

基于 MAS – LCM 的沙漠化空间模拟方法研究

马欢¹ 于强¹ 岳德鹏¹ 张启斌¹ 黄元¹ 高敬雨²

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京明德立达农业科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 以干旱区典型城市磴口县为研究区, 利用 1995—2015 年每隔 5 年的 Landsat TM 影像通过遥感解译获取研究区 20 年的各等级沙漠化空间分布, 利用 GIS 空间分析和重心迁移模型分析沙漠化景观时空变化趋势。并以 2010 年沙漠化分类数据为基期年数据, 利用 Logistic 元胞自动机 (Cellular automata – Markov, CA – Markov) 模型 (简称 LCM) 并引入多智能体系统 (Multi-agent system, MAS) 模型修正转移规则, 预测 2015 年沙漠化分类情况及其空间分布格局。研究结果表明: 磴口县 20 年间重度及极重度沙漠化面积减小, 轻度沙漠化景观面积逐渐增大, 其中 2015 年的非沙漠化景观达到 37.09%, 各类型沙漠化重心远离磴口县城, 呈现良好态势。引入 MAS 模型的 CA – Markov 预测模型能够显著提升模型的模拟精度, 所预测的 2015 年数据结果 Kappa 系数达到 0.62, 高于 CA – Markov 模型模拟结果, 能较好预测干旱区沙漠化分布情况, 为沙漠化监管与治理提供了技术支持。

关键词: 干旱区; 沙漠化; CA – Markov; 多智能体系统; 模拟

中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0134-08

Spatial Simulation Method of Desertification Based on MAS – LCM Model

MA Huan¹ YU Qiang¹ YUE Depeng¹ ZHANG Qibin¹ HUANG Yuan¹ GAO Jingyu²

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Mindleader Agrosience Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Dengkou County, a typical city in the arid area, was taken as study area, and the spatial distribution of desertification for every five years from 1995 to 2015 in the study area was obtained by Landsat TM images remote sensing interpretation. Spatial and temporal variation trend of desertification landscape was analyzed by using GIS spatial analysis and gravity center migration model. Based on the 2010 desertification classification data, the 2005—2010 desertification classification area transfer matrix table was used as Markov transfer matrix file. Using the Logistic CA – Markov model (LCM) and introducing the multi-agent system (MAS) model to correct the transfer rule, the desertification classification and its spatial distribution pattern were forecasted and compared to analyze the advantages and disadvantages of the two simulation methods. The results showed that the desertification area of Dengkou County had a significant reduction in severe desertification and very severe desertification over the past 20 years. Mild desertification landscape area and non-desertification area were gradually increased, of which non-desertification landscape reached 37.09% in 2015. Various types of desertification center of gravity left away from Dengkou County, showing a good momentum. The CA – Markov prediction model with MAS model can significantly improve the simulation accuracy of the model. The predicted Kappa coefficient reached 0.62, which was higher than that of CA – Markov model. It can better predict the distribution of desertification in arid areas, and provide technical support for the current and future desertification regulation and governance.

Key words: arid region; desertification; CA – Markov; multi-agent system; simulation

收稿日期: 2017-07-17 修回日期: 2017-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371189)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD16B00)

作者简介: 马欢(1992—), 女, 博士生, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究, E-mail: xiaohuan27@163.com

通信作者: 岳德鹏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事景观生态学和土地评价研究, E-mail: yuedepeng@126.com

引言

人类不合理的经济活动与脆弱的生态环境相互作用,导致土地生产力下降,土地资源流失,地表呈现沙漠化^[1-2]。沙漠化分布广泛、危害严重,尤其北方干旱半干旱地区沙漠化迅速发展已对社会经济和生态环境造成很大威胁。磴口县位于乌兰布和沙漠东北缘,是典型的生态脆弱带^[3],存在土地沙漠化、风沙危害剧烈、水土流失严重、土壤盐渍化以及草地退化等严重的生态环境问题^[4],其中土地沙漠化问题严重影响磴口县的生存与发展^[5]。

沙漠化的空间分布以及时空演变特征一直是沙漠化研究中的重点,开展沙漠化的监测与评估是科学有效防治沙漠化的重要途径。20 世纪 80 年代开始,遥感以其观测范围广、信息量大、数据更新快和精度高等优势,在土地沙漠化的监测中广泛应用。许多研究学者^[6-9]利用 TM 数据,构建监测指标体系,开展包括黄河源区、长江源区等多地的沙漠化监测,基本实现了大尺度沙漠化信息的定量提取。但对于土地沙漠化的空间过程预测、模拟方法等研究比较欠缺,尤其是涉及政策主导下人为活动对沙漠化过程影响的定量研究,不能对沙漠化防治政策的预期效果进行可视化模拟。元胞自动机 (CA - Markov) 是复杂系统模拟的重要研究方法,当前基于 CA 模型的研究重点主要有:将 CA 模型结合 GIS 技术研究土地空间变化;CA 模型耦合其它模型,更科学地模拟预测土地时空变化^[10-13]。CA 模型假定土地利用驱动因素是相同的,并未考虑土地利用驱动因素随时间的变化,但在现实情况下土地空间变化受到多方面驱动因素影响,自然因素较为稳定,在短时间内变化不大,而人文社会因素往往变化较为明显,这样就会造成模拟预测不符合实际状况。多智能体系统 (MAS) 模型考虑土地利用的多目标性和受政策影响的利益相关者的行为,对土地沙漠化模拟预测采用 MAS 与 CA 相结合的方法,整合了代表土地利用环境空间变化的元胞自动机模型和表现各土地利用主体行为决策过程的多智能体系统模型,也解决了 MAS 模型空间模拟预测方面缺失的问题^[14]。

