

# 基于 Logistic-CA-Markov 耦合模型的彬州市 LUCC 多情景模拟

李世锋<sup>1</sup>, 洪增林<sup>1,2</sup>, 薛旭平<sup>2</sup>, 张锋军<sup>3</sup>, 石卫<sup>3</sup>

(1.长安大学 土地工程学院, 西安 710054; 2.陕西省地质调查院, 西安 710054; 3.陕西省水工环地质调查中心, 西安 710068)

**摘 要:**土地利用变化多情景模拟可为区域的土地规划、生态城市建设和区域生态环境保护提供科学的参考依据。基于彬州市 2009 年和 2019 年土地利用数据,运用 GIS 软件空间分析功能和土地利用动态模型对研究区土地利用变化进行时空分析,从自然因素和社会经济因素中选取 7 种驱动因子,用 Logistic 模型进行回归分析,再运用 Logistic-CA-Markov 耦合模型,以研究区 2009 年土地利用为基期,模拟 2019 年土地利用变化并对预测结果精度验证。最后以 2019 年为基期数据,在自然发展、生态保护和限制城市过度开发 3 种情景下,预测了 2029 年研究区土地利用类型的空间格局。结果表明:研究区 10 年间的土地利用综合动态度为 5.57%,土地利用变化显著;驱动因子的回归分析通过有效性检验,预测 2019 年土地利用变化的 Kappa 系数值为 0.761 2,预测结果可信。在自然发展情景下,2029 年彬州市建设用地面积增长 40.54%,耕地和水域面积分别减少 27.31%,3.84%,或对研究区的生态平衡造成威胁;在生态保护和限制城市过度开发两种情景下,建设用地面积得到控制,水域、耕地等生态用地得到保护,有利于彬州市的可持续发展。

**关键词:**LUCC; Logistic-CA-Markov 耦合模型; 驱动因子; 多情景模拟; 彬州市

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0292-08

## Multi-Scenario Simulation of LUCC in Binzhou City Based on Logistic-CA-Markov Coupling Model

LI Shifeng<sup>1</sup>, HONG Zenglin<sup>1,2</sup>, XUE Xuping<sup>2</sup>, ZHANG Fengjun<sup>3</sup>, SHI Wei<sup>3</sup>

(1.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054,

China; 2.Shaanxi Geological Survey Institute, Xi'an 710054, China; 3.Shaanxi Hydrogeology

Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** The multi-scenario simulation of land use change can provide a scientific reference for regional land planning, ecological city construction and regional ecological environmental protection. Based on the land use data of Binzhou City in 2009 and 2019, the spatial analysis function of GIS software and the dynamic model of land use were used to analyze the land use changes in the study area in time and space. Seven driving factors were selected from natural factors and socio-economic factors for regression analysis using Logistic model, and then the Logistic-CA-Markov coupling model was used to simulate the land use change in 2019 and verify the accuracy of the prediction results based on the 2009 land use data in the study area. Finally, based on the basic data of 2019, the spatial pattern of land use types in the study area in 2029 was predicted under the three scenarios of natural development, ecological protection and restriction of urban overdevelopment. The results show that the comprehensive dynamic degree of land use in the study area in the past 10 years was 5.57%, and the land use had changed significantly; the regression analysis of driving factors passed the validity test, and predicted that the Kappa coefficient value of land use change in 2019 was 0.761 2, and the prediction result is credible; under the natural development scenario, the area of construction land in Binzhou City will increase by 40.54% in 2029, and the area of cultivated land and water area will decrease by 27.31% and

收稿日期:2021-06-23

修回日期:2021-07-04

资助项目:陕西省土地整治重点实验室资助项目“陕北典型采矿区土壤污染研究”(2019-ZY01)

第一作者:李世锋(1993—),男,陕西安康人,博士研究生,研究方向为国土空间规划。E-mail:1261335913@qq.com

通信作者:洪增林(1963—),男,甘肃陇西人,博士,教授,主要从事土地资源管理、区域经济、系统工程研究。E-mail:lhqhhl@163.com

3.84%, respectively, which may threaten the ecological balance of the study area; under the two scenarios of ecological protection and restricting urban overdevelopment, the area of construction land is controlled, and the ecological land such as water area and cultivated land is protected, which is conducive to the sustainable development of Binzhou City.

**Keywords:** LUCC; Logistic-CA-Markov coupling model; driving factor; multi-scenario simulation; Binzhou City

土地利用/覆盖变化(land use/cover change,LUCC)影响区域社会经济、生态环境,进而引发区域生态系统、景观格局及功能的演变<sup>[1-3]</sup>。由于人类对土地利用的方式具有能动性和调控力,使得土地利用/覆盖变化导致许多自然现象和生态过程的变化,因此对土地利用变化的驱动力分析及模拟预测研究一直是 LUCC 研究热点领域之一。基于对区域土地利用过程变化及其驱动因子分析,并且进行多情景动态模拟,预测未来土地利用空间分布情况,可为区域土地资源合理开发利用、规划以及生态环境保护提供支持和借鉴。

