

基于 GD_SVM_CA-Markov 模型的县域景观格局模拟

王宇航, 于强, 岳德鹏[†], 张启斌, 马欢

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 100083, 北京)

摘要: 利用地理探测器探究地理要素变化与驱动因子关系的优势以及支持向量机分类决策的特点,对 CA 模型进行改进,并结合 Markov 模型,形成 GD_SVM_CA-Markov 模型,以期为县城城镇发展规划以及环境保护提供决策参考。以生态脆弱区典型县域内蒙古磴口县为研究区,基于 2011 年磴口县土地利用数据,应用 GD_SVM_CA-Markov 模型,对磴口县 2016 年的土地景观空间分布格局进行模拟预测,以期发现其变化规律。为了保证模拟精度,将模拟结果与传统 CA-Markov 模型模拟结果进行对比验证。结果表明,CA-Markov 模型模拟结果的总体 Kappa 系数为 0.8628, GD_SVM_CA-Markov 模型模拟结果的总体 Kappa 系数为 0.9250, 2 个模型模拟结果的精度均较高,但 GD_SVM_CA-Markov 模型模拟结果的精度更高,结果更优。因此,将 GD_SVM_CA-Markov 模型应用于当地土地景观空间分布格局模拟预测,具有一定可行性,可为当地生态治理以及相关政策的实施提供参考。

关键词: 地理探测器; SVM; CA-Markov; 模拟; 磴口县

中图分类号: K903 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2018)03-0134-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2018.03.017

Landscape pattern simulation within a county based on GD_SVM_CA-Markov model

WANG Yuhang, YU Qiang, YUE Depeng, ZHANG Qibin, MA Huan

(Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China)

Abstract [Background] Dengkou county is a typical arid and semi-arid area with obviously serious desertification. Ecological environment protection and treatment needs to be solved urgently. In the process of urbanization, balancing the three types of land for construction land, sandy land and ecological land is particularly important. Based on the GD_SVM_CA-Markov model, this paper aims to analyze the change of the dynamic distribution of the landscape in Dengkou county from two dimensions of time and space, to explore its change pattern, and carry on the simulation prediction, so as to provide a certain decision-making reference for the local urban development planning, the desertification control and the ecological environment protection. **[Methods]** Based on 10 driving factors (DEM, slope, aspect, NDVI, groundwater depth, evapotranspiration, population density, the nearest distance to water area, the nearest distance to settlement, the nearest distance to road), the land use suitability atlas was created by using GeoDetector to explore the relationship between land use change and 10 driving factors and MCE module provided by IDRISI software; Through SVM to define the transformation rules of the cell, thus the improvement of CA model was achieved; Based on the land use data of the two periods of 2006 and 2011, the Markov model was used to generate the land use transfer matrix. The landscape pattern simulation of study area in 2016

收稿日期: 2018-01-11 修回日期: 2018-03-15

项目名称: 国家自然科学基金“荒漠绿洲区景观格局与生态水文耦合及调控”(41371189)

第一作者简介: 王宇航(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向: 3S 技术在生态环境中的应用。E-mail: seekwyh@163.com

[†]通信作者简介: 岳德鹏(1963—),男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向: 景观生态学、土地评价。E-mail: yuedepeng@126.com