本研究选择西北干旱区典型城市磴口县为研究区,采用 2005—2010 年土地沙漠化分类数据为模型参数,以 2010 年土地利用现状数据为基期年数据,利用 Logistic - CA - Markov (LCM) 模型以及耦合 MAS 模型 2 种方法,模拟 2015 年土地沙漠化分类,并与 2015 年沙漠化现状数据对比验证模型的精确性;通过对模拟预测结果的比较分析,研究沙漠化模

拟的最优方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

磴口县地处中国西北 (107°05'E,40°13'N),位于内蒙古河套平原源头,黄河中上游,背靠狼山山脉,西邻乌兰布和沙漠 (图 1)。温带大陆性季风气候,耕地主要分布在平原河套灌区,牧草地主要分布在固定半固定沙地、河湖滩地和山地。全年日照时数 3 300 h 以上,无霜期 136 ~ 205 d,年平均气温为 7.6℃,年平均降雨量 144.5 mm,年平均蒸发量 2 397.6 mm。

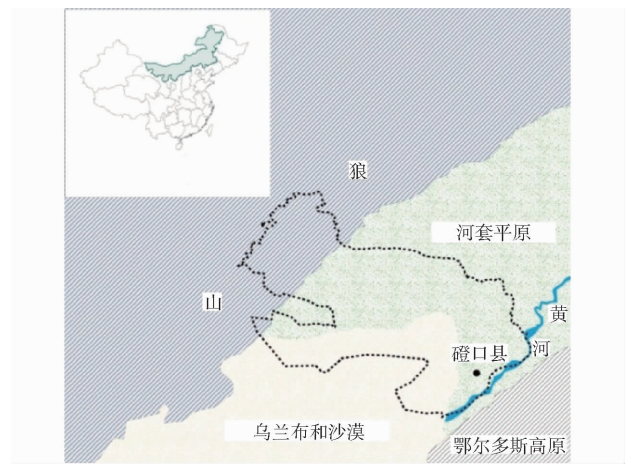


图 1 磴口县研究区地理位置图

Fig. 1 Spatial location map of study area—Dengkou County

1.2 数据来源与处理

数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>),选取影像的原则是少云、夏季植被生长旺盛的季节,具体包括 1995、2000、2005、2010、2015 年 5 个时段 8 月份的 TM 影像,另外包括 2015 年 8 月份野外调查数据。辅助数据包括:30 m 空间分辨率的 DEM、降雨量数据、地下水埋深等。利用 ENVI 5.1 软件对遥感影像进行辐射校正、影像裁剪等预处理,选择最大似然监督分类方法对 5 期遥感影像进行目视解译提取研究区不同年份的土地沙漠化景观,解译控制显示精度为 1:100 000,拓扑和纠错处理在 Arc Info 9.3 环境下完成。然后利用 ArcGIS 叠加分析模块对不同时期的沙漠化数据进行叠置分析,从而得到研究区沙漠化景观动态变化信息。

1.3 CA - Markov 模型

CA 模型是一种在时间和空间上都处于离散状态的局部网络动力学模型,由元胞、元胞空间、邻域以及转换规则 4 部分组成,元胞的下一状态只与其当前状态以及邻域元胞的状态有关^[15]。转换规则是 CA 模型的核心部分,决定元胞状态转换变化。

CA 模型只有加入符合土地利用变化规律的转换规则才能模拟复杂的地理现象,元胞本身的结构不会改变,但其状态在不停发生变化^[16-18]。

$$S_{i,j}^{t+1}=f(S_{i,j}^t,S_{n,m}^t) \tag{1}$$

式中 $S_{i,j}^{t+1}$ —— $t+1$ 时刻元胞 (i,j) 的状态
 f ——元胞转换规则
 $S_{i,j}^t$ —— t 时刻元胞 (i,j) 的状态
 $S_{n,m}^t$ —— t 时刻元胞 (i,j) 邻域 (n,m) 的状态

Markov 模型预测的数学表达式为:假定某一事件的发展过程有 n 个可能的状态,即 $E_1,E_2,\cdots,E_n$ 事件的发展过程中,记 P_{ij} 从某一状态 (E_i) 出发,下一时刻转移到其他状态 (E_j) 的可能性,称为状态 P_{ij} 转移概率,且满足条件^[17]

$$P=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

从初始状态开始,将状态转移概率矩阵经过无穷多次状态转移后得到的状态概率,称为终极状态概率,或平衡状态概率,如果将终极状态概率记为 $j=(j_1,j_2,\cdots,j_n)$,即 $j=(\lim_{k\rightarrow\infty}j_1(k),\lim_{k\rightarrow\infty}j_2(k),\cdots,\lim_{k\rightarrow\infty}j_n(k))$,且 j 满足条件(P 为初始状态转移概率矩阵)

$$j=j\times P \tag{3}$$

Markov 模型是根据转移矩阵预测未来土地沙漠化数量变化,空间信息预测较弱,CA 模型空间模拟预测较强,将这两种模型耦合形成 CA - Markov 模型,能够综合运用两种模型各自的优势,从数量和空间两个角度同时模拟预测土地利用变化^[20]。但是 CA - Markov 模型并未考虑土地沙漠化驱动因素随时间的变化,其假定土地沙漠化驱动因素是相同的,在现实情况下土地沙漠化变化是受到多方面驱动因素影响,目前对区域土地利用变化与其驱动因素之间的关系研究方法很多,其中二元 Logistic 回归方法是研究土地空间变化与驱动因素回归关系最为常用的一种方法^[21]。

