

基于 MCR - ANN - CA 模型的包头市生态用地演变模拟

刘建华¹ 张启斌¹ YANG Di² 岳德鹏¹ 于强¹ 杨 斓¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 佛罗里达大学地理系, 盖恩斯维尔 FL 32611)

摘要: 以内蒙古自治区包头市为研究区,耦合最小累积阻力(MCR)模型、人工神经网络(ANN)和元胞自动机(CA)构建 MCR - ANN - CA 模型。利用 MCR 模型量化包头市各用地类型演变为生态用地时的阻力,构建 CA 适宜性规则;利用 ANN 模型提取 CA 邻域转换规则,基于包头市 2006、2011 年土地利用数据及归一化植被指数(NDVI)、高程、坡度、水体距离、人口密度多项数据,对 2016 年生态用地演变情景进行模拟,以 2016 年实际生态用地分布为参照,将该模型模拟结果与 CA - Markov 模型的模拟结果进行对比(以 2016 年实际景观分布为参照),结果显示,两种模型模拟结果的卡帕一致性指数(Kappa index of agreement, KIA)分别为 0.89 和 0.87,相对误差分别为 3.10% 和 5.31%,MCR - ANN - CA 模型显示了较高的模拟精度。

关键词: 生态用地演变; 元胞自动机; 人工神经网络; 最小累积阻力模型; 包头市
中图分类号: K903 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0187-08

Simulation of Ecological Land Transition in Baotou City Based on MCR - ANN - CA Model

LIU Jianhua¹ ZHANG Qibin¹ YANG Di² YUE Depeng¹ YU Qiang¹ YANG Lan¹

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Department of Geography, University of Florida, Gainesville FL 32611, USA)

Abstract: To simulate the ecological land transition of Baotou City, Inner Mongolia, the MCR - ANN - CA model was built. This model was composed of minimum cumulative resistance model (MCR), artificial neural network (ANN) and cellular automata model (CA). The MCR model was used to simulate the resistance faced by ecological land during its transition. To measure the resistance, the data of normalized difference vegetation index (NDVI), digital elevation model (DEM), slope, distance from water, population density and industrial park distribution were normalized and superimposed to produce the resistance surface of MCR model. Then a cumulative consumption resistance surface was generated by using the cost distance tool of ArcGIS software. The generated surface was taken as the suitability map of CA model. The ANN model was used to extract CA neighborhood transfer rules and consider the neighborhood land use structure. The CA model combined the cumulative consumption resistance surface and the neighborhood transfer rules extracted by using the CNN model. And the MCR - CNN - CA model was finally formed. Based on the land use data of 2006 and 2011, the transition of construction land of Baotou City in 2016 was simulated by using the MCR - ANN - CA model. The simulation result of the model was compared with the CA - Markov model. The Kappa index of agreement (KIA) of the two models were 0.89 and 0.87, and the relative errors were 3.10% and 5.31%, respectively. The MCR - ANN - CA model showed high simulation precision.

Key words: ecological land transition; cellular automata; artificial neural network; minimum cumulative resistance model; Baotou City

0 引言

《全国生态环境保护纲要(国发[2000]38号)》中提到了生态用地一词,明确指出了生态用地的重要性^[1]。众多学者基于此不断发展生态用地的概念和内涵。一种观点认为应该从土地类型上来划分

中提到了生态用地一词,明确指出了生态用地的重要性^[1]。众多学者基于此不断发展生态用地的概念和内涵。一种观点认为应该从土地类型上来划分

收稿日期: 2018 - 11 - 19 修回日期: 2018 - 12 - 30
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: 刘建华(1980—),女,博士生,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail: ljhua678@126.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

生态用地,即提供自然生态系统服务价值的土地都可以被视为生态用地。另一种观点认为应该从土地的主体功能来区分,主张农业用地不应作为生态用地^[2-3]。根据前人理论成果,结合包头市实地情况,本文将林地、草地、水体作为生态用地范围。

生态用地作为自然生态系统服务的基本载体,是解决城市建设用地扩张与生态保护矛盾的综合途径^[4]。在我国西北干旱地区,生态用地在防止土地沙漠化、水土保持等方面的生态功能更加突出,对于维持区域生态系统健康稳定具有至关重要的作用^[5-6]。对生态用地的空间变化进行模拟,可以为干旱地区生态用地科学规划和生态安全格局构建提供重要参考价值。

