

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.015

磴口县景观格局 AES - LPI - CA 模型演化模拟

张启斌¹ 岳德鹏¹ 于强¹ 李宁¹ 宁立新² 尹波¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 河南大学环境与规划学院, 郑州 450004)

摘要: 以内蒙古巴彦淖尔市磴口县为研究区, 在 LPI - CA - Markov 模型的基础上构建 AES - LPI - CA 模型, 利用人工内分泌系统 (AES) 调整元胞自动机领域中中心元胞的转移概率, 并基于磴口县 2000 年与 2007 年景观格局数据对县域 2014 年景观格局进行模拟, 将该模型模拟结果与 LPI - CA - Markov 模型、CA - Markov 模型的模拟结果进行对比, 结果显示 3 种模型模拟结果的 KIA (Kappa index of agreement, 以 2014 年实际景观分布为参照) 依次为 0.823 6、0.785 5、0.768 2, AES - LPI - CA 模型显示了较高模拟精度。

关键词: AES - LPI - CA 模型; 元胞自动机; 景观格局指数; 景观格局; 磴口县

中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0128-07

Simulation of Landscape Pattern Evolution in Dengkou County
Using AES - LPI - CA Model

ZHANG Qibin¹ YUE Depeng¹ YU Qiang¹ LI Ning¹ NING Lixin² YIN Bo¹

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

2. College of Environment and Planning, Henan University, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Landscape pattern is closely related to many local ecological processes. Study on the future evolution of landscape pattern in the arid area of Northwest China is of great significance to local prevention and controlling of desertification and water and soil conservation. Therefore, taking Dengkou County, Bayannaoer City, Inner Mongolia as study area, a AES - LPI - CA model was built based on the LPI - CA - Markov model to simulate the landscape pattern of Dengkou County in 2014 by using the remote sensing image interpretation data of 2000 and 2007. Firstly, the landscape pattern transfer appropriate atlas was built and artificial endocrine system (AES) was used to adjust the probabilities of the CA center cell transfer into different landscape types, the cellular automata neighborhood rule was taken into consideration, and the transfer direction of the center cell was settled. Then the un-transition probability (UTP) map which was built based on the quantitative relation between landscape index (LPI) and UTP was used to define the occurrence probability of the transfer, and the landscape transition probability matrix which was generated by using Markov model was used to make the final decision of transfer. The simulation result of the model was compared with the results of LPI - CA - Markov model and CA - Markov model. The Kappa index of agreement (KIA) of simulation results of the three models were 0.823 6, 0.785 5 and 0.768 2, respectively, AES - LPI - CA model had a higher simulation precision. The research result had referential values for the study on future evolution of landscape and formulation of ecological policy.

Key words: AES - LPI - CA model; cellular automata; landscape pattern index; landscape pattern; Dengkou County

引言

景观格局是指由各种原因形成的一系列大小、形状各异, 排列不同的景观镶嵌体在景观空间的排列^[1-2], 它决定着资源和环境的分布形式, 与景观中的多种生态过程密切相关, 深刻影响着生态系统的

收稿日期: 2016-08-19 修回日期: 2016-09-18

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: 张启斌(1990—), 男, 博士生, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究, E-mail: bin0538@outlook.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

稳定性、抗干扰能力以及恢复能力^[3-5]。磴口县处于干旱区,河套平原与乌兰布和沙漠交错地带,研究当地景观格局变化,模拟其景观格局未来的演化特征,对磴口县乃至整个河套地区的防沙治沙与水土保持工作具有重要意义。

CA-Markov 模型是近年来景观格局变化模拟研究中应用较多的模型之一^[6-8],为了提高模型模拟精度,众多学者或者将元胞自动机与其他模型结合,或者完善 CA 的转换规则,MANSON^[9]将多智能体与元胞自动机结合,模拟了莫斯科地区尤卡垣半岛南部的土地利用格局,何春阳等^[10]将系统动力学模型与元胞自动机结合,模拟了中国北方 13 省未来 20 年的土地利用格局,然而在当前的研究中元胞自动机与其他模型多为松散结合,耦合其他模型改进元胞自动机邻域规则的研究相对较少^[11-12]。