目前,国内外对于 LUCC 的分析和模拟有很多种模型,有数量预测模型,如马尔科夫模型(Markov)<sup>[4]</sup>、Logistic 回归模型<sup>[5]</sup>、灰色预测模型(Gary Forecast Model)等<sup>[6]</sup>;有空间预测模型,如元胞自动机模型(CA)<sup>[7]</sup>、CLUE-S 模型<sup>[8-10]</sup>、FLUS 模型等<sup>[11]</sup>;有耦合模型,如 CA-Markov 模型<sup>[12-14]</sup>、CA-MAS 模型<sup>[15]</sup>、Logistic-CA-Markov 模型等<sup>[16]</sup>。其中,Logistic 回归模型常用于定量分析驱动因子与 LUCC 之间的相关性,并且能预测在当前的情况下出现某地类的概率,但模拟结果只能是数量上的变化,在空间分布上体现不出来<sup>[17]</sup>。马尔科夫(Markov)模型预测未来较长时间内土地数量有绝对的优势,但不能预测土地利用空间分布格局的变化<sup>[18]</sup>。元胞自动机(CA)模型可以有效模拟元胞之间的相互作用,在空间分析和模拟运算有独特且强大的能力,但存在局限性<sup>[19]</sup>。将 Logistic 回归模型、CA 模型和 Markov 模型进行耦合,形成 Logistic-CA-Markov 模型,既能识别预判驱动因子与 LUCC 的显著关系并预测各地类分布的概率,为后续制作土地转变适宜性图集,校正元胞自动机的转换规则提供基础支撑,又能在数量和空间模拟土地利用变化,这样可以大大提高预测精度。

本文以陕西省彬州市为例,基于 2009 年和 2019 年土地利用数据、DEM 数据、坡度数据、交通道路数据、规划数据、经济社会数据、水域数据等,通过 GIS 软件空间分析功能对土地利用结构和利用动态度进行时空演变分析,对影响彬州市土地利用变化的驱动因子进行 Logistic 回归分析,运用 Logistic-CA-Markov 模型,以研究区 2009 年为基期,模拟预测 2019 年土地利用变化,将预测的结果与 2019 年实际

土地利用数据进行对比,计算其 Kappa 系数验证模拟精度,最后分别在自然发展、生态保护和限制城市过度开发 3 种情景下对研究区 2029 年土地利用变化进行模拟预测,分析得出结果。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

彬州市位于陕西省渭北高原西部、咸阳市西北部,陕甘边界地区,属陇东黄土高原原梁丘陵沟壑区,地势西南高东北低,介于东经 107°49′—108°22′,北纬 34°51′—35°17′,全市土地总面积 1 183.59 km<sup>2</sup>,约占陕西省总面积的 6%,区域内海拔为 715~1 500 m。泾河自西北向东斜贯中部,将彬州市分割成东北、西南两塬夹川道的地貌格局。研究区属于暖温带半干旱大陆性季风气候,具有雨热同季,寒暑极端,四季分明,光能资源丰富,降水时空分布不均的特点,年平均日照数 2 210.8 h,年日照分率为 52%,年均气温 9.7℃,极端最高温 40℃,极端最低温 -22.5℃,全年无霜期 172~177 d,年均降水量 561.4 mm。彬州市共有 5 个土类,分别为黑垆土、黄绵土、红土、淤土和潮土,其中黑垆土和黄绵土分布最广,也是主要的农业土壤。

### 1.2 数据来源

本研究所需的土地利用数据来源于土地调查数据,依托项目为《彬州市国土空间规划》,这与常规的从 Landsat-TM 遥感数据中识别、解译和提取土地利用/覆被信息相比,避免了解译正确率这一误差,精度更高。研究区高程(DEM)数据来源于中国科学院地理空间数据云,空间分辨率为 30 m×30 m。坡度数据由 DEM 数据在 GIS 空间分析工具得出,经济社会数据来源于中科院资源环境科学数据中心以及彬州市 2009 年和 2019 年统计年鉴。道路交通数据、规划数据及水域数据来源于《彬州市总体规划(2015—2030)》。

## 2 研究方法

### 2.1 数据处理

将收集的研究区 2009 年和 2019 年土地利用数据在 GIS 提取土地利用类型矢量数据,并分别将这两年的矢量数据投影成相同的坐标系统,利用 GIS 数据管理工具中 Dissolve 对其矢量数据进行融合,使其数据研究范围

完全重合。根据《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)以及本次研究的重点,将土地利用类型划分为 7 类:耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域和其他土地。DEM 数据通过 GIS 软件进行镶嵌、整合、裁剪为范围一致的栅格数据,再根据 GIS 空间分析工具中 Slope 将 DEM 数据转换为坡度数据。经济社会数据主要包括 GDP 和人口密度,以栅格为单元进行处理,利用 GIS 软件进行裁剪,使其和研究区范围一致。

## 2.2 土地利用动态变化的空间分析模型

某一区域的某单一土地利用类型  $i$  在某段时期的转移速率和新增速率计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$TRL_i = \frac{LA(i, t_1) - ULA_i}{LA(i, t_1)} / (t_2 - t_1) \times 100\% \quad (1)$$

$$IRL_i = \frac{LA(i, t_2) - ULA_i}{LA(i, t_1)} / (t_2 - t_1) \times 100\% \quad (2)$$

某一区域综合土地利用动态度的计算公式如下:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n [LA(i, t_1) - ULA_i]}{\sum_{i=1}^n LA(i, t_1)} / (t_2 - t_1) \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $TRL_i$  为转移速率;  $LA(i, t_1)$  为研究初期  $t_1$  第  $i$  种土地利用类型的面积;  $ULA_i$  为研究期间第  $i$  种土地利用类型没有发生变化的面积;  $IRL_i$  为新增速率;  $LA(i, t_2)$  为研究末期  $t_2$  第  $i$  种土地利用类型的面积;  $S$  为区域土地利用综合变化率;  $t_1$  和  $t_2$  分别为研究初期和末期的时间。面积单位均为  $\text{km}^2$ 。