生态用地的演变模拟是土地利用演变模拟的一部分,当前土地利用格局的演变模拟主要包括两种类型,一种是宏观回顾模型,如逻辑回归(Logistic regression)模型^[7]、马尔可夫(Markov)模型^[8]、系统动力学(System dynamic)模型等^[9-10],这些模型根据土地利用的时空数据,量化土地利用在宏观时空尺度上的变化规律,对未来情景进行预测。另一种是微观预测模型,包括多智能体模型(Multi-agent)^[11]、元胞自动机(Cellular automata, CA)^[12]等,这种模型从微观尺度入手,通过研究土地利用与生态、人类活动等因子的相互作用,预测宏观上土地利用的未来演变。将两种模型结合,可得到二者的混合模型,既可以考虑全局宏观效应,又可以考虑多个因子对土地利用的微观作用机制,相比单一模型具有较大优势。将宏观回顾模型与元胞自动机结合,是这种模型的一种常见形式,如CA-Markov模型^[13]。在这种模型中,有两个关键点对其模拟精度有较大影响,一是元胞邻域内不同土地利用类型间转变规则,即邻域规则;二是地形、生态环境等因子对土地利用演变影响,即适宜性规则^[14]。当前传统元胞自动机邻域规则制定方法较多,如支持向量机、多目标决策、Markov模型等^[15],用户往往难以选择合适的规则定义方法,部分线性模型也难以根据邻域特征精确模拟生态用地演化等非线性过程;基于逻辑回归、多标准评价模型及层次分析法等制定的适宜性规则虽然考虑了多种因素对土地利用变化的影响,但多基于单个像元利用空间叠加手段独立评价其适宜性,不能根据生态用地演化的过程量化研究区内各景观单元演化为生态用地的适宜性。

针对上述问题,选取西北干旱地区典型城市包头市为研究区,基于源汇理论,利用最小累积耗费阻力(Minimum cumulative resistance, MCR)模型量化生态用地演化过程中,从“生态源地”到其他土地利

用类型的适宜性,同时利用人工神经网络(Artificial neural network, ANN)提取CA邻域转换规则,构建MCR-ANN-CA模型对包头市生态用地的演变过程进行模拟,以期为区域生态用地规划及生态建设提供理论与方法支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

包头市位于内蒙古自治区西部(东经 $109^{\circ}13'$ ~ $111^{\circ}26'$,北纬 $40^{\circ}13'$ ~ $42^{\circ}44'$),面积 $27\,768\text{ km}^2$ 。包头市深处内陆,气候为典型的温带干旱、半干旱大陆性气候,冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨^[16],年平均气温 $2.0\sim7.7^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $175\sim400\text{ mm}$,年均蒸发量为 $2\,100\sim2\,700\text{ mm}$ 。包头市可利用地表水总量为 $9\times10^8\text{ m}^3$,地下水补给量为 $8.6\times10^9\text{ m}^3$ 。黄河流经包头境内 214 km ,水面宽 $130\sim458\text{ m}$,最大流量 $6\,400\text{ m}^3/\text{s}$,年平均径流量为 $2.6\times10^{11}\text{ m}^3$,是包头市主要用水来源^[17]。包头市海拔 $976\sim2\,317\text{ m}$,地势中间高南北低,北部丘陵、中部山地、南部平原分别占总面积的 14.49% 、 75.51% 和 10% ^[18]。干旱的气候条件与起伏的地貌特征使得包头市生态环境较为脆弱,面临较高的水土流失与土地沙漠化、荒漠化风险。近年来,包头市城市建设规模扩张迅速,房地产开发项目、工业园区等建设项目不断涌现,导致草地、林地、湿地等生态用地遭到占用与破坏,生态风险有所升高^[19]。

1.2 数据来源与处理

本研究主要数据源包括包头市土地利用数据(2006、2011、2016年)、归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、数字地面高程模型(Digital elevation model, DEM)、各区县旗人口密度及工业园区分布数据。其中土地利用数据由Landsat-8遥感数据解译得到,工业园区分布数据来自《包头市土地利用总体规划》和《包头市城市总体规划》;归一化植被指数(NDVI)、数字地面高程模型(DEM)来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);各区人口密度数据来自包头市统计年鉴。

根据研究需要,从遥感影像中提取耕地、林地、草地、建设用地、水体、未利用地并通过实地验证确保其精度,其中林地、草地、水体为本文中生态用地范围;利用DEM数据提取高程、坡度数据。

1.3 最小累积耗费阻力模型

MCR模型由KANPPEN提出,最早应用于物种迁徙过程研究,之后在物种保护、景观格局分析等方面取得了广泛应用^[20]。该模型主要考虑3个因素,

即“源”、阻力和累积代价,通过对 3 个因素的分析,对“源”克服阻力向外传播所耗费的代价或者所做的功进行描述^[21]。MCR 模型的一般形式为

$$R=f\sum D_{ij}R_i \tag{1}$$

式中 R ——最小累积阻力
 f ——未知负函数,表示最小累积阻力与生态适宜性的负相关关系
 D_{ij} ——从源 j 到景观单元 i 的空间距离
 R_i ——景观单元 i 处的阻力