based on the GD_SVM_CA-Markov model was implemented with the above process integrated. In order to test the simulation accuracy, the Kappa coefficient was used for the test [Results] From 2006 to 2016, the landscape area of construction land in Dengkou county increased from 5 785.55 hm² to 8 952.67 hm², the landscape area of sandy land decreased from 76 616.15 hm² to 56 460.50 hm², the landscape area of water area increased from 23 859.88 hm² to 24 679.10 hm², the landscape area of woodland and grassland increased from 117 452.37 hm² to 128 120.87 hm². For construction land, there was 15.64% probability of conversion to arable land. In the case of water area, there was 11.56% probability of turning into arable land. In terms of sandy land, there was 18.37% probability of turning into woodland and grassland. The influence degree of the 10 driving factors on the landscape type change in Dengkou county was 0.248 816, 0.048 784, 0.134 342, 0.951 212, 0.975 924, 0.873 667, 0.520 317, 0.256 226, 0.413 550, 0.178 658 respectively according to the above order. The Kappa coefficient of the CA-Markov model simulation results of 2016 was 0.862 8, the Kappa coefficient of the GD_SVM_CA-Markov model simulation result of 2016 was 0.925 0. Based on the land use data of 2016 and the land use transfer data of 2011—2016, the GD_SVM_CA-Markov model was used to simulate and predict the spatial distribution pattern of landscape in 2021. During 2016—2021, the landscape area of construction land increased from 8 952.67 hm² to 11 610.21 hm², the landscape area of sandy land increased from 56 460.50 hm² to 67 235.11 hm², and the landscape area of ecological land such as water area and woodland and grassland decreased from 152 799.97 hm² to 143 670.04 hm². [Conclusions] Hydrological conditions, vegetation cover and population factor are the decisive factors that determine the temporal and spatial changes of local landscape types. Thus, at the same time as urban development, it is necessary to pay attention to ecological and environmental protection. The simulation result of 2016 based on GD_SVM_CA-Markov model has higher overall simulation accuracy and is better than the simulation result of 2016 based on CA-Markov model. Therefore, it is feasible to use GD_SVM_CA-Markov model to simulate and predict the spatial distribution pattern of landscape in Dengkou county.

Keywords: GeoDetector; SVM; CA-Markov; simulation; Dengkou county

城市化进程在我国过去的 20 年里是最大的社会经济空间运动,在未来的 20 年里也将受到重点关注^[1]。城市化推动社会经济的发展,与此同时带来的生态问题也不容忽视,平衡经济发展和生态保护这两者的关系,成为我国全面发展的重大挑战^[2]。随着国家政策的实施,大中城市城市化发展迅速,受到较多专家学者关注,但对于县域尺度城镇化问题的研究并不多见^[3]。近些年来,县域城市化发展也是突飞猛进,城镇用地扩张带动当地经济发展,对当地的生态环境也产生了一定影响,故探索县域城镇化的形成机制,对于确立县域城镇化的发展战略、因地制宜地引导城镇化的地域模式和用地政策提供参考依据^[4]。

近年来,元胞自动机(cellular automata, CA)被广泛应用于地理空间模拟研究,与 Markov、多智能体、Logistic 回归等多种模型进行结合用以提高模拟精度^[5],其中以 CA-Markov 模型研究较为热点。CA-Markov 模型既具有 CA 模型模拟复杂系统空间

变化的能力,也具有 Markov 模型长期预测的优势^[6],且仍然不断被改进。李俊等^[7]通过 Logistic 改进 CA-Markov 模型对宁夏沿黄地带城镇用地进行扩展驱动力分析和情景模拟,张晓娟等^[8]基于多标准评价(multi-criterium evaluation, MCE)改进 CA-Markov 模型对三峡库区土地利用演变进行模拟预测,均取得较好结果。作者综合前人研究,引入地理探测器(GeoDetector, GD)和支持向量机(Support Vector Machines, SVM)2 种方法,从原理上对 CA 模型进行改进,并结合 Markov 模型实现模拟预测。地理探测器在分析土地利用变化与驱动因子关系方面具有较大优势^[9],用以 CA 模型土地利用适宜性参数的设置;支持向量机在特征提取和目标识别方面具有广泛的应用^[10],用来确定 CA 模型非线性转换规则;由此建立 GD_SVM_CA-Markov 模型。

研究区内蒙古磴口县是典型的干旱半干旱区域,沙漠化问题显著,生态环境保护与治理亟需解决^[11],且处在城镇化的进程当中,平衡好当地建设

用地、沙漠化土地以及绿色生态用地这 3 类用地景观显得尤为重要。笔者基于 GD_SVM_CA-Markov 模型对磴口县从时间和空间 2 个维度对其用地景观动态分布变化进行分析,探究其变化规律,并进行模拟预测,从而希望能为当地城镇发展规划、沙漠化治理以及生态环境保护提供一定的决策参考。