Logistic 回归方法能处理非连续性的变量,并且将变量与应变量表示成一种非线性关系。在二元 Logistic 回归方法中能较方便地计算出某种土地沙漠化类型在空间上某一位置的适宜性概率。其公式为

$$\text{logit}\left(\frac{Q_{i,j}}{1-Q_{i,j}}\right)=\beta+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_nX_n \tag{4}$$

式中 $Q_{i,j}$ ——每个土地沙漠化栅格某一沙漠化类型的空间适宜性概率

X_i ——各驱动因子, $i=1,2,\cdots,n$
 β ——常数项
 β_i ——各驱动因子的回归系数, $i=1,2,\cdots,n$

因此利用二元 Logistic 回归方法获得土地沙漠化类型的回归函数和各沙漠化类型空间分布适宜性概率,某种沙漠化类型空间分布适宜性概率越大,说明在土地沙漠化模拟预测研究中得到优先配置的可能性越大,以此作为 CA 模型转换规则的一部分。把二元 Logistic 回归方法扩展到 CA - Markov 模型中,耦合为 Logistic - CA - Markov 模型,则弥补了 CA - Markov 模型对土地利用驱动因素变化考虑不足的缺点。

1.4 MAS 模型

MAS 模型是由多个具有感测、感知及结合其他智能体相互作用而采取行动功能的自主智能体组成的^[22],可用来考虑县域沙漠规划的多目标性和研究受政策措施影响的利益相关者的行为。MAS 模型的转换规则主要是根据不同规划文件设定的土地利用状态判断对应地类的空间适宜性概率,以此作为农业部口、建设部口和林业部口智能体转换规则,模拟预测耕地、建设用地和林地的土地利用变化趋势^[23]。

设此时某一地类地块 (i,j) 的空间分布适宜性概率是 $Q_{i,j}$, $S_{i,j}^{T_1}$ 代表这一类地块 (i,j) 当前 T_1 时刻空间分布适宜性概率, $W_{i,j}^{T_2}$ 代表这一类地块 (i,j) 未来 T_2 规划时刻的土地利用状态,那么 $Q_{i,j}$ 的取值为

$$Q_{i,j}=\begin{cases} 1 & (W_{i,j}^{T_2}\text{是规划中的特殊保护土地利用类型}) \\ 0 & (W_{i,j}^{T_2}\text{是规划中的特殊限制土地利用类型}) \\ S_{i,j}^{T_1} & (W_{i,j}^{T_2}\text{不是规划中的特殊保护、限制土地利用类型}) \end{cases} \tag{5}$$

把 MAS 模型和 Logistic - CA - Markov 模型结合起来,耦合成 MAS - LCM 模型,使其既具有 Logistic - CA - Markov 模型优势又考虑了多智能体系统土地沙漠化主体的复杂空间决策行为,符合基于人地耦合系统开展的土地沙漠化变化研究潮流,也弥补了 Logistic - CA - Markov 模型中对土地沙漠化主体考虑不足的劣势。在 MAS - LCM 耦合模型中,MAS 模型代表各空间决策土地沙漠化主体,Logistic - CA - Markov 模型代表影响土地利用变化的各种空间环境过程,Markov 模型预测未来时间段土地沙漠化数量变化,MAS 模型的转换规则和 Logistic - CA - Markov 模型转换规则耦合成 MAS - LCM 耦合模型转换规则,沙漠化各类型数量变化在 MAS - LCM 耦合转换规则的判断下产生模拟预测结果^[24]。

2 结果与分析

2.1 沙漠化分类空间分布结果

依据生态基准面理论,通过对磴口县土地沙漠化过程中风沙地貌、植被、土壤、生物生产力等

代表性因子的野外调查与观测,确定土地退化的阶段、指标及退化景观标识,采用国内外流行的“四分法”,将研究区的沙漠化程度划分为轻度、中度、重度和极重度 4 个等级,分类体系见表 1^[25-26]。

表 1 沙漠化分级系统
Tab.1 Classification system of desertification

景观类型	流沙面积比例/%	植被覆盖度/%	土壤类型	景观特点
轻度沙漠化	0~5	60~100	固定风沙土	主要为固定草灌丛沙丘、沙席及有斑点状流沙的风蚀耕地
中度沙漠化	5~25	30~60	半固定风沙土	呈斑块状或零星分布,多为半固定草灌丛沙垄丘、沙席与半固定爬升沙丘
重度沙漠化	25~50	10~30	流动风沙土	沙丘分布较广,形成比较稀疏的沙垄、沙丘及沙席,丘间地较开阔
极重度沙漠化	50~100	0~10	流动风沙土	无植被分布固定沙地,深度盐碱地

根据上述分类体系,采用面向对象分类法得到 1995—2015 年 20 年间的沙漠化空间分布情况,如图 2 所示。根据解译结果,利用 ArcGIS 的分类统计工具,对磴口县不同时期不同程度的沙漠化景观面积进行统计得到表 2,面积变化趋势如图 3 所示。整体来看,研究区内沙漠化严重程度由西南向东北呈递减趋势,重度和极重度沙漠化景观主要分布在磴口县西南,水体景观包括位于磴口县东南部的黄河以及分布于中部的各个湖泊。1995—2015 年间,明显可看出重度及极重度沙漠化面积减少,轻度沙

漠化景观面积逐渐增多。2005 年后非沙漠化景观有逐步成为磴口县主体景观的趋势,水体景观逐步发挥其生态枢纽功能,表明磴口县沙漠化程度有所改善,生态环境得到较好修复。