人工内分泌系统 (AES) 是一种模仿人体内分泌系统信息处理特性的新的智能模型和方法,具有与元胞自动机相同的分布式与动态调节的特点^[13],在机器人行为控制、情感建模、多智能体等问题中有较多应用^[14-15],而耦合元胞自动机进行景观格局模拟的研究较少。本文利用 AES 对 CA 邻域规则进行改进并在景观转移规则中加入对景观格局指数的考量,构建 AES-LPI-CA 模型,对磴口县景观格局进行模拟,以期对磴口县景观变化研究提供理论与方法支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古巴彦淖尔市磴口县地处东经 107°05′、北纬 40°13′,位于内蒙古自治区西南部。县域西北为狼山脉,东部为黄河,属典型的荒漠绿洲交错区,河套平原与乌兰布和沙漠在县域内由东北向西南逐渐过渡,生态区位极为关键。地势西北高东南低,狼山脉以东尽是平原,海拔高度 1 030~2 046 m。温带大陆性季风气候特征明显,年平均降水量 144.5 mm,年平均蒸发量 2 397.6 mm,年平均风速 3 m/s,风蚀强烈。水资源较为丰富,黄河流经县域总里程 52 km,地表水域总面积 24.07 km²。近年来,县域景观格局发生了较大变化,针对县域景观格局演变特点,研究模拟未来县域景观格局的方法,对制定长期防沙治沙与环境保护政策有重要意义。

1.2 数据来源与处理

主要数据源为磴口县 2000、2007、2014 年遥感影像,其中 2000、2007 年遥感影像为 Landsat 5 TM 传感器影像,2014 年遥感影像为 Landsat 8 OLI 传感器影像,影像采集时间均为植被特征明显的夏季。根据

《生态环境状况评价技术规范》中的土地利用一级分类体系,结合研究区特点,建立了包括耕地、水域、林地、建设用地、沙地和山地 6 种景观类型的景观分类体系,遥感影像解译借助 ENVI 5.2 软件以监督分类-最大似然法完成。

1.3 技术路线

将 AES 与 CA 结合以调整 CA 邻域中中心元胞的转移概率,并在景观转移概率中加入对景观格局指数的考量,构建 AES-LPI-CA 模型,模拟磴口县 2014 年景观格局技术路线如图 1 所示。

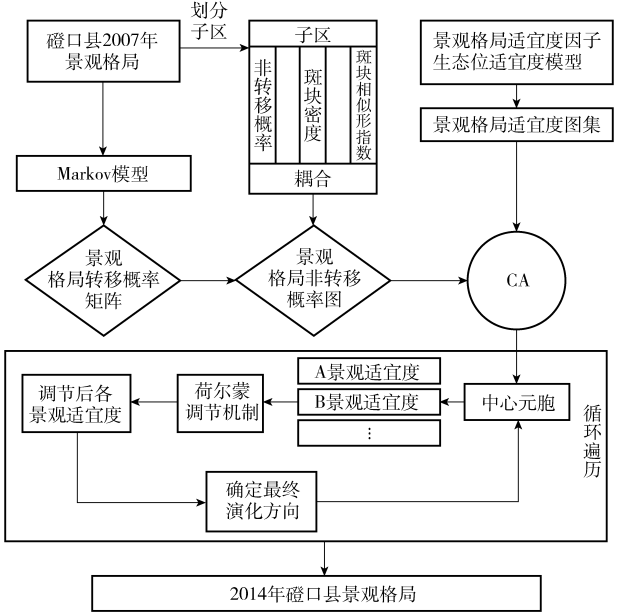


图 1 研究技术路线图

Fig. 1 Research technical map

1.4 人工内分泌调节系统 (AES)