1 研究区概况

磴口县地处中国西北(E107°05', N40°13'),位

于内蒙古河套平原源头,黄河中上游,靠狼山山脉,西邻乌兰布和沙漠,如图 1 所示。磴口县属中温带大陆性季风气候,气候干旱少雨,区域蒸发量大,水资源较为短缺,土地沙漠化严重。多年平均降水 143.9 mm,多年平均蒸发量 2 327 mm,多年平均气温 7.6℃。黄河流经磴口县 52 km,年径流量 310 亿 m³,共有水域面积 2 406.67 hm²。境内海拔 1 030 ~ 2 046 m,整个地形除山区外,呈东南高西北低,逐渐倾斜^[12]。

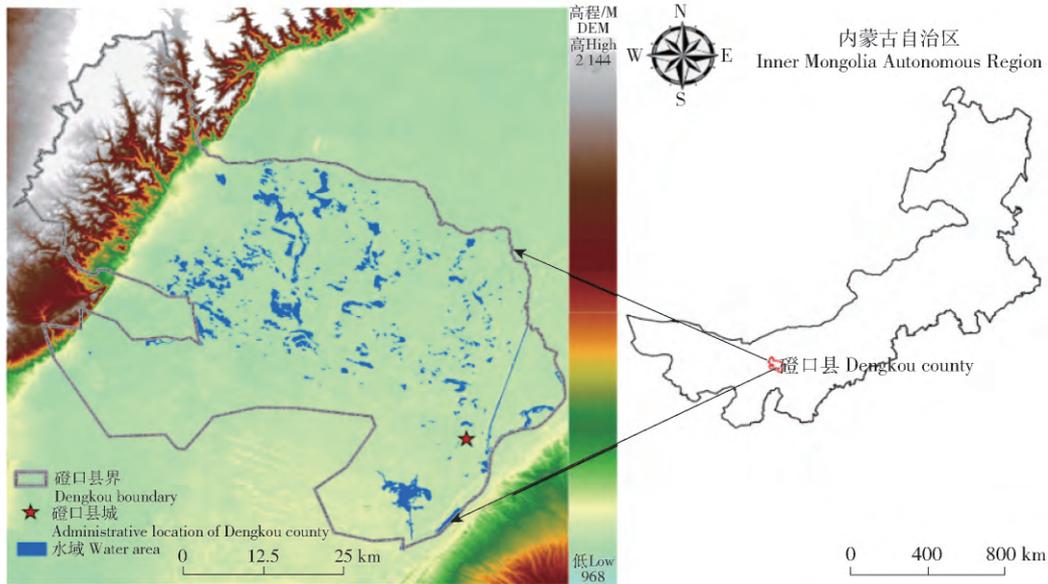


图 1 磴口县区位图

Fig. 1 Location map of Dengkou county

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

本研究所用原始数据主要包括磴口县 2006 年、2011 和 2016 年 Landsat TM/ETM + /OLI 分辨率为 30 m 的遥感影像、磴口县分辨率为 30 m 的 DEM 数据以及自然、社会经济统计数据等。对原始数据进行处理后可分为土地利用数据和驱动因子数据 2 类。利用 ENVI 和 ArcGIS 软件对 3 期的遥感影像进行监督分类和人工目视解译,根据研究区特点,分为建设用地、水域、耕地、林草地、沙地、未利用地 6 类,分类精度达到了 85.6%。驱动因子数据一部分来自于磴口县相关水利部门的测点数据以及磴口县各年社会经济统计年鉴,一部分是通过在 ArcGIS、ENVI 软件中分析处理得到,可分为自然驱动因子数据、社会经济驱动因子数据和邻域驱动因子数据 3 类,共 10 种。

2.2 GD_SVM_CA-Markov 模型景观格局模拟

基于 GD_SVM_CA-Markov 模型对研究区景观格局变化进行模拟,具体的过程如下:

1) 适宜性图集的创建。将土地景观类型发生变化的区域设置为 1,土地景观类型未发生变化的区域设置为 0,选取 DEM、坡度、坡向、NDVI、地下水埋深、蒸散发、人口密度、距水域最近距离、距居民点最近距离、距道路最近距离共 10 个驱动因子,将土地景观类型变化值(1 或 0)与 10 个驱动因子通过地理探测器(GeoDetector, GD)在 GeoDetector 程序中进行因子探测分析,地理探测器因子探测的原理^[9]为

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{n\sigma_H^2} \sum_{i=1}^n n_{D,i} \sigma_{H_{D,i}}^2 \quad (1)$$

式中: $P_{D,H}$ 为驱动因素解释力; D 为地理要素指标变化的驱动因子; n 与 σ^2 分别为研究区域整体样本量与方差; H 为某种因子的分类数; $n_{D,i}$ 为 D 指标在 i 类上样本数。 $P_{D,H}$ 取值区间为 [0, 1], 其数值越大则

表明该因子对地理要素指标变化解释能力越强^[13]。

得到的结果作为接下来 CA 转化规则的参数, 并结合 IDRISI 软件提供的 MCE 模块完成土地利用适宜性图集创建。

2) 定义元胞、状态、邻域和转化规则。笔者利用支持向量机(SVM)制定分类决策^[14] 利用非线性的转换规则来反映土地景观格局系统复杂的特征^[15] 转化规则的非线性不确定性定义主要由支持向量机的设计与开发、训练数据的采样、模型检验等组成 将 CA 模型与支持向量机(SVM)分类的土地景观格局发展概率结合, 通过计算得出各区域空间变量对每个元胞的土地景观格局发展概率的贡献。以 CA 标准的 5×5 邻近滤波器为邻域定义, 即每个中心元胞周围有 5×5 元胞组成的矩阵空间对该元胞状态的改变具有显著的影响^[16]。

3) Markov 过程。基于 2006 年和 2011 年 2 期的土地景观数据, 应用 Markov 模型生成土地利用转移(概率)矩阵^[17], 作为接下来模拟的各土地景观数量需求。

4) 实现模拟。以 2011 年作为模拟的起始时刻, 加入适宜性图集, 利用已训练好的 SVM 模型, 结合经过 Markov 过程的 2006—2011 年土地利用转移矩

阵以及转移概率矩阵, CA 的迭代次数设置为 10, 对研究区土地景观格局发展趋势进行外推, 实现 2016 年研究区土地景观空间格局预测模拟^[18]。

5) 精度验证。为了检验 GD_SVM_CA-Markov 模型模拟 2016 年不同土地景观类型面积和空间分布格局结果的合理性, 笔者运用 IDRISI 软件中的 Crosstab 模块, 引入各类景观的 Kappa 系数^[19], 将 2016 年的土地景观模拟结果与实际情况进行比较。

3 结果与分析

3.1 土地景观数量变化分析

如表 1 所示, 2006—2016 年间, 由于城镇扩张, 磴口县建设用地景观面积呈现持续增加的趋势, 且 2011—2016 年间增加幅度更大; 沙地景观面积呈现持续减少趋势, 可见当地沙漠化治理取得一定成效, 但在 2011—2016 年间, 沙地面积减少速率放缓, 沙漠化治理仍需加大力度; 耕地景观面积呈现持续增加的趋势, 未利用地景观面积呈现持续减少的趋势; 受到城镇扩张的影响, 水域、林草地等生态用地景观面积呈现前期增加缓慢、后期减少的趋势, 城镇发展的同时, 应注意生态环境保护, 退耕还林(草)等生态保护工程仍需抓紧。

表 1 2006—2016 年不同土地景观类型面积变化

Tab. 1 Area changes of different landscape types from 2006—2016

hm²

年份 Year	建设用地 C1	水域 C2	耕地 C3	林草地 C4	未利用地 C5	沙地 C6
2006	5 780.55	23 859.88	60 806.47	117 452.37	82 898.15	76 616.15
2011	6 259.79	26 300.71	70 150.88	129 117.65	81 679.31	57 970.46
2016	8 952.67	24 679.10	81 964.14	128 120.87	73 094.66	56 460.50

Notes: C1: Construction land. C2: Water area. 3: Arable land. 4: Woodland and grassland. C5: Unused land. C6: Sandy land. The same below.