采用重心迁移模型计算不同程度沙漠化景观分布的重心,并通过其重心迁移的方向描述不同程度沙漠化景观的总体变化趋势和空间变化特征,如图 4 所示。20 年来,严重、重度、中度沙漠化景观逐步向西南方向迁移,逐渐远离磴口县,非沙漠化景观逐步扩张,并向磴口县城靠近,整体空间局势发展良好。

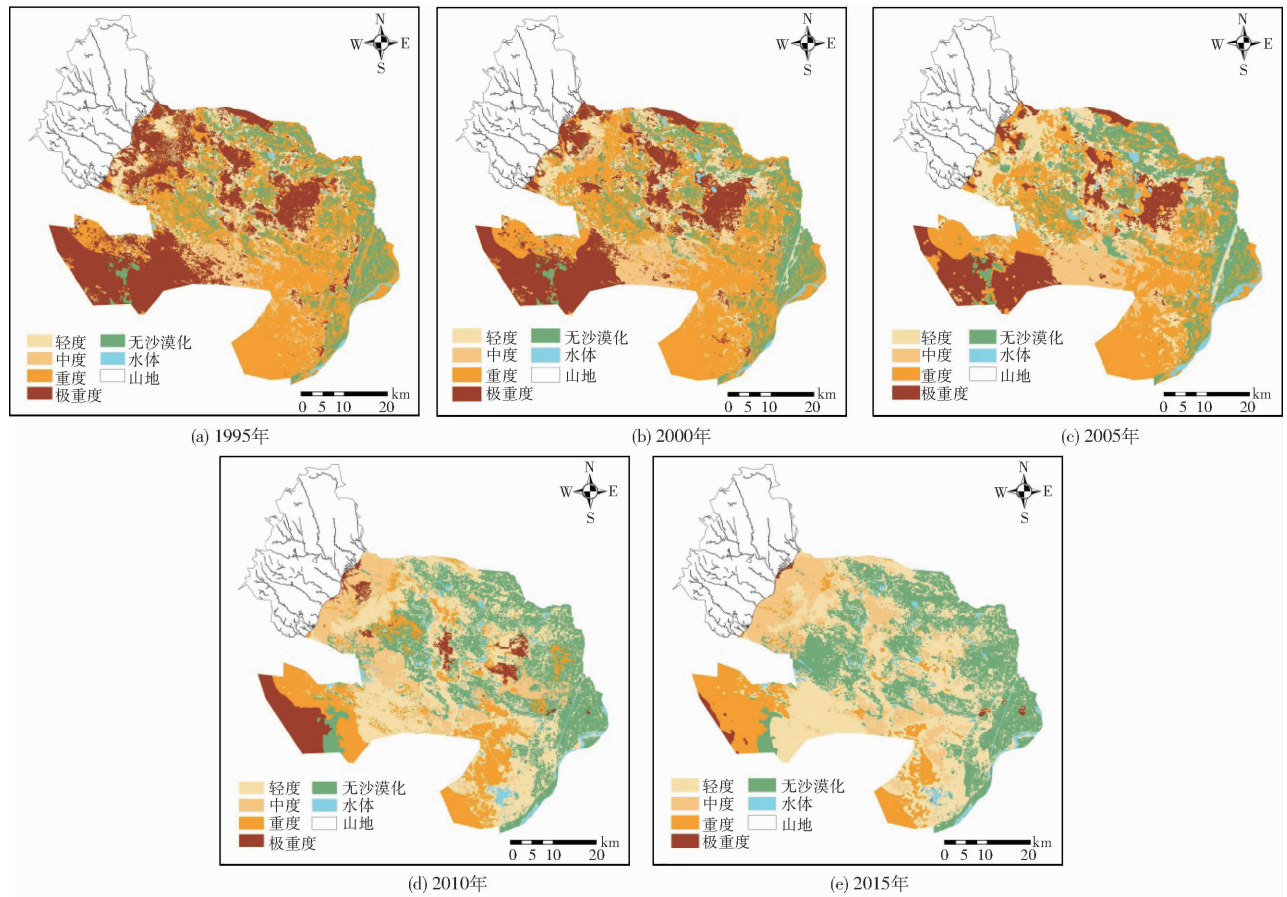


图 2 1995—2015 年沙漠化空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of desertification in 1995—2015

表 2 1995—2015 年沙漠化各等级面积及所占比例

Tab.2 Area and its proportion of each desertification level from 1995 to 2015

沙漠化等级	1995 年		2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
轻度沙漠化	314.69	10.61	367.94	12.47	500.00	16.87	585.93	19.60	513.93	17.32
中度沙漠化	271.50	9.16	300.56	10.19	664.15	22.41	788.84	26.38	608.84	20.53
重度沙漠化	903.27	30.47	1 070.85	36.30	608.57	20.53	455.38	15.23	565.38	19.06
极重度沙漠化	1 059.73	35.75	772.74	26.19	359.50	12.13	208.11	6.96	178.11	6.00
无沙漠化	415.19	14.01	438.28	14.85	831.82	28.06	951.50	31.83	1 100.50	37.09

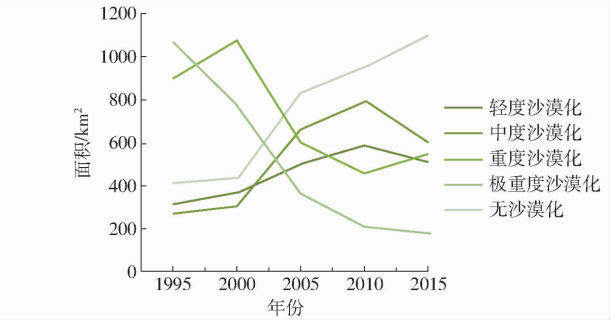


图 3 沙漠化各等级面积趋势图

Fig.3 Area trends of each desertification level

2.2 Logistic – CA – Markov 模型沙漠化模拟结果

在磴口县实际状况基础上考虑沙漠化变化驱动因子,但是由于数据收集、因子量化等限制,本文主要从自然环境和社会经济两方面选择影响磴口县沙漠化变化的驱动因子,包括 NDVI、地下水埋深、蒸散发、与建筑用地距离、与水域距离以及