内分泌腺对与各类荷尔蒙释放数量的调节机制由 FARHY^[16]于 2001 年提出,该调节机制分为激励函数 $F_{up}(G)$ 和抑制函数 $F_{down}(G)$,2 种调节机制都服从 Hill 函数规律且具有非负性和单调性,公式为

$$F_{up}(G) = \frac{G^n}{T^n + G^n} \quad (T > 0; n \geq 1) \quad (1)$$

$$F_{down}(G) = \frac{T^n}{T^n + G^n} \quad (T > 0; n \geq 1) \quad (2)$$

式中 G ——自变量 T ——阈值
 n ——Hill 系数

函数曲线上升或下降的斜率由 n 和 T 共同决定。该函数具备性质

$$F_{up} = 1 - F_{down} \quad (3)$$

$$F_{up}(T) = F_{down}(T) = \frac{1}{2} \quad (4)$$

$$0 \leq F_{up(down)}(G) \leq 1 \quad (5)$$

假设荷尔蒙 a 的分泌量受荷尔蒙 b 调节,那么荷尔蒙 a 的分泌速率 S_a 与荷尔蒙 b 浓度 C_b 的关系

满足

$$S_a = \alpha F_{up(down)}(C_b) + S_{a,basd} \tag{6}$$

式中 $S_{a,basd}$ ——荷尔蒙 a 原本单位时间内释放量，mL
 α ——常数项

以上述理论为基础，在 CA 的邻域规则中引入人工内分泌调节系统 (AES)。将邻域内各景观类型视为不同种类荷尔蒙，将其在邻域内的面积视为当前环境下不同荷尔蒙的浓度，中心元胞即将释放何种荷尔蒙 (也即将演化为何种景观类型)，由不同荷尔蒙的浓度 (不同景观类型在邻域内所占面积) 决定，计算公式为

$$P_c = P_c^0 \left[1 + \alpha \frac{S_{ac}^{n_c}}{(S_{max} - S_{min})^{n_c} + S_{ac}^{n_c}} \right] \tag{7}$$

式中 P_c ——调整后邻域中心元胞演化为某景观类型的初始概率，%
 P_c^0 ——邻域中心元胞演化为某景观类型的初始概率，%
 S_{max} ——当前邻域内所占最大比例的景观类型面积，km²
 S_{min} ——当前邻域内所占最小比例的景观类型面积，km²
 S_{ac} ——当前元胞潜在演化景观类型在邻域内的面积，km²
 n_c ——常数项系数

例如在磴口县景观变化模拟中，当对邻域内中心元胞演化为某景观类型 i 的概率进行调整时，将邻域内景观类型 i 所占面积视为当前荷尔蒙浓度，且中心元胞的荷尔蒙释放受其影响，根据式 (7)，实现对中心元胞演化为景观类型 i 的概率进行调整。

1.5 景观格局指数

景观格局指数 (LPI) 是对景观格局特征的抽象与定量表征，对研究区的多种生态过程有重要影响^[17-18]，因此将景观格局指数与元胞自动机结合，有助于提高景观格局演化模拟精度。通过建立景观格局指数与景观格局非转移概率 (UTP) 间的定量耦合关系，对研究区每一景观类型的演化概率进行调整，将区域景观格局信息整合进 CA 模型中^[19]。

在众多景观格局指数中，选取类型水平的斑块密度 (PD) 以及类型水平的相似性指数 (LSIM) 进行研究。其中，PD 表征研究范围内，某种景观或土地利用类型单位面积上的斑块密度，用以衡量景观类型的破碎程度，在景观类型不变的前提下，PD 越高，则景观破碎化程度越高^[20]，因此该情形下的景观斑块将更容易演变为其他类型，其计算公式为

$$P_{di} = \frac{m}{\sum_{j=1}^m a_{ij}} \tag{8}$$

式中 P_{di} ——第 i 类景观类型的斑块密度
 a_{ij} ——斑块 ij 的面积，km²
 m ——斑块总数 j ——斑块编号

LSIM 用以量化景观格局的组成，其计算公式为

$$L_{SIMi} = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}}{A} \times 100\% \tag{9}$$