3.2 Markov 土地利用转移分析

如表 2、表 3 所示, 2006—2011 年间, 土地利用转移过程主要发生在建设用地—耕地、水域—耕地、沙地—林草地之间的转化。就建设用地而言, 有

15.64% 的概率转化为耕地; 就水域而言, 有 11.56% 的概率转化为耕地; 就沙地而言, 有 18.37% 的概率转化为林草地。建设用地—沙地、水域—沙地、未利用地—沙地以及沙地—建设用地之

表 2 2006—2011 年土地利用转移矩阵

Tab. 2 Land use transfer matrix from 2006 to 2011

hm²

土地利用 Land use	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	3 497.75	18.34	707.55	278.93	19.20	0.91
C2	151.29	16 419.75	2 446.92	1 868.54	287.63	0.00
C3	1 297.49	3 670.96	50 072.51	1 842.30	3 897.83	248.48
C4	136.58	2 190.03	9 418.54	103 763.59	1 899.66	155.48
C5	1 170.27	1 906.73	3 338.37	6 324.26	75 022.93	0.00
C6	6.43	94.89	4 166.98	14 040.03	552.06	57 565.58

表 3 2006—2011 年土地利用转移概率矩阵

Tab.3 Land use transfer probability matrix from 2006 to 2011

土地利用 Land use	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0.773 378	0.004 056	0.156 445	0.061 674	0.004 245	0.000 202
C2	0.007 145	0.775 463	0.115 562	0.088 246	0.013 584	0.000 000
C3	0.021 260	0.060 151	0.820 463	0.030 187	0.063 868	0.004 072
C4	0.001 162	0.018 628	0.080 114	0.882 615	0.016 159	0.001 323
C5	0.013 334	0.021 726	0.038 039	0.072 061	0.854 840	0.000 000
C6	0.000 084	0.001 242	0.054 523	0.183 708	0.007 223	0.753 220

间基本上未发生转化。

3.3 土地景观时空变化驱动力分析

将研究区土地景观类型变化值及 10 种驱动因子带入 GeoDetector 程序进行分析计算,得到如表 4 所示的结果,可知 P 值为驱动因子对土地景观类型变化的解释程度, P 值大小与解释程度强弱成正比。10 种驱动因子对磴口县土地景观类型变化影响程

度的大小依次是:地下水埋深、NDVI、蒸散发、人口密度、距居民点最近距离、距水域最近距离、DEM、距道路最近距离、坡向、坡度,其中地下水埋深、NDVI 以及蒸散发对磴口县土地景观类型变化的解释力极强。由此可见,水文条件、植被覆盖以及人口要素是决定当地土地景观类型时空变化的决定性因素。

表 4 驱动因子地理探测结果

Tab.4 GeoDetector results of driving factors

	DEM	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	NDVI	地下水埋深 Groundwater depth/m
P	0.248 816	0.048 784	0.134 342	0.951 212	0.975 924
	蒸散发 Evapotranspiration/ (mm·d ⁻¹)	人口密度 Population density People/km ²	距水域最近距离 The nearest distance to water area/km	距居民点最近距离 The nearest distance to settlement/km	距道路最近距离 The nearest distance to road/km
P	0.873 667	0.520 317	0.256 626	0.413 550	0.178 658

3.4 模拟结果及精度检验

为了验证模型的精度,本研究与传统 CA-Markov 模型的模拟结果进行精度比较,来说明 GD_SVM_CA-

Markov 模型的优势性。2016 年真实解译图、2016 年 GD_SVM_CA-Markov 模拟图、2016 年 CA-Markov 模拟图如图 2 所示。经计算(表 5),2016 年 CA-