本文将生态用地的演化过程看作生态用地对其他景观的竞争性控制过程,且这种演化必须通过克服阻力实现,这样生态用地的演化过程就可以抽象为从源(现有生态用地斑块)到汇(其他景观单元)克服阻力做功的水平过程^[22]。由于区域下垫面差异,不同空间位置的土地演化为生态用地的阻力是不同的,通过由“源”到当前像元的累积阻力可量化当前像元演化为生态用地的概率,即阻力越大,该像元演化为生态用地的概率越小,演化为其他用地类型的概率越大。本文利用 MCR 模型,综合考虑土地利用、NDVI、坡度、政府规划工业园区、人口密度、水体距离、高程因子构建累积耗费阻力面,利用该累积耗费阻力面构建 CA 模型的适宜性规则,对上述过程进行模拟,提高模型预测精度。

1.4 元胞自动机模型

CA 模型是一种时间、空间、状态都离散的动力学模型,具有明显的时间与空间特征,CA 模型的一般形式为^[23]

$$S_{i,t+1}=f(S_{i,t},S_{N,t}) \tag{2}$$

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
 $S_{N,t}$ ——元胞 i 的邻域集合在 t 时刻的状态
 f ——转换规则

CA 模型中,中心元胞在下一时刻的状态是其在当前时刻状态及其邻域集合状态的函数,准确定义该函数对于 CA 模型的模拟精度具有关键作用^[24-27]。由于生态用地的演化过程是一种非线性的复杂动力学过程,当前元胞及其邻域状态影响中心元胞过程很难用简单的规则定义,因此本文采用人工神经网络模型提取 CA 模型转换规则,对土地利用模拟过程中的现有规则进行改进^[28-29],以提高 CA 模型的模拟精度。

本研究中,元胞形状为正方形的栅格像元,尺寸为 30 m × 30 m,采用 3 × 3 经典摩尔邻域定义邻域空间,模型初始栅格数据中的元胞状态定义为研究区景观格局类型,依次为耕地、林地、草地、建设用地、水体、未利用地,根据中心元胞及邻域元胞状态,利

用 ANN 模型提取元胞转换规则,利用该规则计算元胞演化为生态用地的概率。

1.5 人工神经网络模型

ANN 模型是 20 世纪 80 年代以来人工智能领域兴起的研究热点^[30]。ANN 模型在复杂的非线性系统的模拟方面具有明显优势,其自组织、自学习、联想以及记忆的优势能够有效简化 CA 模型,从原始训练数据中提取 CA 转换规则,避免主观因素影响,提高模拟精度^[31]。

由于 ANN 模型在解决此类非线性问题中的明显优势,国内外学者很早就开始了相关研究,尝试利用 ANN 模型提取 CA 模型的转换规则^[32]。此类研究往往把邻域规则和适宜性规则统一放入 ANN 模型进行规则提取,然而在模拟生态用地演化的 CA 模型中,相比适宜性规则,邻域规则部分更难定义也更难被人类理解,因此本文利用 ANN 模型提取 CA 模型邻域部分转换规则,适宜性规则采用 MCR 模型构建。

采用经典 BP 神经网络算法,网络结构共 3 层,分别是输入层、隐含层、输出层。模型的输入层共 7 个节点,隐含层共 5 个节点,采用 tansing 激励函数,输出层共 1 个节点,采用 sigmoid 激励函数,其输出为中心元胞转换为生态用地的概率,值域为 0 ~ 1。输入变量及其取值范围如表 1 所示。

表 1 ANN 模型输入变量及取值范围
Tab.1 Input variables and their ranges of ANN model

名称	取值范围
邻域内耕地元胞数	0 ~ 9
邻域内林地元胞数	0 ~ 9
邻域内草地元胞数	0 ~ 9
邻域内水体元胞数	0 ~ 9
邻域内建设用地元胞数	0 ~ 9
邻域内未利用地元胞数	0 ~ 9
中心元胞是否为生态用地	{0,1}

1.6 MCR - ANN - CA 模型

以 CA 模型为基础框架,耦合 MCR 模型与 ANN 模型,构建 MCR - ANN - CA 模型用于包头市生态用地的演化模拟,技术路线如图 1 所示。模型模拟的基本步骤为:

- (1)利用 MCR 模型,综合考虑多种土地适宜性因子,构建研究区范围内各像元演化为生态用地的累积阻力面。
- (2)利用历史数据的转换情况及邻域特征,构建训练数据,训练 ANN 模型,提取 CA 模型邻域规则。
- (3)以当前土地利用为 CA 模型的输入数据,针