## 2.3 Logistic 回归模型及模拟有效性检验

Logistic 回归模型可用于估算某个事件发生的可能性,并且能分析一个因变量与多个自变量之间的多元回归关系。本研究中,在考虑数据的可获取性、数据在时间空间上的一致性以及因子具有空间差异性的基础上,选取高程、坡度、GDP、人口密度、距道路、行政中心、河流的距离 7 种作为驱动因子进行回归分析。公式如下<sup>[21]</sup>:

$$\text{logit}(P_i) = \ln \frac{P_i}{1 - P_i} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_m X_m \quad (4)$$

式中:  $p_i$  为出现某地类  $i$  的概率;  $\beta_0$  为常数项;  $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m$  为回归系数;  $X_1, X_2, \cdots, X_m$  为影响因子。  $p_i$  取值范围在  $0 \sim 1$ , 数值越大说明出现某地类的概率就越大,反之亦然。

将上式进行对数变换再推导出土地利用的空间分布概率<sup>[22]</sup>:

$$p_i = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_m X_m)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_m X_m)} \quad (5)$$

式中:  $\exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_m X_m)$  叫做事件

发生比,也称似然比,用  $\exp(B)$  表示,在本研究中,  $\exp(B)$  表示驱动因子每增加一个单位时土地利用类型发生比的变化情况:  $\exp(B) > 1$ , 发生比增加;  $\exp(B) < 1$ , 发生比减少;  $\exp(B) = 1$ , 发生比不变。

对于 Logistic 回归模型的拟合效果常用 ROC 曲线<sup>[23]</sup>进行验证,一般认为当 ROC 曲线面积值大于 0.7 时,模拟效果较好,满足研究需求。

## 2.4 Logistic-CA-Markov 模型构建

元胞自动机(CA)实质上是一种网格动力学模型<sup>[24]</sup>,其特点是时间、空间、状态都离散,根据空间相互作用和时间因果关系来模拟复杂系统的时空演变过程。CA 模型表达式如下<sup>[25]</sup>:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (6)$$

式中:  $S$  为元胞有限、离散的状态集合;  $N$  为元胞的邻域;  $t$  和  $t+1$  为不同时刻;  $f$  为元胞的转换规则。

马尔科夫模型(Markov)是离散时间随机模型,在土地利用预测领域运用比较多,它主要是根据过去和当前土地利用信息具体情况,计算出这两个时间段土地利用类型之间相互转移的面积数量和转移概率,进行下一时间点土地利用状态的预测。公式表达如下<sup>[26]</sup>:

$$S_{t+1} = P_{ij} \cdot S_t \quad (7)$$

式中:  $S_t, S_{t+1}$  为  $t, t+1$  时刻土地利用系统的状态;  $P_{ij}$  为状态转移矩阵。

本研究 CA-Markov 模型构建是基于 IDRISI 17.0 软件的支持下完成的<sup>[27]</sup>,具体过程如下:(1) 数据转换和重分类;(2) 确定研究区 2009—2019 年土地利用类型的转移面积矩阵和转移概率矩阵;(3) 根据前文回归分析结果,运用地图代数根据公式(5)计算得到各土地利用类型概率图,并用 IDRISI 软件集合编辑器建立各土地利用类型的适宜性图集;(4) 构造 CA 滤波器,本研究采用  $5 \times 5$  邻近滤波器为邻域定义;(5) 确定起始时刻及迭代次数。

本研究利用 Logistic 回归分析模型得出土地适宜性图集定义 CA 模型的转换规则,CA-Markov 模型进行预测,三者结合形成 Logistic-CA-Markov 模型。

## 2.5 模拟预测精度检验

Kappa 系数是一个用于一致性检验的指标,常用来检验模型预测结果和实际分类结果是否一致。其计算公式如下<sup>[28]</sup>:

$$\text{Kappa} = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad (8)$$

式中:  $P_0$  为预测一致的栅格占实际总栅格的比例;  $P_c$  为随机状态下模拟预测一致的栅格比例。当  $0 < \text{Kappa} < 0.4$  时,说明模拟预测结果与实际结果一致程度不够理想;当  $0.4 \leq \text{Kappa} < 0.75$  时,说明一致程



度一般,模拟预测精度处于中等;当 Kappa $\geq$ 0.75 时,说明模拟预测结果与实际结果达到高度的一致性,模拟效果很好,通过精度检验。

3 结果与分析

3.1 土地利用动态演变

通过 ArcGIS 10.2 对 2009 年和 2019 年研究区土地利用的矢量数据进行空间叠置分析,得到 2009—2019 年土地利用变化面积转移矩阵(表 1),依据该面积转移矩阵和公式(1)—(3)统计分析并计算各土地利用类型的转移速率,新增速率以及研究区总体土地利用动态度(表 2)。