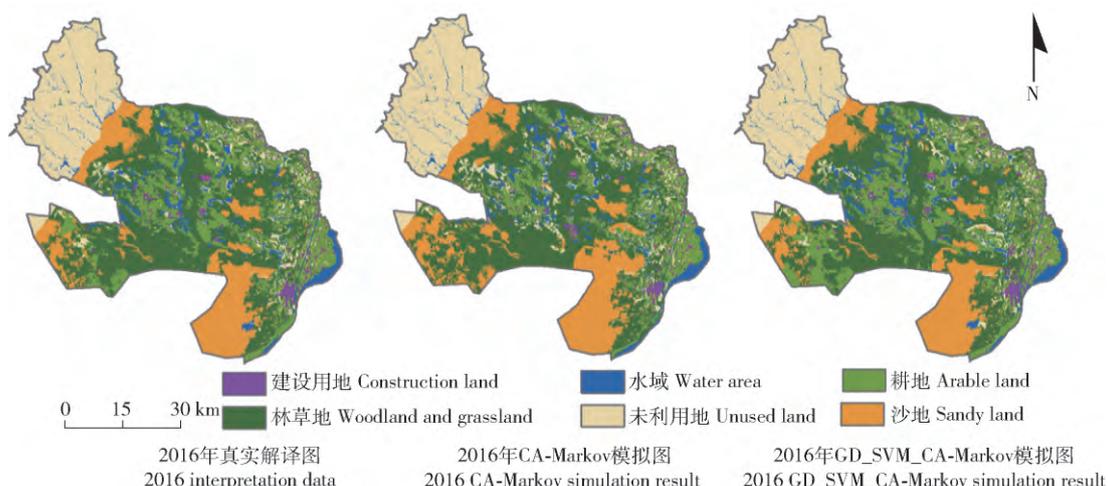


图 2 磴口县土地景观解译数据与模拟结果

Fig.2 Landscape interpretation data and simulation results in Dengkou county

Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.862 8, 2016 年 GD_SVM_CA-Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.925 0, 总体模拟精度均较高, 但 GD_SVM_CA-

Markov 模型模拟精度更高。因此, 利用 GD_SVM_CA-Markov 模型对磴口县土地景观空间分布格局进行模拟预测, 模拟精度较高, 结果可靠。

表 5 模型精度对比

Tab. 5 Model accuracy comparison

土地景观 Landscape	2016 实际栅格数	2016 GD_SVM_CA-Markov 模拟栅格数	Kappa 系数	2016 CA-Markov 模拟栅格数	Kappa 系数
	Actual raster number in 2016	Simulated GD_SVM_CA-Markov raster number in 2016	Kappa coefficient	Simulated CA-Markov raster number	Kappa coefficient
总体 Total	20 713 446	21 564 053	0.925	22 252 184	0.862 8

3.5 模型应用

基于 2016 年磴口县土地利用数据以及 2011—2016 年土地利用转移数据, 应用 GD_SVM_CA-Markov 模型, 对 2021 年土地景观空间分布格局进行模拟预测。模拟结果如图 3 所示, 可以直观看出, 建设用地景观和沙地景观面积增多, 水域、林草地等生态用地景观面积减少。在 ArcGIS 软件中进行面积统计分析后可知, 建设用地景观面积由 2016 年的 8 952.67 hm² 增加为 1 万 1 619.21 hm², 沙地景观面积由 2016 年的 5 万 6 460.50 hm² 增加为 6 万 7 235.11 hm², 水域、林草地等生态用地景观面积由 2016 年的 15 万 2 799.97 hm² 减少为 14 万 3 670.04 hm²。北部以及东北部的部分村镇出现大量城镇扩张, 那仁布鲁格嘎查西南部以及沙拉毛道嘎查西部出现沙漠化扩张现象, 对于磴口县而言, 在城镇发展的同时, 采取沙漠化治理以及生态环境保护措施刻不容缓。