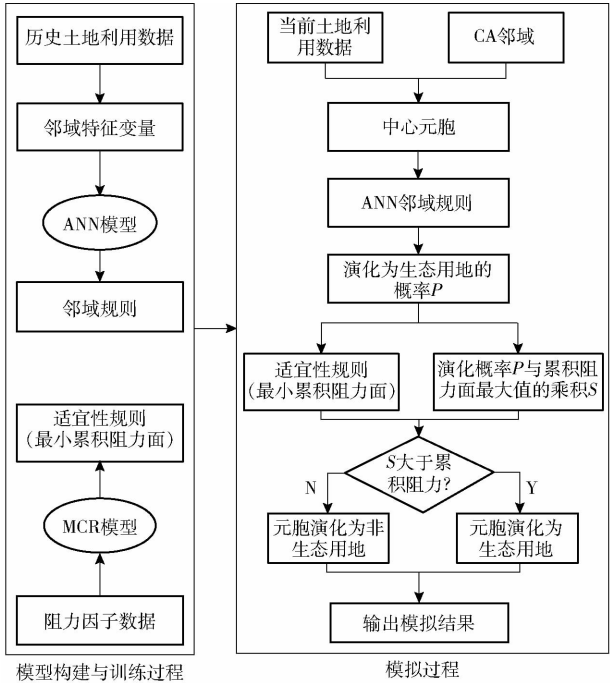


图 1 技术路线
Fig. 1 Technical roadmap

对任一元胞,利用训练好的 ANN 模型,根据其邻域状态判断其演化为生态用地的概率 P 。

(4)将 P 与累积阻力面中像元最大值相乘,其结果为 S (取值范围为 0 到累积阻力面最大值),若 S 大于当前元胞所对应的累积阻力,则该元胞演化

为生态用地,否则,该元胞演化为非生态用地。

(5)将模拟结果转换为栅格图像并输出结果。

2 结果与分析

2.1 基于 MCR 模型的适宜性规则构建

对土地利用、NDVI、坡度、政府规划工业园区、人口密度、水体距离、高程等多种因子进行空间化与标准化处理,结果如图 2 所示。其中将 NDVI、坡度、人口密度、高程因子数据原始值进行归一化处理作为其阻力。通过对不同用地类型阻力赋值,并对赋值结果归一化处理得到土地利用数据。政府规划工业园区阻力赋值为 1,其他区域赋值为 0,将数据栅格化后作为一个阻力因子。

根据包头市 2016 年土地利用数据,提取包头市生态用地范围,如图 3a 所示,由提取结果可知,包头市生态源地主要分布在北部草原带、大青山一带及黄河沿岸,其他区域也有零星生态用地分布,大致形成了三屏多点的格局。

利用 GIS 叠加分析,将图 2 中各因子进行空间叠加,得到包头市各个空间位置演化为生态用地的阻力面,结果如图 3b 所示。基于该阻力面,采用 MCR 模型,对源地进行累积耗费阻力计算,量化由近及远的空间范围内各像元演化为生态用地面临的

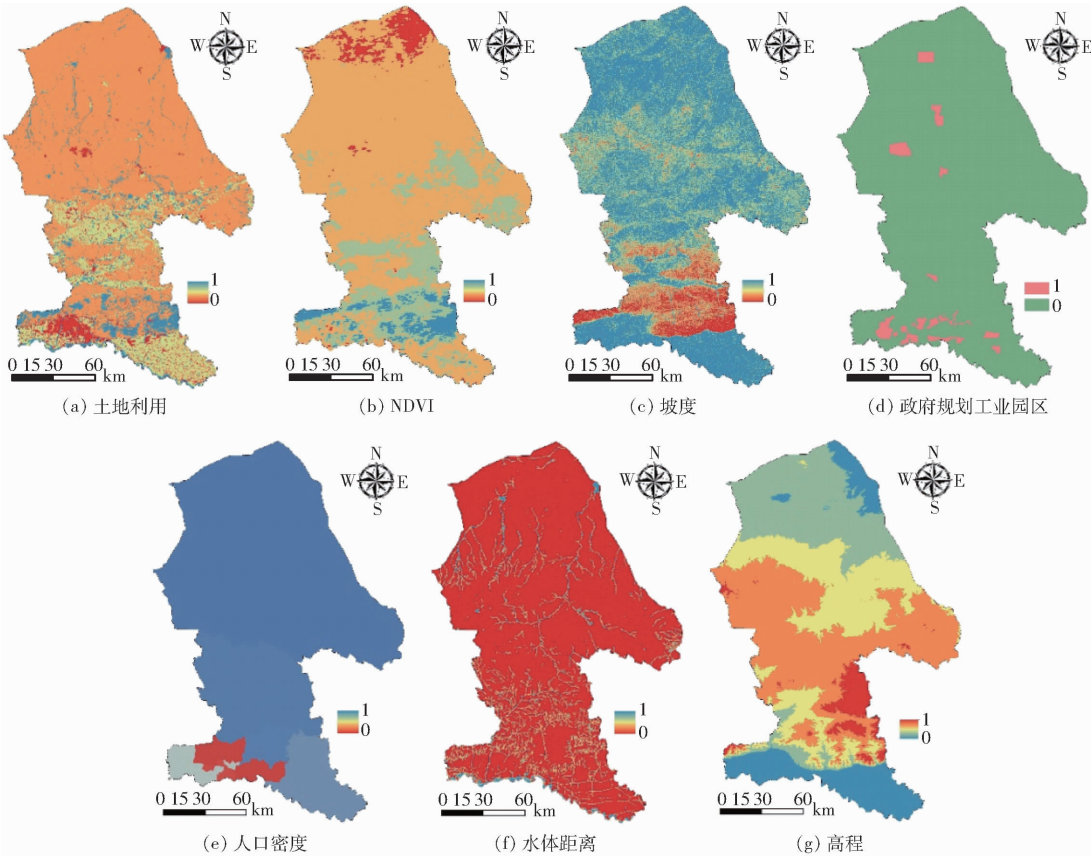


图 2 阻力因子的阻力分布
Fig. 2 Spatial distributions of resistance values of resistance factors