由表 1 可知,研究区 2009—2019 年 10 年间各个土地利用类型的面积发生了不同的变化,其中,林地、建

设用地、园地和其他土地的面积分别增加了 191.94, 10.7,9.38,0.79 km<sup>2</sup>;草地、耕地和水域面积分别减少了 176.47,35.69,0.64 km<sup>2</sup>。在各土地利用类型转移面积中,草地和耕地转移的面积最多,分别为 232.29, 190.61 km<sup>2</sup>,其转移速率为 7.54%,5.26%;在各土地利用类型新增面积中,林地、耕地和园地新增面积最大,分别为 266.12,154.92,104.83 km<sup>2</sup>,其中新增速率最快的是林地,草地转变为林地面积最多。研究区在 2009—2019 年这 10 年间的土地利用变化显著,再根据表 2 研究区土地类型在 10 年间发生转变的面积为 653.31 km<sup>2</sup>,总面积为 1 173.36 km<sup>2</sup>,依据公式(3)计算求得的研究区土地总体利用动态度为 5.57%,可以看出研究区 10 年间土地利用类型的变化比较明显。

表 1 彬州市 2009—2019 年土地利用变化的面积转移矩阵 km<sup>2</sup>

年份	土地利用 类型	2019 年							总面积
		耕地	园地	林地	草地	建设用地	水域	其他土地	
2009 年	耕地	171.86	58.54	82.64	21.07	25.39	2.48	0.49	362.47
	园地	52.79	49.03	15.07	4.21	22.52	0.63	0.23	144.48
	林地	31.51	12.58	193.96	23.35	4.66	1.89	0.19	268.14
	草地	45.67	19.84	155.76	75.72	8.38	2.54	0.1	308.01
	建设用地	23.11	13.67	11.07	3.35	24.49	0.41	0.16	76.26
	水域	1.76	0.19	1.43	3.72	1.51	4.97	0	13.58
	其他土地	0.09	0.02	0.15	0.12	0.01	0	0.02	0.41
	总面积	326.78	153.86	460.08	131.54	86.96	12.94	1.2	1173.36

表 2 彬州市 2009—2019 年土地利用动态变化率

土地利用 类型	未变化 面积/km <sup>2</sup>	转移面积/ km <sup>2</sup>	转移 速率/%	新增 面积/km <sup>2</sup>	新增 速率/%
耕地	171.86	190.61	5.26	154.92	4.27
园地	49.03	95.45	6.61	104.83	7.26
林地	193.96	74.18	2.77	266.12	9.92
草地	75.72	232.29	7.54	55.82	1.81
建设用地	24.49	51.77	6.79	62.47	8.19
水域	4.97	8.61	6.34	7.97	5.87
其他土地	0.02	0.39	9.51	1.18	28.78
研究区总体	520.05	653.31	5.57	653.31	5.57

3.2 研究区土地利用变化的驱动因子分析及有效性检验

将土地利用数据和各驱动因子的矢量数据转化 ASCII 文件,再利用 CLUE 软件将每种地类和所有的驱动因子 ASCII 文件转换成 7 个单一记录文件,每个记录文件中一个地类对应 7 个驱动因子数据,最后利用 SPSS 软件对 7 个单一记录文件进行 logistic 回归分析,根据得出的各地类空间分布概率,运用地图代数方法制作 7 种地类的空间分布概率图(图 1),并利用 ROC 曲线对 7 种地类模拟有效性进行检验,结果见表 3。

由表 3 可知:(1)彬州市耕地格局主要受坡度、距道路、行政中心、河流的距离以及 GDP 影响,从回归系数看,坡度影响最大且与耕地呈负相关;从事件发生比 exp(B)来看,坡度每增加 1 个单位,耕地的空间转化概率减少 0.990 137 倍。(2)建设用地格局受自然因子和社会经济因子的共同影响,建设用地与人口密度呈正相关,与其他因子呈负相关,说明建设用地分布在海拔低、坡度低、距离道路、行政中心近的区域,从发生比看,人口密度每增加一个单位,建设用地的空间转化概率增加 1.004 488 倍,说明人口密度越大,建设用地的需求就会越大。(3)从方程回归系数来看,园地与高程、坡度、GDP 和距道路距离因子呈负相关,说明园地分布在高程坡度低的区域,且随着距道路距离和 GDP 的增大,园地呈减少的趋势;园地与人口密度、距行政中心距离和距河流距离 3 种因子呈正相关,且人口密度的相关系数最大,从 exp(B)来看,人口密度每增加 1 个单位,园地的空间转化概率增加 1.006 747 倍。(4)林地与 GDP 和人口密度因子呈负相关,与高程、坡度、距道路距离、距河流距离 4 种因子呈正相关,说明林地分布在人口较少,高程较高,坡度较大,距离河流和道路较远的区域,同时坡度每增加 1 个

单位,林地的空间转化概率增加 1.017 682 倍。(5) 草地与高程、距河流距离两种因子呈负相关,与坡度、人口密度和距道路距离 3 种因子呈正相关,说明草地分布在高

