water content inversion with hyperspectral technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3):167-172. (in Chinese)
- 19 王纪华,赵春江,郭晓维,等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究[J]. 中国农业科学,2001,34(1):104-107.  
WANG Jihua, ZHAO Chunjiang, GUO Xiaowei, et al. Study on the water status of the wheat leaves diagnosed by the spectral reflectance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(1): 104-107. (in Chinese)
- 20 李玉鹏,凌智钢,苟正贵,等. 烤烟叶片含水量的光谱检测模型研究[J]. 中国农学通报,2013,29(34):158-161.  
LI Yupeng, LING Zhigang, GOU Zhengui, et al. Study on spectral monitoring model of tobacco water content [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(34): 158-161. (in Chinese)