



基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究

张晨星, 徐晶晶, 温静, 杨新兵, 王佳欢, 赵波

引用本文:

张晨星, 徐晶晶, 温静, 等. 基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 655-664.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0415>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价

荣月静, 张慧, 赵显富

农业资源与环境学报. 2015(4): 343-353 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0359>

基于移动窗口法的半干旱生态脆弱区景观破碎化及驱动力分析

胡荣明, 杜嵩, 李朋飞, 姚燕子, 王睿哲, 滕坤阳

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 502-511 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0490>

黄河中下游地区耕地轨迹演变及驱动机制研究——以河南省为例

耿艺伟, 陈伟强, 张锋, 马月红

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 249-258 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0216>

平原河网区排水沟塘水质动态与景观特征的关系

贾忠华, 尹玺, 罗纨, 邹家荣, 陈诚

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 665-676 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0416>

典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟

陈飞, 周德全, 白晓永, 肖建勇, 钱庆欢

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 174-180 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0291>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张晨星, 徐晶晶, 温静, 等. 基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 655-664.

ZHANG Chen-xing, XU Jing-jing, WEN Jing, et al. Dynamic simulation of landscape change in the Baiyangdian basin based on the CA-Markov model and MCE constraints[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 655-664.



开放科学 OSID

基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究

张晨星, 徐晶晶, 温静, 杨新兵*, 王佳欢, 赵波

(河北农业大学林学院, 河北 保定 071001)

摘要: CA-Markov模型对景观动态分析的精度受到环境因素的影响, 本研究以添加约束条件的MCE-CA-Markov模型为对比, 基于白洋淀流域2008、2013年和2018年的景观数据对2023年景观进行预测, 比较CA-Markov模型和MCE-CA-Markov模型模拟结果差异。结果表明: 2008、2013、2018年三个时点的耕地和林地面积合计均超过白洋淀流域总面积的75%, 始终为基质景观。各景观类型斑块2008—2018年破碎且分散, 耕地、林地的优势度逐渐降低, 全流域格局多样性和复杂程度明显增强。2018—2023年, 白洋淀流域耕地、林地面积减少, 其他景观面积增加, 各景观斑块主要呈紧实且聚集状态, 建设用地优势度逐渐升高, 全流域格局趋于多样化和均匀化。经验证, MCE-CA-Markov模拟精度(0.900 7)优于CA-Markov模型, 2023年白洋淀景观结构和格局变化幅度整体小于CA-Markov模拟结果, 且各景观转化特征更符合社会发展实际。

关键词: 景观结构; 景观格局; CA-Markov模型; MCE-CA-Markov模型; 白洋淀流域

中图分类号: P901

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)04-0655-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0415

Dynamic simulation of landscape change in the Baiyangdian basin based on the CA-Markov model and MCE constraints

ZHANG Chen-xing, XU Jing-jing, WEN Jing, YANG Xin-bing*, WANG Jia-huan, ZHAO Bo

(College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: The accuracy of the CA-Markov model for landscape dynamic analysis is usually affected by environmental factors. In this study, the MCE-CA-Markov model with control conditions was used to predict the Baiyangdian basin landscape in 2023, based on landscape data for 2008, 2013, and 2018, and it was also compared with the simulation results of the CA-Markov model. The results showed that: From 2008 to 2018, the total area of farmland and forestland accounted for over 75% in Baiyangdian basin, which illustrated farmland and forestland were the substrate landscape. Landscape patches were fragmented and scattered, with the dominance of farmland and forestland gradually decreasing, and the diversity and complexity of the whole basin landscape pattern increased during this period. From 2018 to 2023, the farmland and forestland areas would decrease, while the area of other landscapes would increase. Landscape patches would mainly be compact and clustered, and dominance of construction land would gradually increase. The whole basin landscape pattern would tend to be diverse and even. The MCE-CA-Markov simulation accuracy (0.900 7) was higher than that of the CA-Markov simulation. Furthermore, the change range of the Baiyangdian basin landscape structure and pattern in 2023, simulated by the MCE-CA-Markov model, was smaller than that of the CA-Markov simulation, more congruent with social development in landscape transformation characteristics.

Keywords: landscape structure; landscape pattern; CA-Markov model; MCE-CA-Markov model; Baiyangdian basin

收稿日期: 2020-08-07 录用日期: 2020-10-10

作者简介: 张晨星(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林、景观生态。E-mail: 2197791353@qq.com

*通信作者: 杨新兵 E-mail: 498031551@qq.com

基金项目: 河北省省属高等学校基本科研业务费研究项目(KY202006)

Project supported: Basic Scientific Research Business Expenses of Provincial Colleges and Universities in Hebei Province (KY202006)

土地利用/土地覆被变化(Land use and land cover change, 简称LUCC)是全球公认的未来可持续发展中的核心问题^[1-2]。基于各种预测模型分析典型区域土地利用及景观格局变化也是全球长期关注的热点课题^[3]。近年来有许多模型用于模拟景观变化,如 Von Thünen 模型^[4]、SD 模型^[5]、CLUE-S 模型^[6]、空间 Logistic 模型^[7]、元胞自动机(CA 模型)^[8]和 Markov 模型^[9]。CA-Markov 模型综合了 Markov 链的长期预测能力和 CA 模拟复杂系统空间变化的优点,逐渐受到国内外学者的关注^[10-11],CA-Markov 模型有两种模拟方法:Zhao 等^[12]、于森等^[13]、成超男等^[14]基于两期土地利用数据直接将生成的转移概率矩阵和适宜性图集作为转换规则参与运算;Tony 等^[15]、冯丽媛等^[16]、易丹等^[17]利用两期土地利用数据生成转移概率矩阵,利用环境因子制作各地类适宜性图集,重新制定转换规则模拟未来景观分布。制作土地适宜性数据集时,多数学者采用多准则评价模型(MCE)^[18],该模型可针对不同目标制定相应的标准,通过分析影响目标的诸多因素来辅助决策,并将决策规则记录在一个文件中,以便修改。但以上研究并未对两种模拟方法进行比较,也未从景观生态学角度对景观格局进行对比分析。