程低、人口密度大、距离河流近的区域,且随着坡度和距道路距离的增大,草地呈增大的趋势。水域与 GDP 呈正相关,与其他因子呈负相关。

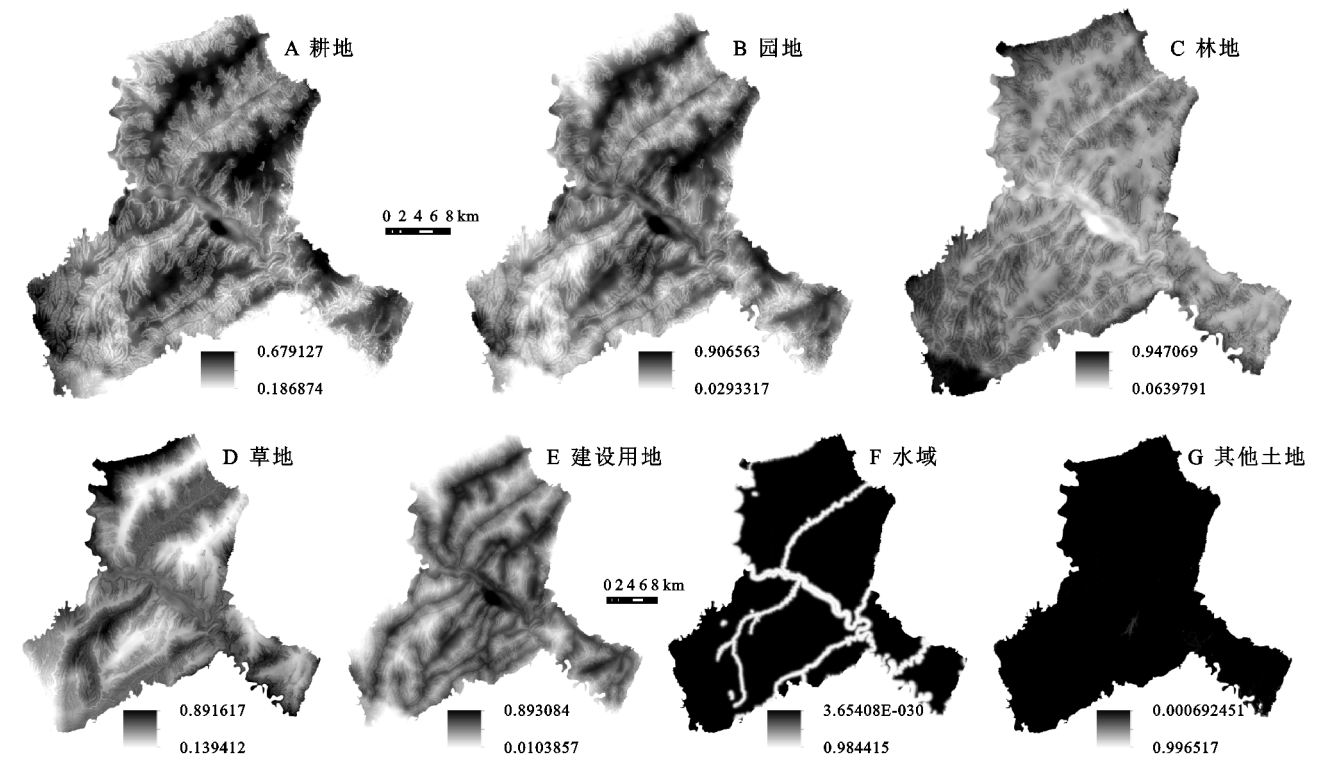


图 1 彬州市 7 种地类空间分布概率

在本文中,ROC 值用于判断计算出的各类土地利用类型在不同因子影响下空间分布概率与该类土地利用类型真实的分布格局之间的拟合度<sup>[29]</sup>。由表 3 可知,各地类的 ROC 值依次是:耕地 0.706,园地 0.749,林地 0.734,草地 0.726,建设用地 0.774,水域 0.968,其他用地 0.872,均大于 0.7,说明拟合度较好,满足本研究需求。

3.3 彬州市 2019 年土地利用模拟及精度验证

根据 7 种地类空间分布概率图,运用 IDRISI 软件集合编辑器将 7 种地类概率图按重分类的顺序分别编序 1—7,建立各土地利用类型的适宜性图集,在运用 IDRISI 软件中 CA-Markov 模型以 2009 年作为土地利用预测起始时间,设置迭代次数为 10,模拟预测 2019 年土地利用变化情况,将其模拟结果与 2019 年实际土地利用现状图进行精度验证,见图 2。

Kappa 系数广泛用于对遥感数据的分类精度和两个图像的相似程度进行评价<sup>[30]</sup>。本研究通过 IDRISI 软件中 CROSSTAB 分析计算 2019 年彬州市土地利用预测图和土地利用现状图中各土地类型预测准确率(表 4),经统计得到彬州市总栅格数为 1 301 880 个,2019 年预测模拟正确的栅格总数为 1 035 403 个,占彬州市总栅格数的 79.53%,根据公式(8)计算得出 2019 年土地利用模拟的 Kappa 系数值为 0.761 2,一般认为 Kappa 系数值大于 0.75 时,

说明模拟效果为优,模拟精度通过检验。

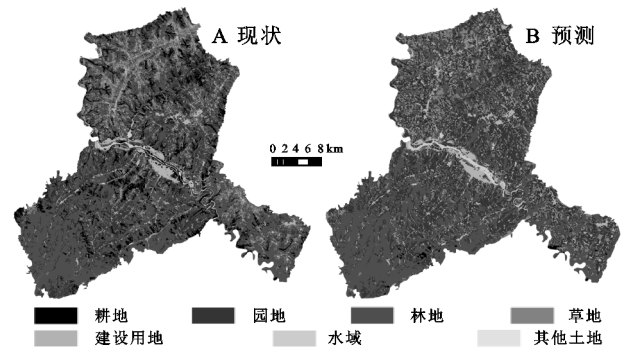


图 2 2019 年彬州市土地利用现状、预测

3.4 多情景条件下彬州市 2029 年土地利用预测

本研究在自然发展、生态保护和限制城市过度开发 3 种情景下对彬州市 2029 年土地利用进行预测模拟,自然发展情景是按照当前的发展情况,不受任何条件的限制;生态保护情景是把水域和永久基本农田保护区作为约束条件;限制城市过度开发情景是根据彬州市政策把禁止建设区、限制建设区、有条件建设区和允许建设区作为约束条件。在 IDRISI 软件 CA-Markov 模块中以研究区 2019 年土地利用现状为基期,结合 Logistic 模型分析得出的土地适宜性图集和 2009—2019 年研究区土地利用面积转移矩阵作为转换规则,设置迭代次数 10,分别在以上 3 种情景下对彬州市 2029 年土地利用变化情况进行预测,预测结果见图 3。