式中 L_{SIMi} ——第 i 类景观类型的斑块相似性指数，%
 A ——研究区域景观总面积，km²

若某景观类型有较高的 LSIM 指数则表明研究范围内该景观类型占优^[21]，则其演变为其他景观类型的概率较低。

2 结果与分析

2.1 景观转移概率分析

基于 Markov 无后效性理论，利用 IDRISI Selva 软件中的 Markov 模块，计算磴口县 2007—2014 年景观类型转移概率矩阵，如表 1 所示。由分析结果可知各景观类型中山地与沙地向其他景观类型演变的概率较小，表明 2 种景观类型在演变过程中的不确定性较小，其中山地的非转移概率达到 99.15%，这主要是由山地景观在 2000—2007 年间变动极少所致；沙地向林地演变的概率最高，达到 27.36%，反映出 2000—2007 年间县域防沙治沙与水土保持工作的成效。林地、耕地与水域的非转移概率均接近 50%，其中林地与水域向沙地演变的概率较大，分别为 28.74% 与 22.61%，该结果主要受 2000—2007 年间较高的土地沙化风险影响。建筑用地的非转移概率仅为 28.76%，演变为林地与耕地的概率偏高，表明景观预测结果中，建筑用地景观将出现更大的不确定性，这与 2000—2007 年县域土地集约利用政策的实施密切相关。

表 1 磴口县 2007—2014 年景观转移概率矩阵
Tab.1 Landscape transition probability matrix form 2007 to 2014 of Dengkou County %

景观类型	2014 年					
	林地	耕地	沙地	山地	水域	建筑用地
2007 年	林地	50.91	13.11	28.74	0.50	2.37
	耕地	26.66	52.05	0.82	0.09	5.42
	沙地	27.36	3.87	61.28	2.79	0.82
	山地	0.45	0.02	0.37	99.15	0
	水域	9.83	4.99	22.61	0.84	50.88
	建筑用地	34.42	30.70	2.63	0.13	3.33

2.2 景观适宜性分析

综合考虑县域当前地形、水文、社会经济等要素,根据生态位适宜度模型,针对各要素,评价每种景观类型在县域空间范围内的开发适宜度,各景观类型适宜度评价标准如表 2 所示,利用 IDRISI Selva 软件的 logistic regression 建模工具生成各景观类型空间分布适宜性图集。

表 2 各景观类型空间适宜度评价

Tab.2 Spatial suitability evaluation of each land scape type

景观类型	因子	适宜性条件设置
耕地	坡度因子	越小越适宜,适宜度上限为 25°
	地下水埋深	越小越适宜
	与当前景观距离	越小越适宜
	干旱度指数	越小越适宜
建筑用地	与主要道路距离	越小越适宜
	坡度因子	越小越适宜,适宜度上限为 15°
	与当前景观距离	越小越适宜
林地	坡度因子	越小越适宜,适宜度上限为 30°
	坡向因子	南向设置为 1,东南西南为 0.75,其他坡向设置为 0.25
	地下水埋深	越小越适宜
	干旱度指数	越小越适宜
	与当前景观距离	越小越适宜
水域	与当前景观距离	越小越适宜
山地	当前景观分布	当前景观分布区域为 1,其他区域为 0
沙地	与当前景观距离	越小越容易演化为沙地

2.3 LPI 与 UTP 耦合分析

利用 Arc Map 10.2 中的 Fishnet 工具,按照图 2 所示方案将研究区划分子区;利用 IDRISI Selva 计算每一子区内各景观类型的转移概率矩阵,进而推算子区内每一景观类型的非转移概率;利用 Fragstats 4.2.1 计算每一子区 2007 年类型水平的斑块密度与斑块相似性指数;以各子区斑块密度、斑块相似性指数为自变量,以非转移概率为因变量,拟合三者间的数量关系,拟合结果显示 LSIM 与非转移概率为正相关而 PD 与非转移概率呈负相关关系,根据拟合结果重新计算各子区内不同景观类型的非转移概率,结果如图 3 所示。

县域子区各景观类型的非转移概率受景观转移概率、景观相似性指数、斑块密度 3 方面影响,最大非转移概率为 71%,出现在山地及部分子区的沙地景观中,最小非转移概率为 0.4%,出现在县域东南 26 号子区的水域景观中。从非转移概率的空间分布来看,县域西部山地分布范围有最高的非转移概率,除编号为 2 的子区,该区域景观类型非转移概率均在 70% 以上,这一方面是由于山地景观本就难以