阻力,得到如图 3c 所示的累积生态阻力面。由图 3 可知,包头市南北部生态阻力较低,中部累积生态阻力较高,尤其图 3c 中 A 区域及 B 区域,累积生态阻力达到包头市最高水平。

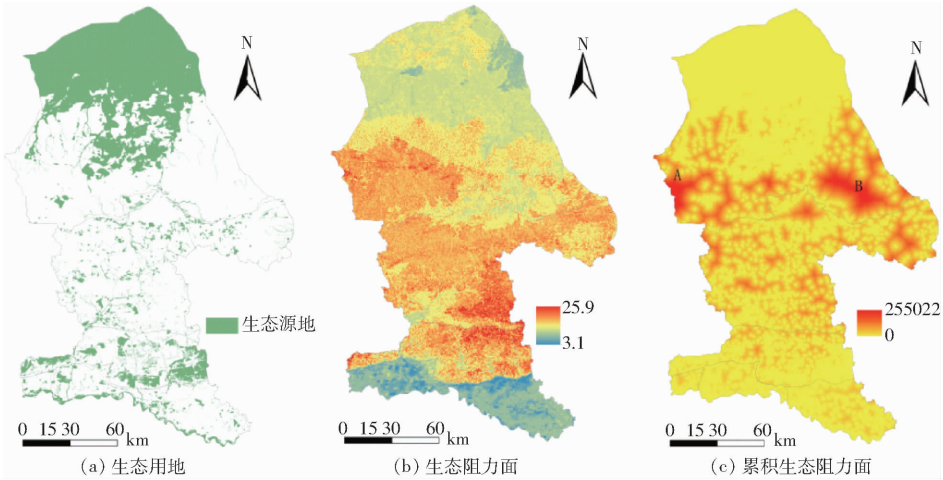


图 3 包头市生态用地演化累积生态阻力面构建

Fig.3 Construction of ecological land transition minimum accumulative resistance surface of Baotou City

2.2 基于 ANN 模型的 CA 邻域规则提取

基于研究区 2006、2011 年景观格局分布数据,通过 Matlab 随机抽取 3 000 个景观像元,统计 2006 年景观格局分布数据中,以 3 000 个像元为中心的 3×3 邻域内的各输入变量大小,形成 ANN 模型训练数据库。选其中 70% 进行模型训练,15% 作为验证数据集,15% 作为测试数据集。

采用量化共轭梯度法对 ANN 进行训练,模型经 57 次迭代后均方根误差达到最小,为 0.12,如图 4 所示,图中圆圈处为最优拟合点,此时验证集的决定系数 R^2 为 0.90,模型拟合精度较好地满足了本研究要求。

2.3 MCR-ANN-CA 生态用地模拟

将 2011 年景观格局数据输入训练后的 ANN 模型,判断各像元在邻域规则影响下是否会演变为生态用地,进而根据 MCR 模型生成的累积耗费阻力面,判断其最终演变方向,将模型模拟结果输出为栅

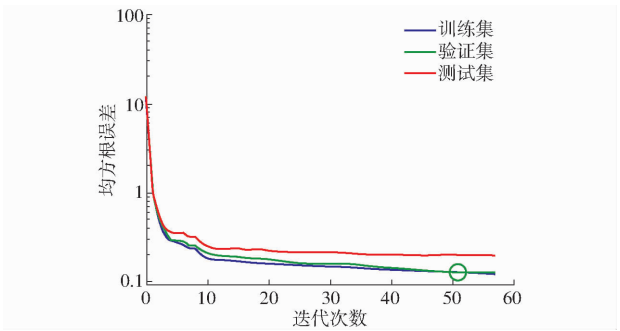


图 4 ANN 模型均方根误差

Fig.4 Root mean square error of ANN model

格图像。包头市 2016 年实际生态用地 8 409.32 km², MCR-ANN-CA 模型的模拟结果中包头市生态用地面积为 8 670.01 km²,如图 5a、5b 所示。