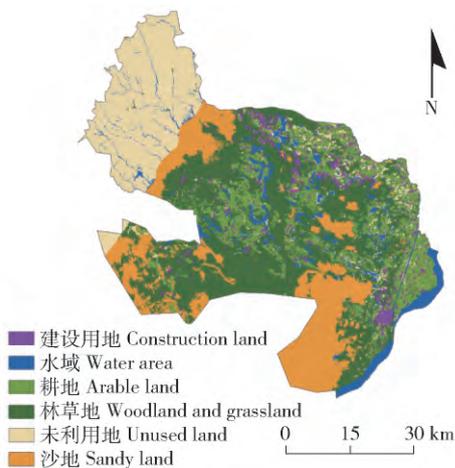


图 3 基于 GD_SVM_CA-Markov 模型的 2021 年磴口县土地景观格局模拟结果

Fig. 3 Simulated landscape pattern in Dengkou county in 2021 based on GD_SVM_CA-Markov model

4 结论及讨论

2006—2016 年间, 磴口县建设用地景观面积呈现持续增加的趋势, 受到城镇扩张的影响, 当地水域、林草地等生态用地景观面积呈现前期增加缓慢、后期减少的趋势, 沙地景观面积呈现持续减少趋势, 可见当地沙漠化治理取得一定成效。水文条件、植被覆盖以及人口要素是决定当地土地景观类型时空变化的决定性因素。故城镇发展的同时, 应注意生态环境保护, 退耕还林(草)等生态保护工程仍需抓紧。

2016 年 CA-Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.862 8, 2016 年 GD_SVM_CA-Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.925 0, 总体模拟精度均较高, 但总体上 GD_SVM_CA-Markov 模型模拟精度更高。因此, 利用 GD_SVM_CA-Markov 模型对磴口县土地景观空间分布格局进行模拟预测, 模拟精度较高, 结果可靠。

本研究中, 模拟预测的过程统一采用了 30 m × 30 m 大小的栅格尺寸, 滤波器大小设置为 5 × 5, 对于尺度的考虑不足, 未来会针对不同元胞大小和滤波器大小进行模拟预测的研究, 探究最适合的元胞大小和滤波器大小, 以期达到更高的模拟精度和结果。社会经济要素对于土地利用变化具有一定影响, 本研究对于社会经济要素涉及不多, 未来会更多地参考地区相关的社会经济政策。另外, 接下来也会就当下热点的多情景模拟问题继续深入研究, 通过设定一定情景, 来定义元胞的转化规则, 实现多情景模拟, 提高研究的丰富性、全面性。

5 参考文献

[1] 廖季红, 戴文远, 陈娟, 等. 平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J]. 资源科学, 2017, 39(10):