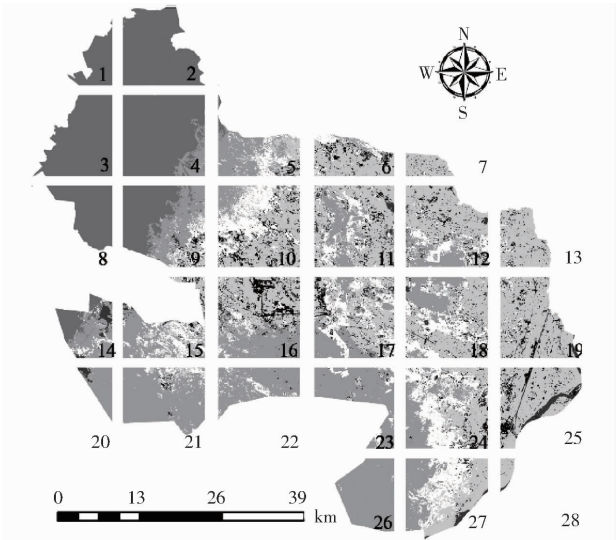


图 2 子区划分示意图

Fig.2 Sketch map of sub region division

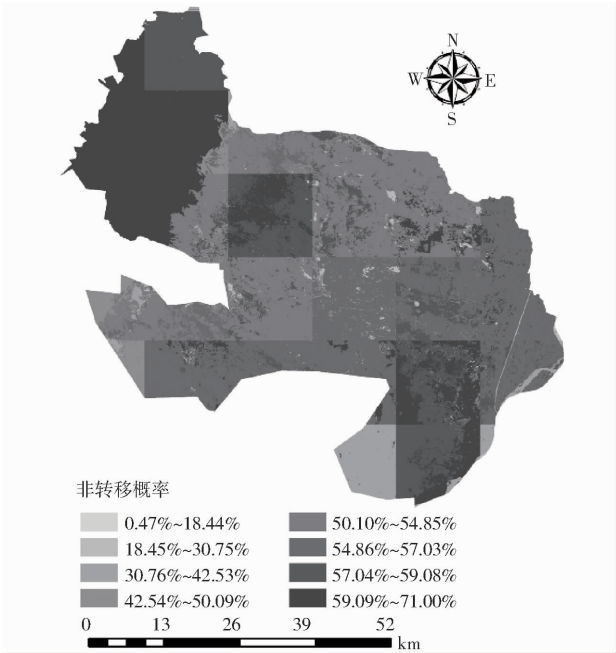


图 3 磴口县非转移概率图

Fig.3 Non transition probability map of Dengkou County

发生转移,另一方面是因为山地景观连通性好,相似性指数高,破碎度极低。县域中部编号为 10 的子区也有较高非转移概率,其平均值为 57%,子区中沙地景观非转移概率最高,达到 71%,这主要是由于该子区内部沙地景观较为连续完整,相似性指数偏高而斑块密度较小,子区中水域有最低非转移概率,为 19%,这主要是由于子区内部没有面积较大的完整水域,水域景观破碎度较高所致。县域南部编号为 24、27 的子区非转移概率平均值为 55%,与周边子区相比同样偏高,该子区中林地具有最高的非转移概率,为 61%,子区中水域景观非转移概率最低,为 19%。总体来看,非转移概率综合反映了景观格局转移概率矩阵与景观格局指数两方面信息,能较好反映各子区特点。

2.4 基于 AES-LPI-CA 模型的景观格局模拟

根据 PAN 等^[22]的研究成果以及本研究具体情况,设置元胞自动机邻域大小为 9×9 摩尔邻域,综合考虑景观类型适宜度、非转移概率并在邻域中增加荷尔蒙调节机制,根据以下算法遍历每一元胞,确定其演化方向。具体算法为:①根据磴口县景观格局适宜性图集,确定当前元胞演化为每一景观类型的概率。②根据荷尔蒙调节机制,将当前邻域范围内不同景观类型在邻域内所占面积视为不同种类荷尔蒙浓度,以式(7)调整中心元胞演化为各景观类型的概率,并结合元胞自动机邻域规则确定最大概

率潜在景观演化类型。③根据 2.3 节的分析结果确定中心元胞的非转移概率,生成一个 0~1 之间的随机数,并将其与非转移概率进行比较,以确定该演化是否发生。④根据 2.1 节中的转移概率矩阵,确定当前演化方向的景观类型间所发生的转移面积是否已经超过转移概率矩阵中所表征的最大值,若尚未超过,则该演化最终发生,否则不发生。⑤根据上述算法,遍历每一元胞,完成一次迭代,根据向前预测年限确定最终迭代次数,本研究向前预测 7 年,因此迭代次数为 7。以 C#为编程语言实现模型运行,最终结果如图 4a 所示。