表 3 彬州市主要地类的 Logistic 回归模型

因变量	解释变量	回归系数	标准误差	显著性	exp(B)	ROC 值
耕地	高程	—	—	0.061699	—	0.706
	坡度	−0.009912	0.000601	0.000	0.990137	
	GDP	0.000378	0.000020	0.000	1.000378	
	人口密度	—	—	0.442538	—	
	距道路距离	−0.000070	0.000006	0.000	0.999930	
	距行政中心距离	0.000021	0.000003	0.000	1.000021	
	距河流距离	0.000092	0.000004	0.000	1.000092	
	常量	−0.613429	0.035872	0.000	0.541491	
园地	高程	−0.001105	0.000047	0.000	0.998896	0.749
	坡度	−0.016235	0.000622	0.000	0.983896	
	GDP	−0.000354	0.000073	0.000	0.999646	
	人口密度	0.006725	0.000437	0.000	1.006747	
	距道路距离	−0.000347	0.000007	0.000	0.999653	
	距行政中心距离	0.000009	0.000003	0.004	1.000009	
	距河流距离	0.000193	0.000004	0.000	1.000193	
	常量	−0.120134	0.071475	0.092804	0.886801	
林地	高程	0.001192	0.000043	0.000	1.001192	0.734
	坡度	0.017527	0.000612	0.000	1.017682	
	GDP	−0.000430	0.000064	0.000	0.999570	
	人口密度	−0.002725	0.000370	0.000	0.997278	
	距道路距离	0.000222	0.000006	0.000	1.000222	
	距行政中心距离	—	—	0.949006	—	
	距河流距离	0.000017	0.000003	0.000	1.000017	
	常量	−0.515299	0.062622	0.000	0.597322	
草地	高程	−0.000461	0.000044	0.000	0.999539	0.726
	坡度	0.010312	0.000609	0.000	1.010365	
	GDP	—	—	0.371147	—	
	人口密度	0.000488	0.000118	0.000	1.000488	
	距道路距离	0.000250	0.000006	0.000	1.000250	
	距行政中心距离	—	—	0.187861	—	
	距河流距离	−0.000201	0.000004	0.000	0.999799	
	常量	0.367700	0.063198	0.000	1.444409	
建设用地	高程	−0.000546	0.000047	0.000	0.999454	0.774
	坡度	−0.010672	0.000618	0.000	0.989385	
	GDP	−0.000268	0.000072	0.000	0.999732	
	人口密度	0.004477	0.000428	0.000	1.004488	
	距道路距离	−0.000529	0.000008	0.000	0.999471	
	距行政中心距离	−0.000097	0.000003	0.000	0.999903	
	距河流距离	0.000024	0.000004	0.000	1.000024	
	常量	0.628957	0.070336	0.000	1.875653	
水域	高程	−0.002002	0.000181	0.000	0.998000	0.968
	坡度	−0.011269	0.002486	0.000	0.988794	
	GDP	0.001317	0.000285	0.000	1.001318	
	人口密度	−0.006448	0.001639	0.000	0.993572	
	距道路距离	−0.000279	0.000021	0.000	0.999722	
	距行政中心距离	−0.000093	0.000012	0.000	0.999907	
	距河流距离	−0.008360	0.000140	0.000	0.991675	
	常量	5.797381	0.264869	0.000	329.435633	
其他土地	高程	−0.013038	0.000917	0.000	0.987046	0.872
	坡度	0.036546	0.009984	0.000	1.037222	
	GDP	—	—	0.676636	—	
	人口密度	—	—	0.365393	—	
	距道路距离	—	—	0.516495	—	
	距行政中心距离	0.000123	0.000054	0.023150	1.000123	
	距河流距离	0.000557	0.000063	0.000	1.000557	
	常量	10.776555	0.935433	0.000	47884.897300	

注:“—”代表未发现。



表 4 2019 年彬州市土地利用类型实际栅格与模拟栅格对比

土地利用类型	2019 年 实际栅格	2019 年 预测栅格	预测 一致	准确率/ %
耕地	145975	136859	106989	73.29
园地	363102	384190	291231	80.21
林地	509971	444491	415313	81.44
草地	170908	221552	131094	76.70
建设用地	96666	93850	78185	80.88
水域	13940	19480	11609	83.28
其他土地	1318	1458	982	74.51