- 1823.
- LIAO Lihong, DAI Wenyuan, CHEN Juan, et al. Spatial conflict between ecological-production-living spaces on Pingtan Island during rapid urbanization [J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1823.
- [2] 乔琨, 朱文泉, 胡德勇, 等. 北京市不同功能区不透水地表时空变化差异 [J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2018.
- QIAO Kun, ZHU Wenquan, HU Deyong, et al. Examining the distribution and dynamics of impervious surface in different functional zones of Beijing [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2018.
- [3] 郑慧, 贾珊, 赵昕. 新型城镇化背景下中国区域生态效率分析 [J]. 资源科学, 2017, 39(7): 1314.
- ZHENG Hui, JIA Shan, ZHAO Xin. An analysis of regional eco-efficiency in China under the background of new-type urbanization [J]. Resources Science, 2017, 39(7): 1314.
- [4] 王新越, 刘二恋, 候娟娟. 山东省旅游城镇化响应的时空分异特征与类型研究 [J]. 地理科学, 2017, 37(7): 1087.
- WANG Xinyue, LIU Erlan, HOU Juanjuan. Characteristics and types of spatial-temporal differentiation of tourism urbanization response in Shandong province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(7): 1087.
- [5] 李志, 刘文兆, 郑粉莉. 基于 CA-Markov 模型的黄土塬区黑河流域土地利用变化 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 346.
- LI Zhi, LIU Wenzhao, ZHENG Fenli. Land use change in Heihe catchment on loess tableland based on CA-Markov model [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 346.
- [6] 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.
- WANG Yousheng, YU Xinxiao, HE Kangning, et al. Dynamic simulation of land use change in Jihe watershed based on CA-Markov model [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 330.
- [7] 李俊, 董锁成, 李宇, 等. 内蒙沿黄地带城镇用地扩展驱动力分析与情景模拟 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1472.
- LI Jun, DONG Suocheng, LI Yu, et al. Driving force analysis and scenario simulation of urban land expansion in Ningxia-Inner Mongolia area along the Yellow River [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9): 1472.
- [8] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 等. 基于 MCE_CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 268.
- ZHANG Xiaojuan, ZHOU Qigang, WANG Zhaolin, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir Area based on MCE_CA-Markov [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 268.
- [9] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116.
- WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116.
- [10] 张兰影, 庞博, 徐宗学, 等. 基于支持向量机的石羊河流域径流模拟适用性评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 07: 113.
- ZHANG Lanying, PANG Bo, XU Zongxue, et al. Assessment on the applicability of support vector machine-based models for runoff simulation in Shiyang river basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 07: 113.
- [11] 马欢, 于强, 岳德鹏, 等. 基于 MAS-LCM 的沙漠化空间模拟方法研究 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 134.
- MA Huan, YU Qiang, YUE Depeng, et al. Spatial simulation method of desertification based on MAS-LCM model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 134.
- [12] YU Q, YUE D P, WANG J P, et al. The optimization of urban ecological infrastructure network based on the changes of county landscape patterns: A typical case study of ecological fragile zone located at Dengkou (Inner Mongolia) [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163, S54.
- [13] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000—2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析 [J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2079.
- ZHOU Liang, ZHOU Chenghu, YANG Fan, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2079.
- [14] 林志垒, 晏路明. 高光谱影像的 BDT-SVM 地物分类算法与应用 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 177.
- LIN Zhilei, YAN Luming. The object classification algorithm and application for hyperspectral imagery based on BDT-SVM [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 177.
- [15] 宋荣杰, 宁纪锋, 刘秀英, 等. 基于纹理特征和 SVM 的 QuickBird 影像苹果园提取 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 188.
- SONG Rongjie, NING Jifeng, LIU Xiuying, et al. Ap-

- ple orchard extraction with quickbird imagery based on texture features and support vector machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2017 48(3):188.
- [16] 陈宝芬,张耀民,江东. 基于 CA-ABM 模型的福州城市用地扩张研究[J]. 地理科学进展 2017 36(5):626.
CHEN Baofen, ZHANG Yaomin, JIANG Dong. Urban land expansion in Fuzhou City based on coupled cellular automata and agent-based models (CA-ABM) [J]. Progress in Geography, 2017 36(5): 626.
- [17] 何丹,周璟,高伟,等. 基于 CA-Markov 模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J]. 北京大学学报(自然科学版) 2014 50(6):1095.
HE Dan, ZHOU Jing, GAO Wei, et al. An integrated CA-Markov model for dynamic simulation of land use change in Lake Dianchi watershed [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6): 1095.
- [18] 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]. 农业机械学报 2016, 47(3):278.
ZHAO Dongling, DU Meng, YANG Jianyu, et al. Simulation and forecast study of land use change based on CA-Markov model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2016 47(3):278.
- [19] 布仁仓,常禹,胡远满,等. 基于 Kappa 系数的景观变化测度:以辽宁省中部城市群为例[J]. 生态学报, 2005 25(4):778.
BU Rencang, CHANG Yu, HU Yuanman, et al. Measuring spatial information changes using Kappa coefficients: A case study of the city groups in central Liaoning province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 778.