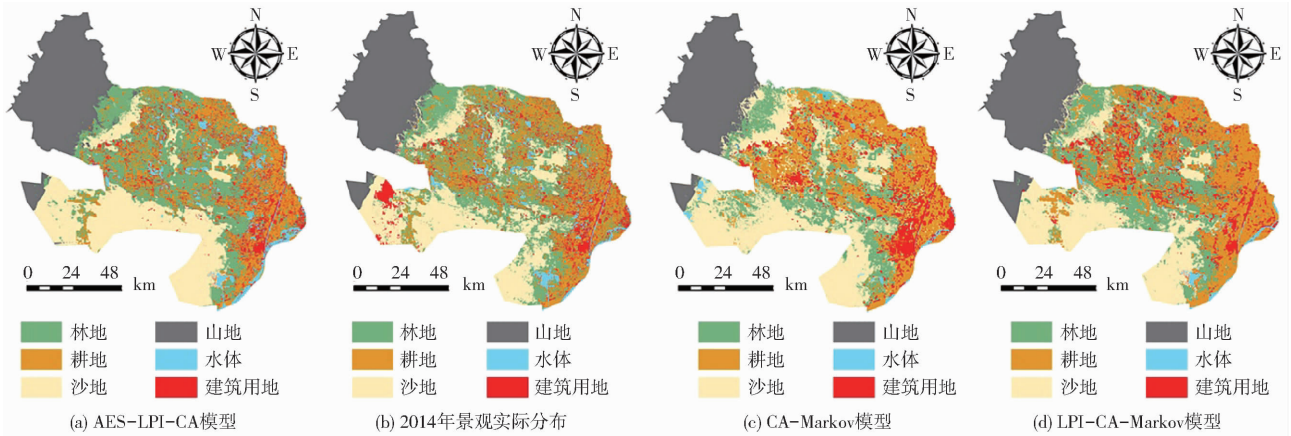


图 4 磴口县景观格局模拟图

Fig. 4 Landscape pattern simulations of Dengkou County

2.5 模型模拟精度分析

将模型模拟结果与县域 2014 年实际景观格局进行目视对比,验证 AES-LPI-CA 模型的精度与可靠性。对比可知,模型模拟结果与实际景观分布总体趋势相同(图 4a、4b),其中建筑用地、山地、水体景观有较好的模拟精度,而林地、耕地、沙地景观目视差别相对明显。

通过 IDRISI Selva 软件中的 Cross Tab 模块进行列联表分析,逐像元对比模型模拟结果与实际景观类型间的差异,对模型模拟精度进行定量分析,列联表分析结果如表 3 所示,模型模拟面积、2014 年实际面积、二者相对误差、各景观模拟 KIA (Kappa index of agreement,以 2014 年实际景观分布为参照)均在表中进行了展示。结果表明,模型模拟结果与实际景观类型接近程度较高,能较好满足模拟精度要求,各景观类型相对误差的绝对值均小于 8%,模拟精度较好。在各景观类型中,山地景观精度最高,建筑用地次之,而水体、林地、沙地景观的精度偏低。林地、耕地、沙地、山地、水体、建筑用地景观的 KIA 分别为 0.561 1、0.689 3、0.721 8、0.994 8、0.662 2、0.729 8。在各景观模拟结果中,山地景观的模拟精度达到最高,其 KIA 为 0.994 8,这主要是由县域山

表 3 AES-LPI-CA 模型模拟精度评价
Tab. 3 Simulation accuracy evaluation of AES-LPI-CA

景观类型	模拟面积/ km ²	实际面积/ km ²	相对误差/ %	KIA
林地	887.96	956.56	-7.17	0.561 1
耕地	684.03	645.53	5.96	0.689 3
沙地	920.47	861.20	6.88	0.721 8
山地	743.10	766.57	-3.06	0.994 8
水体	133.70	144.51	-7.48	0.662 2
建筑用地	255.28	250.14	2.05	0.729 8