2.4 模型模拟精度对比分析

为验证模型模拟精度,利用 CA-Markov 模型对包头市 2016 年生态用地进行模拟,结果如图 5c 所示。以 2016 年生态用地实际分布为参照,利用

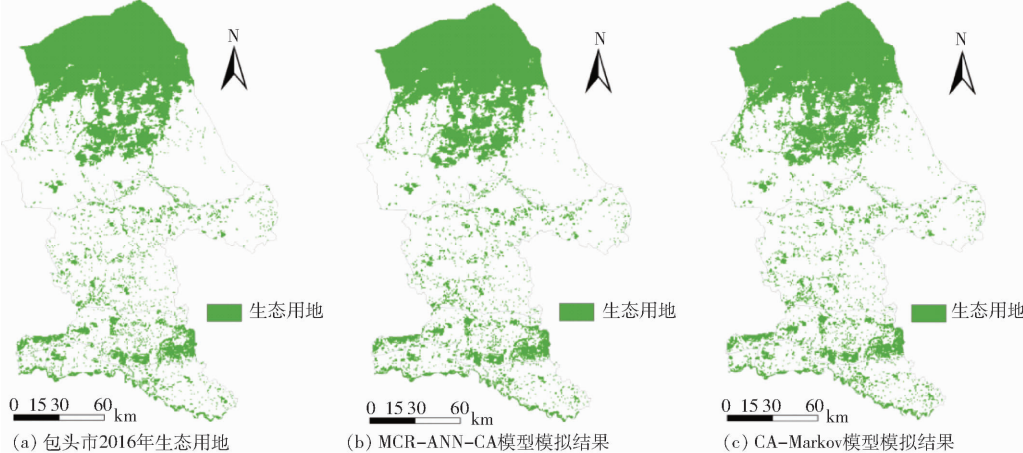


图 5 MCR-ANN-CA 与 CA-Markov 模拟结果对比

Fig.5 Comparison of simulation results of MCR-ANN-CA model and CA-Markov model

Idrisi Selva 软件中的 Cross Tab 模块对 2 个模型的模拟结果进行分析,定量分析模型的模拟精度,结果如表 2 所示。表中 KIA 指数为卡帕一致性指数。

表 2 模型模拟精度评价

Tab.2 Accuracy assessment of simulation result

模型	面积误差/ km ²	模拟 面积/km ²	相对 误差/%	KIA 指数
MCR-ANN-CA 模型	260.69	8 670.01	3.10	0.89
CA-Markov 模型	446.72	8 856.04	5.31	0.87

由表 2 可知,MCR-ANN-CA 模型与 CA-Markov 模型模拟结果中,生态用地的面积均大于实际值,但总体上与 2016 年生态用地的实际分布保持了较高的一致性,其中 MCR-ANN-CA 模型的模拟精度略高于 CA-Markov 模型,二者的相对误差分别为 3.10% 与 5.31%,KIA 指数分别为 0.89 和 0.87。

相比 CA-Markov 模型,MCR-ANN-CA 模型通过 ANN 模型提取了元胞自动机邻域内的转换规则,同时利用 MCR 模型构建累积耗费阻力面,对不同空间位置元胞演化为生态用地的阻力进行了量化,因此模拟精度得到了进一步提高。

3 结论

(1)利用 ANN 模型提取了元胞自动机的邻域规则,同时利用 MCR 模型构建累积耗费阻力面,基于 MCR-ANN-CA 模型对包头市生态用地演化情况进行模拟,模拟精度较高。

(2)将 MCR-ANN-CA 模型与 CA-Markov 模型模拟结果进行对比,KIA 指数分别为 0.89 和 0.87,相对误差分别为 3.10% 和 5.31%,MCR-ANN-CA 模型对包头市生态用地的演化过程具有更高的模拟精度。

参 考 文 献

[1] 俞孔坚,乔青,李迪华,等. 基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例[J]. 应用生态学报,2009,20(8):1932-1939.
YU Kongjian, QIAO Qing, LI Dihua, et al. Ecological land use in three towns of eastern Beijing—a case study based on landscape security pattern analysis [J]. Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8):1932-1939. (in Chinese)

[2] 朱敏,谢跟踪,邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建[J]. 生态学报,2018,38(9):3281-3290.
ZHU Min, XIE Genzong, QIU Penghua. Ecological land use change and construction of ecological land security pattern in Haikou City[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(9):3281-3290. (in Chinese)

[3] 刘枝军,王宏卫,杨胜天,等. 极端干旱区绿洲生态用地规划[J]. 生态学报,2018,38(22):7950-7959.
LIU Zhijun, WANG Hongwei, YANG Shengtian, et al. Ecological land use planning of an oasis in an extremely arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(22):7950-7959. (in Chinese)

[4] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等. 干旱区生态移民土地利用景观格局变化分析——以宁夏红寺堡区为例[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(12):69-74.
WANG Peng, WANG Yajuan, LIU Xiaopeng, et al. Analysis of landscape pattern change of ecological emigration land in arid area—taking the red temple area in Ningxia as an example [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(12):69-74. (in Chinese)

[5] YU Q, YUE D, WANG Y, et al. Optimization of ecological node layout and stability analysis of ecological network in desert oasis;a typical case study of ecological fragile zone located at Deng Kou County (Inner Mongolia) [J]. Ecological Indicators, 2018, 84:304-318.