在 IDRISI 软件中运用 CROSTAB 计算 3 种情景下彬州市 2029 年土地利用预测的 7 种地类栅格数,以

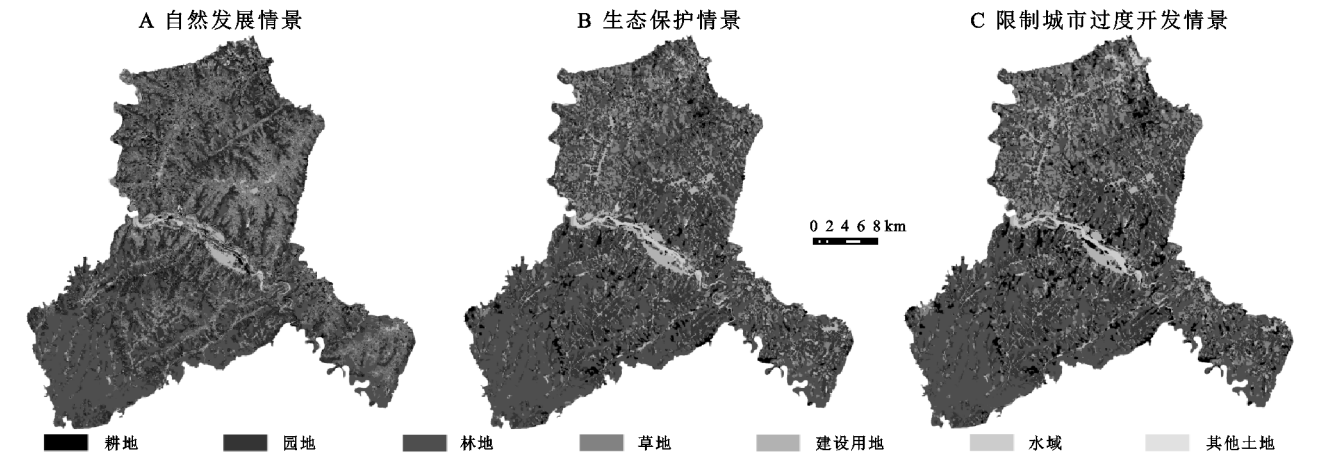


图 3 3 种情景下彬州市 2029 年土地利用预测

在生态保护情景下,2029 年研究区园地面积和水域基本保持不变,草地、建设用地和其他土地面积分别增加 41.33%,2.82%,10.62%,草地增加的面积集中在义门镇、北极镇、新民镇和龙高镇,建设用地增加的面积主要集中于城关镇,其他土地面积增加主要分布在新民镇;耕地和林地面积分别减少 6.24%,12.84%,耕地面积减少主要集中在城关镇和新民镇两个镇,林地面积减少主要集中在永乐镇、北极镇和义门镇。

在限制城市过度开发情景下,2029 年彬州市水域面积基本保持不变,耕地、园地、林地和建设用地面积分别减少 13.1%,2.45%,12.05%,2.89%,耕地面积减少主要分布在城关镇、新民镇和北极镇,园地减少面积分布较均匀,林地面积减少主要集中在永乐镇、北极镇和义门镇,建设用地减少的面积主要集中于城关镇;草地和其他土地面积分别增加 47.19%,11.38%,草地增加的面积主要分布于韩家镇、义门镇、北极镇和龙高镇,其他土地面积增加主要分布在新民镇。

4 讨论与结论

(1) 土地利用面积转移矩阵表明,彬州市在

此为基础计算得出各土地类型占彬州市总面积的比例,再与2019 年彬州市各土地利用类型的实际情况相对比,结果表明在自然发展情景下,2029 年彬州市林地面积基本保持不变,耕地、园地和水域面积将分别减少 27.31%,10.96%,3.84%,耕地减少主要分布于新民镇、城关镇、太峪镇和水口镇,园地减少主要集中在新民镇、北极镇和义门镇,水域面积减少集中在义门镇和龙高镇;草地、建设用地和其他土地面积分别增加 24.35%,40.54%,21.09%,草地增加的面积主要集中在新民镇、义门镇南部、城关镇西部,建设用地增加的面积分布较均匀,增加的其他土地面积主要集中在龙高镇东部。

2009—2019 年期间土地利用发生了很大的变化,7 种地类面积的转化程度很显著,草地和耕地转移面积最多,具体有 155.73 km<sup>2</sup>的草地为林地,82.64 km<sup>2</sup>耕地转为林地,58.54 km<sup>2</sup>耕地转为园地以及 25.39 km<sup>2</sup>耕地转为建设用地等,其中草地转化最明显;根据计算得出土地利用综合动态度为 5.57%也可以看出研究区 10 年间土地利用有着显著性的变化。

(2) 用 Logistic 模型对选取的 7 种自然因子和社会经济因子进行驱动力分析,将得到的各土地类型的空间分布概率图组成土地适宜性图集,用以校正 CA-Markov 转化规则,并利用 ROC 曲线对 7 种地类模拟有效性进行检验,使其在数量和空间上达到较为精确的预测模拟,让预测结果更可信。

(3) 在自然发展情景下预测的 2029 年彬州市土地利用变化,建设用地面积增长过快,侵占了水域等重要生态用地,耕地面积也大量减少,长期发展下去可能会破坏研究区的生态平衡,这也不符合我国可持续发展的要求;在生态保护和限制城市过度开发两种情景下,建设用地面积增加得到控制甚至还减小,水域生态用地也得到了保护,在一定程度上缓解了耕地保护的壓力,有利于区域可持续发展。对比 3 种预

测结果,生态保护和限制城市过度开发这两种情景下具有明显优势,可为未来彬州市土地利用、生态城市建设和区域生态环境保护提供科学的参考依据。

本文根据研究区 2009 年和 2019 年土地利用调查数据做多情景预测,虽然避免了常规的遥感解译产生的误差,精度更高,但是由于在数据获取上有局限,对影响研究区土地利用变化的驱动因子只从自然因素和社会经济因素选取了 7 个,考虑不够全面,使模拟的土地利用类型与该地类真实的分布格局之间的拟合度不够完全匹配,可能对最后预测精度产生一定的影响,因此,在下一步的研究中,我将对影响土地利用变化的政治制度因素、技术因素等进行全面考虑,选取因子。

参考文献:

[1] 李慧颖,李晓燕,贾明明,等.基于 CA-Markov 模型的长吉示范区土地利用格局多情景预测研究[J].地理信息世界,2019,26(3):18-24.