地景观分布范围相对确定、规则设置简单明确所致。为进一步验证模型精度,分别利用 CA-Markov 模型,LPI-CA-Markov 模型对磴口县 2014 年景观格局进行模拟预测,结果如图 4c 和图 4d 所示,对 2 种模型的模拟结果分别进行列联表分析,得出各景观类型与总体 KIA,并与 AES-LPI-CA 模型模拟精度进行比较,不同景观类型对比结果如图 5 所示。对比分析可知,在相同转移概率矩阵与相同景观格局适宜性图集的约束下,3 种模型模拟结果的精度由高到低依次为 AES-LPI-CA 模型、LPI-CA-Markov 模型以及 CA-Markov 模型,3 种模型的总体 KIA 指数依次为 0.823 6、0.785 5、0.768 2。AES-LPI-CA 模型在对建筑用地的模拟中优势最为明

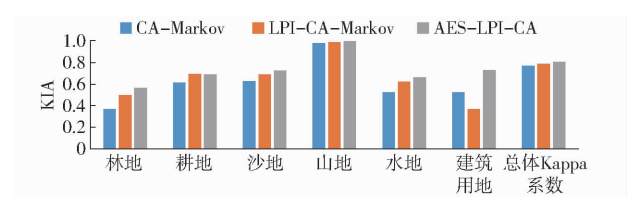


图5 3种模型模拟精度对比

Fig.5 Simulation accuracy comparison of three models

显,其 KIA 指数比 LPI-CA-Markov 模型与传统 CA-Markov 模型分别高出 0.208 3 与 0.362 7,在另外 2 种模型的模拟结果中,建筑用地的大量破碎斑块消失,而连通性较好、面积较大的斑块出现了明显的扩张与聚集,模拟精度偏低,而 AES-LPI-CA 模型则较好地模拟了建筑用地的实际演化情况。另外 AES-LPI-CA 模型对水域、林地景观的模拟精度也明显高于另外 2 种模型,然而对山地、耕地景观的模拟精度未显示出明显优势,这可能是由于 2 种景观类型整体连通性较好,多年来变动较少,可预测性本就较强导致。3 种模型中,LPI-CA-Markov 模型在 CA-Markov 模型的基础上,增加了对景观格局指数的考虑,而景观格局指数是景观空间构成特征的定量化表征,因此该模型实际是在适宜性图集、转移概率矩阵 2 种约束条件下进一步综合子区景观分布的空间特征,使得子区内连通性与斑块相似性更高的

景观类型转入概率更大,相比 CA-Markov 模型其模拟精度有所提升。AES-LPI-CA 模型则在 LPI-CA-Markov 模型的基础上基于 AES 模型对元胞邻域规则进行了改进,邻域内不同景观类型面积作为荷尔蒙浓度处理,使得中心元胞更容易释放邻域内优势荷尔蒙也即演化为优势景观,因此模拟精度得到了进一步提高。

3 结论

- (1)利用内分泌调节机制改进元胞自动机邻域规则,同时考虑景观格局指数对景观转移概率的影响,在 CA-Markov 模型的基础上构建 AES-LPI-CA 模型对磴口县景观格局进行了模拟,结果精度较高。
- (2)将 AES-LPI-CA 模型模拟结果与 LPI-CA-Markov 模型、CA-Markov 模型进行对比,3 种模型模拟结果的 KIA 指数依次为 0.768 2、0.785 5、0.823 6,LPI-CA-Markov 模型显示出景观变化模拟中的较大优势。
- (3)由于 AES 主要通过在元胞邻域内发生作用对中心元胞的转移方向进行调整,不同的邻域设置对模型中不同荷尔蒙浓度将产生明显影响,进而造成模拟结果的不同,因此后续研究中应着重解决该问题。