[6] 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.
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. 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. (in Chinese)

[7] 龚健,陈耀霖,张志. 基于多分类 Logistic 回归模型的区域土地利用变化及驱动因素研究[J]. 湖北农业科学,2016,55(17):4545-4550.
GONG Jian, CHEN Yaolin, ZHANG Zhi. Regional land use change and its driving forces analysis based on multinomial Logistic regression [J]. Hubei Agricultural Sciences,2016,55(17):4545-4550. (in Chinese)

[8] 刘孝国,郅瑞卿,董军. 基于马尔可夫模型的吉林市土地利用变化预测[J]. 中国农学通报,2012,28(29):226-229.
LIU Xiaoguo, QIE Ruiqing, DONG Jun. Based on Markov model in the prediction of Jilin City land use change prediction [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012,28(29):226-229. (in Chinese)

[9] 孙旭丹,张立亭,罗亦泳,等. 基于 SD 和 CA 模型的土地资源配置策略研究——以鄱阳湖生态经济区为例[J]. 东华理工大学学报(社会科学版),2018,37(1):22-26.
SUN Xudan, ZHANG Liting, LUO Yiyong, et al. Research on land resource allocation based on SD and CA model—taking

- Poyang Lake eco-economic zone for example [J]. Journal of East China University of Technology (Social Science Edition), 2018, 37(1):22-26. (in Chinese)
- [10] WIEKRAMASURIYA R C, BREGT A K, DELDEN H V, et al. The dynamics of shifting cultivation captured in an extended constrained cellular automata land use model[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(18):2302-2309.
- [11] 刘敬杰,夏敏,刘友兆,等.基于多智能体与CA结合模型分析的农村土地利用变化驱动机制[J].农业工程学报,2018, 34(6):242-252.
LIU Jingjie, XIA Min, LIU Youzhao, et al. Driving mechanism of rural land use change based on multi-agent system and cellular automata [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6):242-252. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 宋磊,陈笑扬,李小丽,等.基于CA-Markov模型的长沙市望城区土地利用/覆盖变化预测[J].国土资源导刊,2018, 15(2):17-23.
SONG Lei, CHEN Xiaoyang, LI Xiaoli, et al. The CA-Markov model based prediction of land use/cover changes in Wangcheng District, Changsha City, Hunan Province [J]. Land & Resources Herald, 2018, 15(2):17-23. (in Chinese)
- [14] 胡碧松,张涵玥.基于CA-Markov模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1207-1219.
HU Bisong, ZHANG Hanyue. Simulation of land-use change in Poyang Lake Region based on CA-Markov model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(6):1207-1219. (in Chinese)
- [15] 张洁,蔡逸涛,杨强,等.基于CA-SVM模型的莆田市城市扩张特征研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018, 42(4):148-152.
ZHANG Jie, CAI Yitao, YANG Qiang, et al. Study on characteristic of urban expansion based on CA-SVM model: taking Putian City in Fujian Province as an example [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(4):148-152. (in Chinese)
- [16] 陈晓敏,解智峰.城市土地集约利用评价及驱动力分析——以内蒙古包头市为例[J].国土资源情报,2011,2(6):46-52.
CHEN Xiaomin, XIE Zhifeng. Evaluation and driving force analysis of intensive use of urban land—taking Baotou City of Inner Mongolia as an example [J]. Land and Resources Information, 2011, 2(6):46-52. (in Chinese)
- [17] 于佳生.包头市生态城市评价及对策研究[D].包头:内蒙古科技大学,2015.
YU Jiasheng. The evaluation and countermeasure research of ecological city in Baotou City [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] 王鑫.包头市工业企业环境污染管理问题与对策研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2015.
WANG Xin. Baotou industrial pollution of the environment management problems and counter measures [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2015. (in Chinese)
- [19] 张敏.包头市城市建设用地扩展研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2011.
ZHANG Min. Research on the expansion of urban construction land in Baotou [D]. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2011. (in Chinese)
- [20] 魏伟.基于CLUE-S和MCR模型的石羊河流域土地利用空间优化配置研究[D].兰州:兰州大学,2018.
WEI Wei. Land use operation allocation based on CLUES-S and MCR model in Shiyang River Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese)
- [21] 卢德彬,毛婉柳,禹真,等.基于改进MCR模型的山区农村居民点空间增长模拟研究[J].水土保持研究,2016,23(5):322-326,349.
LU Debin, MAO Wanliu, YU Zhen, et al. Simulation study on the spatial growth of rural settlements in the mountainous area based on improved MCR model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5):322-326,349. (in Chinese)
- [22] 叶玉瑶,苏泳娴,张虹鸥,等.生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J].地理学报,2014,69(4):485-496.
YE Yuyao, SU Yongxian, ZHANG Hongou, et al. Construction model and simulations of an ecological resistance surface its application in urban expansion [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(4):485-496. (in Chinese)
- [23] 孙玮健,张荣群,艾东,等.基于元胞自动机模型的土地利用情景模拟与驱动力分析[J/OL].农业机械学报,2017, 48(增刊):254-261.
SUN Weijian, ZHANG Rongqun, AI Dong, et al. Driving force analysis and scenarios simulation of land use based on cell automata model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):254-261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s039&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.039. (in Chinese)
- [24] 于明明,曾永年.顾及地类转换差异的城市空间扩展元胞自动机模型及应用研究[J].地球信息科学学报,2018,20(1):48-56.