[2] 秦丽杰,张郁,许红梅,等.土地利用变化的生态环境效应研究:以前郭县为例[J].地理科学,2002,22(4):508-512.

[3] 后立胜,蔡运龙.土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述[J].地理科学进展,2004,23(6):96-104.

[4] 裴亮,陈晨,戴激光,等.基于马尔科夫模型的大凌河流域土地利用/覆被变化趋势研究[J].土壤通报,2017,48(3):525-531.

[5] 林晓丹,范胜龙,孙巧燕,等.基于 GIS 和 Logistic 回归模型的土地利用空间模拟与分析:以龙海市为例[J].福建农林大学学报:自然科学版,2017,46(4):468-473.

[6] 李文超,王海涛,杨旭.基于灰色模型的延吉市土地利用预测研究[J].水土保持应用技术,2015(3):34-35.

[7] 冯永玖,杨倩倩,崔丽,等.基于空间自回归 CA 模型的城市土地利用变化模拟与预测[J].地理与地理信息科学,2016,32(5):37-44,127.

[8] 胡波洋,张蓬涛,白宁,等.基于 CLUE-S 和 GMOP 模型的青龙满族自治县土地利用情景模拟[J].中国农业资源与区划,2020,41(7):173-182.

[9] 朱海伦.基于 CLUE-S 模型的县域土地利用变化模拟研究[D].杭州:浙江大学,2020.

[10] 吴婷.基于 CLUE-S 模型的南京市土地利用变化模拟[D].武汉:武汉大学,2019.

[11] 王芳莉.基于 FLUS 模型的陇南市土地利用变化与模拟[D].兰州:西北师范大学,2020.

[12] 黎云云,畅建霞,王义民,等.基于 CA-Markov 模型的黄河流域土地利用模拟预测研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(12):107-116.

[13] 余健,童秋英,朱波.改进 CA-Markov 模型的武汉市土地利用变化模拟[J].测绘科学,2020,45(6):165-171.

[14] 冯丽媛,米文宝,马国庆.基于 CA-Markov 模型的宁夏沿黄生态经济带土地利用变化及模拟研究[J].水土保持通报,2019,39(5):218-222,230.

[15] 李文慧.基于 CA 和 MAS 耦合模型的哈尔滨市 LUCC 模拟研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2017.

[16] 郝子莹.基于 Logistic-CA-Markov 模型的嫩江上游流域土地利用变化研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2020.

[17] 姜楠.基于 Logistic 回归模型的 LUCC 动态变化驱动力研究[D].北京:中国林业科学研究院,2016.

[18] 朱萌,马孝义,刘雪娇.基于马尔科夫模型的武功县土地利用/覆被动态变化研究[J].水土保持研究,2013,20(5):64-68.

[19] 叶娇,罗莉,肖志峰.基于 CA-Markov 模型的东江流域土地利用动态模拟[J].地理空间信息,2020,18(9):102-105,8.

[20] 王友生,余新晓,贺康宁,等.基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J].农业工程学报,2011,27(12):330-336.

[21] 李晓,冯长春,李天娇,等.基于 Logistic 模型的土地利用格局影响因素分析:以重庆市义和镇为例[J].北京大学学报:自然科学版,2017,53(4):741-748.

[22] 徐嘉兴,李钢,陈国良.基于 logistic 回归模型的矿区土地利用演变驱动力分析[J].农业工程学报,2012,28(20):247-255.

[23] 赵海杨.基于 CA-Markov 模型的北流市土地利用变化模拟研究[D].南宁:南宁师范大学,2019.

[24] 张永恒.基于粗糙集理论的元胞自动机模型土地利用模拟研究[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2017.

[25] 李继红,甘依童,李文慧,等.基于 CA 和 MAS 的哈尔滨城市土地利用变化研究[J].森林工程,2018,34(1):30-35.

[26] 贺正思宇,谢玲,梁保平,等.基于 CA-Markov 模型的漓江流域土地利用模拟研究[J].生态科学,2020,39(5):142-150.

[27] 苏璐璐.基于 CA-Markov 模型的盐源县土地利用变化及预测研究[D].成都:成都理工大学,2018.

[28] 吴玫琦.基于 CA-Markov 模型的广汉市土地利用空间格局预测及优化研究[D].成都:四川师范大学,2017.

[29] 周晨晴,刘淑英,王平.基于 GIS-Logistic 耦合模型的广河县土地利用变化及其驱动因素分析[J].甘肃农业大学学报,2018,53(3):118-125.

[30] 高玉宏,张丽娟,李文亮,等.基于空间模型和 CA 的城市用地扩展模拟研究:以大庆市为例[J].地理科学,2010,30(5):723-727.