参 考 文 献

- 刘冰,李清飞,宋轩,等. 平顶山地区景观格局动态特征及驱动力分析[J]. 中国环境监测,2013,29(3):158-163.
LIU Bing, LI Qingfei, SONG Xuan, et al. Evolvment of landscape pattern and driving forces in Pingdingshan City[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(3):158-163. (in Chinese)
- YU Qiang, YUE Depeng, WANG Jiping, 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, 2016, 15(14):138-143.
- 孙才志,闫晓露,钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报,2014,34(2):247-257.
SUN Caizhi, YAN Xiaolu, ZHONG Jingqiu. Evaluation of the landscape patterns vulnerability and analysis of spatial correlation patterns in the lower reaches of Liaohe River Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2):247-257. (in Chinese)
- 于强,岳德鹏,郝玉光,等. 磴口县荒漠绿洲景观特征及时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(4):178-183.
YU Qiang, YUE Depeng, HAO Yuguang, et al. The spatial and temporal variations of oasis desera landscape in Dengkou County[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(4):178-183. (in Chinese)
- 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等. 区域生态安全格局:概念与理论基础[J]. 生态学报,2004,24(4):761-768.
MA Keming, FU Bojie, LI Xiaoya, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): the concept and theoretical basis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(4):761-768. (in Chinese)
- 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)
- 于强,岳德鹏, YANG Di,等. 基于 EnKF-MCRP 模型的生态用地扩张模拟研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):285-293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160939&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.039.
YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Simulation on ecological land use expansion based on EnKF-MCRP model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):285-293. (in Chinese)

- 8 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 - 1105.
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 - 1105. (in Chinese)
- 9 MANSON S M. Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in the southern Yucatan Peninsular Region of Mexico[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 111(1 - 4): 47 - 62.
- 10 何春阳,史培军,陈晋,等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J]. 中国科学:D 辑, 2005, 35(5):464 - 473.
HE Chunyang, SHI Peijun, CHEN Jin, et al. Research on land use scenario model based on system dynamics model and cellular automata model[J]. Science China Earth Sciences, 2005, 35(5):464 - 473. (in Chinese)
- 11 郜允兵,张翼鹏,高秉博,等. 长时序海量土地利用时空数据统计优化方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊):290 - 296. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S046&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.046.
GAO Yunbing, ZHANG Yipeng, GAO Bingbo, et al. Statistical optimization method of massive spatiotemporal data for long time series land use[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.):290 - 296. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 WANG Lei, TANG Dunbing. An improved adaptive genetic algorithm based on hormone modulation mechanism for job-shop scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6):7243 - 7250.
- 14 雷扬. 人工内分泌模型及应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2010.
LEI Yang. Artificial endocrine theory and applications[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- 15 王伟,陈为栋,顾幸生,等. 基于内分泌激素调节机制的免疫算法的 Flow shop 调度问题[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13):3425 - 3430.
WANG Wei, CHEN Weidong, GU Xingsheng, et al. Adaptive immune algorithm based on regulation laws of hormone in endocrine system for scheduling problems of Flow shop[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13):3425 - 3430. (in Chinese)
- 16 FARHY L S. Modeling of oscillations of endocrine networks with feedback[J]. Methods Enzymology, 2004, 384(12): 54 - 81.
- 17 陈爱莲,孙然好,陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8):2077 - 2086.
CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding. Applicability of traditional landscape metrics in evaluating urban heat island effect[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8):2077 - 2086. (in Chinese)
- 18 李鹏山,吕雅慧,张超,等. 基于核密度估计的京津冀地区耕地破碎化分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5):281 - 287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160538&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.038.
LI Pengshan, LÜ Yahui, ZHANG Chao, et al. Analysis of cultivated land fragmentation in Beijing - Tianjin - Hebei region based on kernel density estimation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):281 - 287. (in Chinese)
- 19 YANG Xin, ZHENG Xinqi, CHEN Rui. A land use change model: integrating landscape pattern indexes and Markov - CA[J]. Ecological Modelling, 2014, 283(7):1 - 7.
- 20 张芸香,郭晋平. 森林景观斑块密度及边缘密度动态研究——以关帝山林区为例[J]. 生态学杂志, 2001, 20(1):18 - 21.
ZHANG Yunxiang, GUO Jinping. The dynamics of patch density and edge density in forested landscape of Shanxi, China a case study in Guandishan mountain forest district[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(1):18 - 21. (in Chinese)
- 21 MCGARIGAL K M. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure[M]. Portland: Pacific Northwest Research Station, 1995.
- 22 PAN Ying, ROTH A, YU Zhenrong, et al. The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2010, 34(5): 400 - 408.