- YU Mingming, ZENG Yongnian. Cellular automata model of urban spatial expansion considering the differences of land types transition and its application research [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20 (1):48–56. (in Chinese)
- [25] 张启斌, 岳德鹏, 于强, 等. 磴口县景观格局 AES-LPI-CA 模型演化模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5):128–134.
- ZHANG Qibin, YUE Depeng, YU Qiang, et al. Simulation of landscape pattern evolution in Dengkou County using AES-LPI-CA model [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 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. (in Chinese)
- [26] SOARES-FILHO B S, CERQUEIRA G C, PENNACHIN C L. DINAMICA—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 154(3):217–235.
- [27] ALMEID A C M, GLERIANI J M, CASTEJON E F, et al. Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(9):943–963.
- [28] 曹敏, 史照良. 基于遗传神经网络获取元胞自动机的转换规则[J]. *测绘通报*, 2010(3):24–27.
- CAO Min, SHI Zhaoliang. Transformation rules of cellular automata based on genetic neural network [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2010(3):24–27. (in Chinese)
- [29] 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 Jiaan. Cellular automata for simulation complex land use systems using neural networks [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1):19–27. (in Chinese)
- [30] 毛健, 赵红东, 姚婧婧. 人工神经网络的发展及应用[J]. *电子设计工程*, 2011, 19(24):62–65.
- MAO Jian, ZHAO Hongdong, YAO Jingjing. Application and prospect of artificial neural network [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(24):62–65. (in Chinese)
- [31] 田静, 邢艳秋, 姚松涛, 等. 基于元胞自动机和 BP 神经网络算法的 Landsat-TM 遥感影像森林类型分类比较[J]. *林业科学*, 2017, 53(2):26–34.
- TIAN Jing, XING Yanqiu, YAO Songtao, et al. Comparison of Landsat-TM image forest type classification based on cellular automata and BP neural network algorithm[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(2):26–34. (in Chinese)
- [32] 韦春竹, 郑文锋, 孟庆岩, 等. 基于元胞自动机的遗传神经网络在土地利用变化模拟分析中的应用[J]. *测绘工程*, 2014, 23(1):45–49.
- WEI Chunzhu, ZHENG Wenfeng, MENG Qingyan, et al. Genetic neural network based on cellular automata applied to the simulation analysis of land use change [J]. *Engineering of Survey and Mapping*, 2014, 23(1):45–49. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- [9] ZOU Y, DONG X, LIN G, et al. Wide range FBG displacement sensor based on twin-core fiber filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(3):337–343.
- [10] 贾旻, 孙伟. 基于反射式塑料光纤传感器的微位移测量技术研究[J]. *电子测试*, 2017(9):45–46.
- JIA Min, SUN Wei. Research on micro-displacement measurement technology based on reflective plastic optical fiber sensor [J]. *Electronic Test*, 2017(9):45–46. (in Chinese)
- [11] 张燕君, 田永胜, 付兴虎, 等. 可测量程拉绳式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. *光电工程*, 2017, 44(6):626–632.
- ZHANG Yanjun, TIAN Yongsheng, FU Xinghu, et al. Adjustable range draw-wire type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(6):626–632. (in Chinese)
- [12] ZHU L, LU L, ZHUANG W, et al. Non-contact temperature-independent random-displacement sensor using two fiber Bragg gratings[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(3):447–453.
- [13] BABAEV O G, MATYUNIN S A, PARANIN V D. Linearization of positional response curve of a fiber-optic displacement sensor[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 302(1):012051.
- [14] 郭俊, 姬长英, 方会敏, 等. 正反旋转耕后土壤和秸秆位移试验分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):21–26.
- GUO Jun, JI Changying, FANG Huimin, et al. Experimental analysis of soil and straw displacement after up-cut and down-cut rotary tillage[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):21–26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160504&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.004. (in Chinese)
- [15] WU D, ZHU T, LIU M. A high temperature sensor based on a Peanut-shape structure Michelson interferometer[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24):5085–5088.
- [16] LU L, ZHUANG W, LI H, et al. Fiber Bragg grating-based measurement of random-rotation parameters[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(2):211–217.
- [17] 陈亮. 磁栅绝对直线位移传感器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.