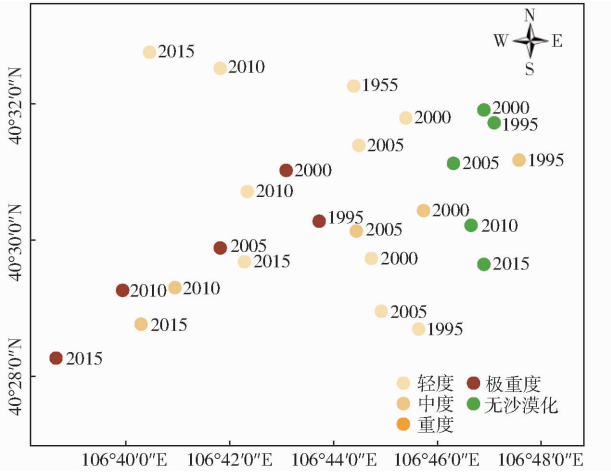


图 4 沙漠化各等级重心转移图

Fig.4 Gravity transfer center of each desertification level

如图 5。植被分布情况、地下水环境、植被蒸腾等自然因素在干旱半干旱地区均是沙漠化的重要指标;

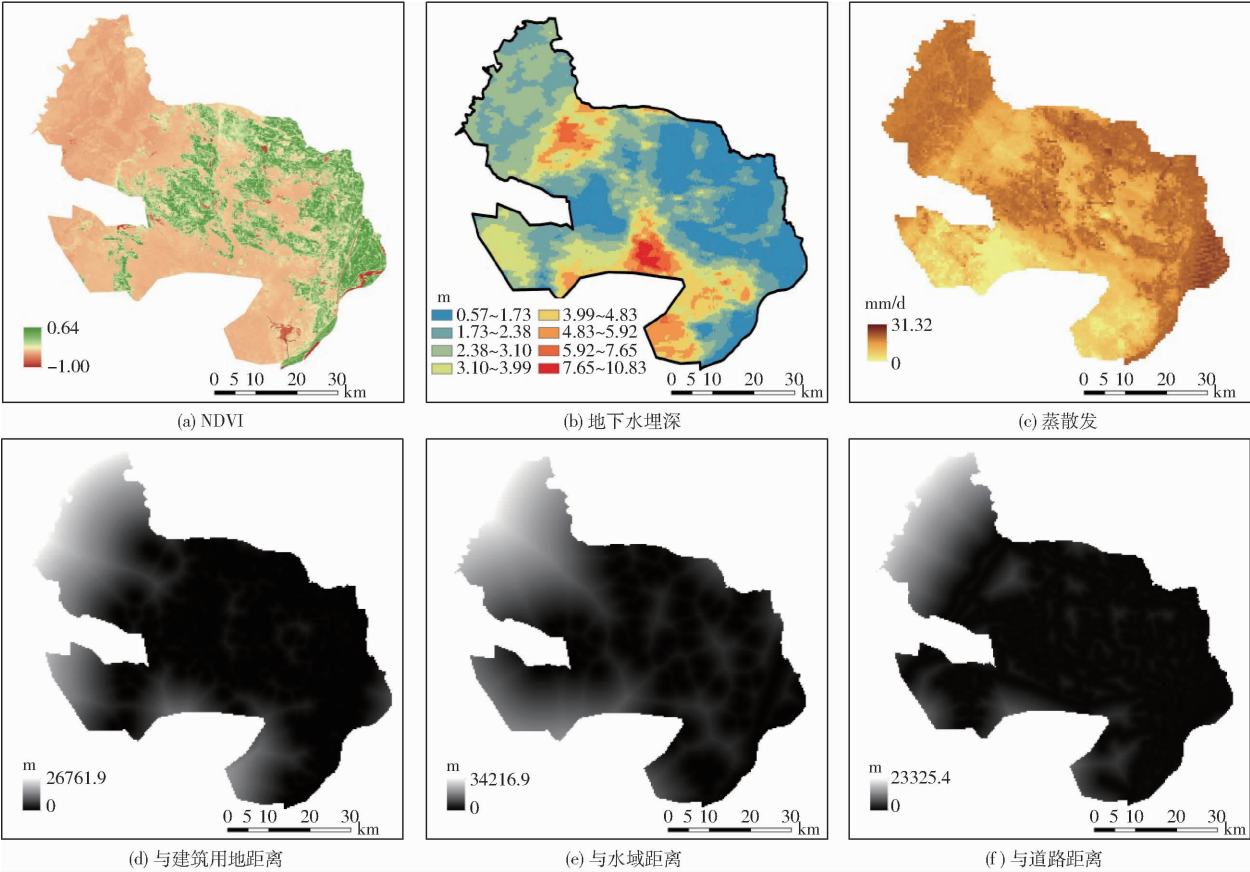


图 5 驱动因子

Fig.5 Driving factors

与建筑用地距离、与水域距离以及道路距离代表交通便利程度,影响人们对土地利用的决策。因此,本文共选取这 6 个因子作为 CA 模型的 Logistic 参数。

将上述 6 种驱动因子做标准化处理,取值范围在 0~1 之间,消除量纲影响,得到对应各沙漠化类型的二元 Logistic 回归方程系数。采用二元 Logistic 回归方程分析磴口县沙漠化分类变化和驱动因子之间回归关系,获得各沙漠化类型空间分布适宜性概率,作为 Logistic - CA - Markov 模型的转换规则。以 2010 年沙漠化分类数据为基期年数据,2005—2010 年沙漠化分类面积转移矩阵表作为 Markov 面积转移矩阵文件(表 3),2010 年磴口县二元 Logistic 回归的各沙漠化类型空间适宜性概率图为 Logistic - CA - Markov 模型转换规则文件,模拟年份设置为 5 年,选择 5×5 的滤波器,根据上述设置运行 CA - Markov 模块,就可以得到基于 2010 年沙漠化分类

数据的 2015 年沙漠化分类模拟预测图(图 6a)。从基于 Logistic - CA - Markov 模型的模拟结果中可以看出,模拟的极重度沙漠化面积、无沙漠化面积均多于 2015 年实际情况,模拟结果与实际沙漠化现状有一定误差,但总体趋势相对一致。

表 3 2005 年到 2010 年磴口县各沙漠化等级转移概率矩阵

Tab.3 Transfer probability matrix of each desertification level in Dengkou County from 2005 to 2010 km²

	轻度 沙漠化	中度 沙漠化	重度 沙漠化	极重度 沙漠化	无沙漠化
轻度沙漠化	0.730 5	0.017 9	0.028 6	0.013 2	0.131 1
中度沙漠化	0.092 4	0.794 1	0.108 2	0.032 6	0.047 7
重度沙漠化	0.035 1	0.047 6	0.800 7	0.289 5	0.008 4
极重度沙漠化	0.013 6	0.054 7	0.054 0	0.662 4	0.001 5
无沙漠化	0.128 4	0.085 7	0.008 5	0.002 3	0.811 3

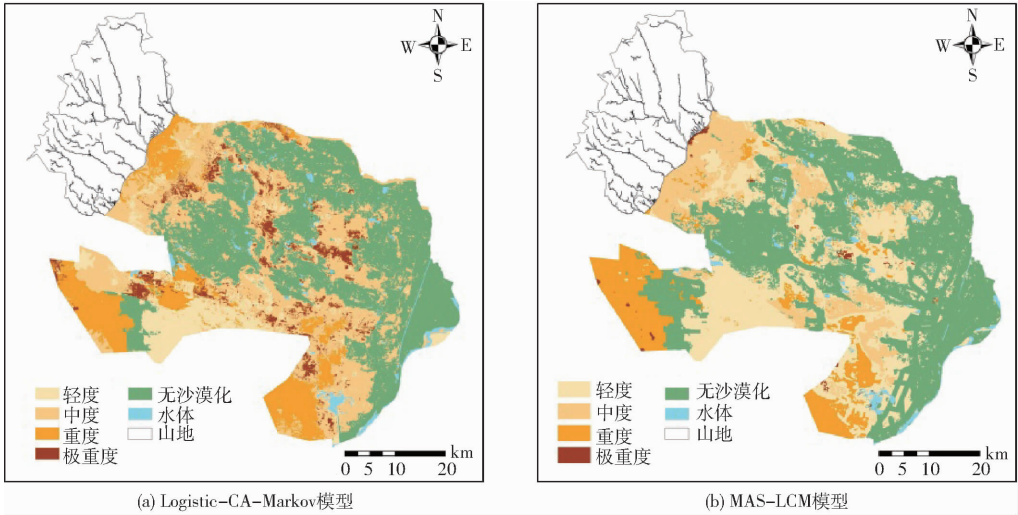


图 6 2015 年沙漠化空间分布模拟结果

Fig. 6 Simulation results of desertification spatial distribution of 2015

2.3 MAS - LCM 模型沙漠化模拟结果

以 Logistic - CA - Markov 模型为基准,耦合 MAS 模型,可以为 MAS - LCM 耦合模型模拟预测提供精度保证。以 2010 年沙漠化分类数据为基期年数据,2005—2010 年沙漠化分类面积转移矩阵表作为 Markov 面积转移矩阵文件(表 3),2015 年磴口县 MAS 模型规则(图 7)耦合 Logistic - CA - Markov 模型作为转换规则文件,模拟年份设置为 5 年,选择 5×5 的滤波器,根据上述设置运行 CA - Markov 模块,得到基于 2010 年沙漠化分类数据以及 2015 年规划数据的 2015 年沙漠化分类模拟预测图(图 6b)。

沙漠化变化是一个十分复杂的地理过程,受到自然条件、人文因素、社会经济等诸多方面的影响,如图 6b 所示,MAS 模型考虑社会规划部分,规划区

域与实际发展趋势相吻合,模拟精度较高,西部阴山山前重度沙漠化模拟、东部县城无沙漠化模拟面积均与实际接近,县城无沙漠化面积逐年增多,磴口县全境沙漠化程度均有所好转,与磴口县逐年治理沙漠的相关政策相符。

2.4 对比分析

两种模型模拟结果对比分析如图 6 所示,将研究区 2015 年实际沙漠化空间分布(图 2e)与 2 种方法模拟沙漠化等级对比发现,模拟结果整体空间布局与实际整体空间布局比较接近。其中南部地区中度沙漠化模拟精度最为突出,东部磴口县建设用地分布分散周围多环绕农业用地,模拟结果误差相对较大。基于 MAS - LCM 耦合模型模拟预测的磴口县 2015 年沙漠化分类图中,在利用现状发展条件和利用主体行为影响下,耕地、林地、建设用地代表下

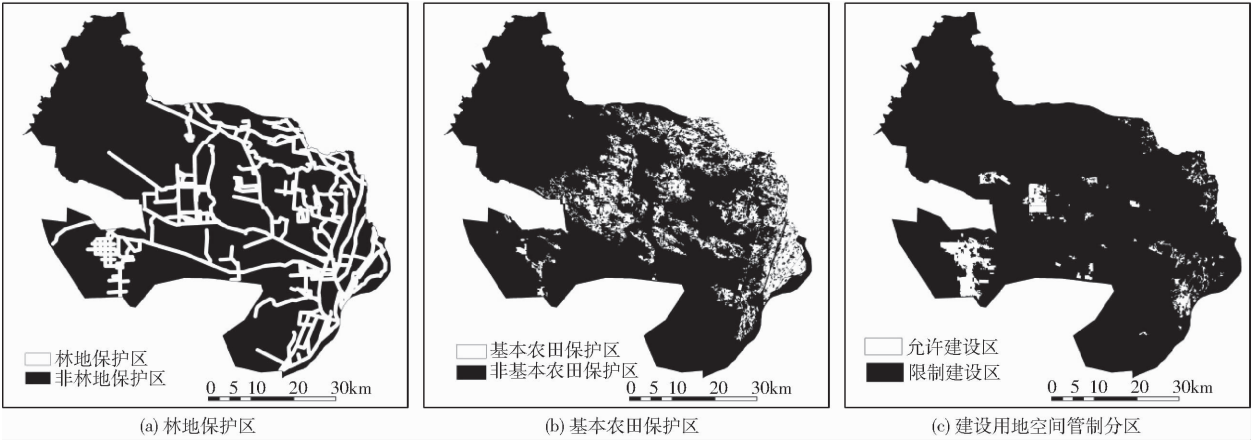


图 7 MAS 模型驱动因子
Fig.7 Driving factors of MAS model

的无沙漠化面积增加,沙漠化面积减少,水体面积在减少,与实际情况更为接近。

为定量验证模型精确程度,首先对两种模型模拟沙漠化等级图与实际沙漠化等级图做点对点对比分析,然后对模拟沙漠化等级图与实际沙漠化等级图进行 Kappa 系数检验。结果显示 Logistic - CA - Markov 模型、MAS - LCM 模型模拟准确率分别为 71.06%、82.51%,Kappa 系数分别为 0.54、0.62,具有一定的可信度。结果表明,MAS - LCM 模型模拟精度优于 Logistic - CA - Markov 模型。在 CA - Markov 模型基础上,结合林地保护区、基本农田保护区、建设用地空间管制分区等人为规划因素,模拟结果更加符合未来发展趋势,把代表土地规划主体的人文因素添加到模型中,对提高模型模拟精度有重要作用。

3 结论

(1)磴口县沙漠化程度由西南向东北呈递减趋势,重度和极重度沙漠化景观主要分布在磴口县西南,水体景观包括位于磴口县东南部的黄河以及分布于中部的各个湖泊,1995—2015 年间,明显可看

出重度及极重度沙漠化面积减小,轻度沙漠化景观面积逐渐增大。2005 年后非沙漠化景观有逐步成为磴口县主体景观的趋势,水体景观逐步发挥其生态枢纽功能,表明磴口县沙漠化程度有所改善,生态环境得到较好修复。

(2)从基于 Logistic - CA - Markov 模型的模拟结果中可以看出,与实际沙漠化现状有一定误差,极重度沙漠化面积与无沙漠化面积均多于 2015 年实际情况,点对点准确率为 71.06%,Kappa 系数为 0.54,模拟精度中等。Logistic - CA - Markov 模型具有在地理空间和数量上的模拟预测优势,还考虑土地沙漠化驱动因素随时间的变化,但是难以分析土地沙漠化决策行为主体的土地利用选择。

(3)MAS 模型突出人类社会的作用,添加林地保护区、基本农田保护区、建设用地空间管制分区影响因子到模型中,模拟预测结果更符合土地利用的自然性、社会性和人文性特征,基于 MAS - LGM 耦合模型模拟预测的磴口县 2015 年沙漠化分类数据,总体模拟精度及 Kappa 系数均优于基于 CA - Markov 模型,点对点准确率为 82.51%,Kappa 系数为 0.62。

参 考 文 献

1 朱俊凤,朱震达.中国沙漠化防治[M].北京:中国林业出版社,1999:2-7.
2 胡光印,董治宝,逯军峰,等.黄河源区 1975—2005 年沙漠化时空演变及其成因分析[J].中国沙漠,2011,31(5):1079-1086.
HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al. Spatial and temporal changes of desertification land and its influence factors in source region of the Yellow River from 1975 to 2005[J]. Journal of Desert Research, 2011,31(5):1079-1086. (in Chinese)
3 董智,李红丽,孙保平,等.乌兰布和沙漠东北缘磴口县沙尘天气变化规律及其对防护林体系建设的响应[J].干旱区资源与环境,2004(增刊 1):269-275.
DONG Zhi, LI Hongli, SUN Baoping, et al. The change of sand- wind climate and response to the shelter belt system construction in the Northeastern Ulanbuh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004(Supp. 1):269-275. (in Chinese)
4 赵志峰.内蒙古磴口县生态环境脆弱性评价[D].兰州:西北师范大学,2007.
ZHAO Zhifeng. Evaluation of eco-environment fragility in Dengkou County, Inner Mongolia, China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2007. (in Chinese)
5 杨根生,刘连友,刘志民.磴口县土地沙漠化及其整治[J].干旱区资源与环境,1991(1):1-11.
YANG Gensheng, LIU Lianyou, LIU Zhimin. Land desertification and its integrated transformation of Dengkou County[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1991(1):1-11. (in Chinese)

- 6 吴薇,王熙章,姚发芬. 毛乌素沙地沙漠化的遥感监测[J]. 中国沙漠,1997,17(4):83-88.
WU Wei, WANG Xizhang, YAO Fafen. Applying remote sensing data for desertification monitoring in the Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research,1997,17(4):83-88. (in Chinese)
- 7 王葆芳,刘星晨,王君厚,等. 沙质荒漠化土地评价指标体系研究[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(4):23-28.
WANG Baofang, LIU Xingchen, WANG Junhou, et al. Study on monitoring and assessment indicator systems of sandy desertification in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2004,18(4):23-28. (in Chinese)
- 8 张玉贵,刘华. TM 影像的计算机屏幕解译和荒漠化监测[J]. 林业科学研究,1998,11(6):38-45.
ZHANG Yugui, LIU Hua. Potential of TM imagery for monitoring and assessment of desertified land[J]. Forest Research,1998,11(6):38-45. (in Chinese)
- 9 胡光印,董治宝,逯军峰,等. 长江源区沙漠化及其景观格局变化研究[J]. 中国沙漠,2012,32(2):314-322.
HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al. Land desertification and landscape pattern change in the source region of Yangtze River[J]. Journal of Desert Research,2012,32(2):314-322. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 龚文峰,袁力,范文义. 基于 CA-Markov 的哈尔滨市土地利用变化及预测[J]. 农业工程学报,2012,28(14):216-222.
GONG Wenfeng, YUAN Li, FAN Wenyi. Dynamic change and prediction of land use in Harbin City based on CA-Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(14):216-222. (in Chinese)
- 12 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. 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)
- 13 张启斌,岳德鹏,于强,等. 基于 AES-LPI-CA 模型的磴口县景观格局演化模拟研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):128-134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170515&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.015.
ZHANG Qibin, YUE Depeng, YU Qiang, et al. Simulation of landscape pattern evolution in Dengkou County based on AES-LPI-CA model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):128-134. (in Chinese)
- 14 符蓉,濮励杰,钱敏,等. 区域土地利用变化情景模拟设计与实证分析——基于多智能体系统(MAS)模型[J]. 资源科学,2012,34(3):468-474.
FU Rong, PU Lijie, QIAN Min, et al. Simulation and empirical analysis of regional land-use change based on Multi-Agent System(MAS) model[J]. Resources Science,2012,34(3):468-474. (in Chinese)
- 15 张茜. 基于 CA-Markov 模型的杭州湾南岸湿地景观格局动态模拟与预测[D]. 杭州:浙江大学,2013.
ZHANG Qian. Dynamic simulation and prediction of wetland landscape pattern based on CA-Markov model in southern Hangzhou Bavarea[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2013. (in Chinese)
- 16 BATTY Michael, XIE Yichun. Modelling inside GIS: Part 1. model structures, exploratory spatial data analysis and aggregation[J]. International Journal of Geographical Information Systems,1994,8(3):291-307.
- 17 WALDO Tobler. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography,1970,46(2):234-240.
- 18 罗英伟. 基于 Agent 的分布式地理信息系统研究[D]. 北京:北京大学,1995.
LUO Yingwei. The study on Agent based distributed geographic information system[D]. Beijing:Peking University,1995. (in Chinese)
- 19 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:35.
- 20 梁发超,张文开. 基于 Markov-灰色模型的土地利用结构变化预测[J]. 沈阳大学学报:自然科学版,2008,20(6):110-113.
LIANG Fachao, ZHANG Wenkai. Forecast of land-using structure change based on Markov-grey model[J]. Journal of Shenyang University: Natural Science Edition,2008,20(6):110-113. (in Chinese)
- 21 杨维鸽. 基于 CA-Markov 模型和多层次模型的土地利用变化模拟和影响因素研究[D]. 西安:西北大学,2010.
YANG Weige. The study of the simulation and influencing factors of land use change based on CA-Markov model and multi-level model[D]. Xian: Northwest University,2010. (in Chinese)
- 22 杨青生,黎夏,刘小平,等. 基于 Agent 和 CA 的城市土地利用变化研究[J]. 地球信息科学,2005,7(2):78-81.
YANG Qingsheng, LI Xia, LIU Xiaoping, et al. Urban land use change research based on Agent and cellular automata[J]. Journal of Geo-Information Science,2005,7(2):78-81. (in Chinese)
- 23 PARKER Dawn C, MANSON Steven M. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change[J]. Annals of the Association of American Geographers,2003,93(2):314-337.
- 24 张龙飞. 基于 MAS-LCM 耦合模型的孟连县土地利用时空变化模拟预测研究[D]. 昆明:云南大学,2016.
ZHANG Longfei. Simulation and prediction of land use time and space change in Menglian county based on MAS-LCM coupling model[D]. Kunming:Yunnan University,2016. (in Chinese)
- 25 罗平,李森,李满春,等. 海南岛西部土地沙漠化时空模拟及虚拟政策实验[J]. 地理与地理信息科学,2006,22(6):66-70.
LUO Ping, LI Sen, LI Manchun, et al. Spatio-temporal simulation and experiment of policies of desertification land in the west of Hainan Island[J]. Geography and Geo-Information Science,2006,22(6):66-70. (in Chinese)
- 26 段翰晨,王涛,薛炯,等. 科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局——以内蒙古自治区奈曼旗为例[J]. 地理学报,2012,67(7):917-928.
DUAN Hanchen, WANG Tao, XUE Xian, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian desertification and landscape pattern in Horqin sandy land: a case study of Naiman Banner in Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(7):917-928. (in Chinese)