白洋淀流域地处河北省腹地,内含雄安新区,是环京津水源涵养和生物多样性保护等重要功能区,也是河湖滨海保护和盐渍化敏感地。白洋淀流域地势自西北向东南倾斜,在自然条件和人文要素方面均呈

现出过渡特性,直接影响土地覆被分布。近年来,随着生态文明战略的深入推进,国土开发利用以节约优先、保护优先和自然恢复为主,重点解决国土无序开发等问题。因此,开展土地利用变化和模拟,有助于揭示人类社会经济活动规律,对引导地区合理开发利用土地和优化国土空间格局具有重要意义。

本研究对白洋淀流域 2008—2018 年的景观时空变化特征进行分析,应用传统 CA-Markov 模型和结合环境因子的多标准评价的 MCE-CA-Markov 模型,分别对白洋淀流域 2023 年景观进行模拟,通过构建景观格局指数评价体系探讨白洋淀流域 2008—2023 年景观格局变化规律,旨在为科学确定人口与用地规模,形成开发强度适中、空间有序的城乡发展新格局提供科学指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

白洋淀流域介于东经 115°38'~116°07'、北纬 38°43'~39°02' 之间(图 1),总面积约为 3.39×10⁴ km²,地势自西北向东南呈阶梯状,表现为山地-丘陵-平原逐渐下降的趋势,属温带大陆性季风气候,雨热同季。多年平均气温为 13.28℃。全区水面蒸发量平均为 967.1 mm,山区降水量大于平原。植被类型主要有针阔混交林、落叶阔叶林、针叶林、灌丛和草甸等。以京广铁路沿线为分界线,以西人口密度较低,以东人口

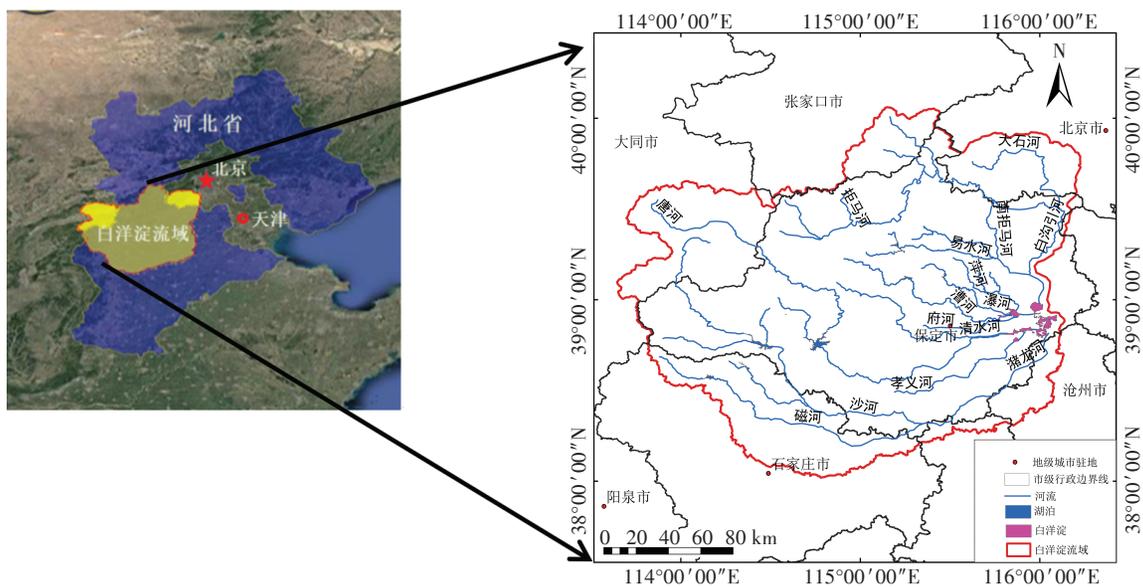


图1 研究区位置图

Figure 1 The location of the study area

密度较高。

1.2 数据来源及处理

本研究基础数据采用地理空间数据云(www.gs-cloud.cn)美国陆地卫星 Landsat 7 TM/ETM⁺和 Landsat 8 OLI的遥感影像。在ENVI 5.1软件的支持下,将两期遥感影像进行拼接、增强、裁剪等预处理,基于最大似然分类与目视解译相结合的方法,根据《土地利用现状调查技术章程》和中国科学院提出的国土资源分类标准,解译为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地及其他,研究区内水域按照研究年份实际情况进行解译。DEM数据来源于地理空间数据云平台30 m分辨率数据,并计算坡度数据。利用Google Earth与白洋淀流域的基本景观进行对比辅助纠正,精度验证结果显示2008—2018年三期影像解译数据的Kappa系数均大于0.80,表明分类结果精度满足要求。借助91卫图助手下白洋淀流域的主要道路、高速、铁路分布栅格图进行配准,之后对栅格数据进行矢量化,得到主要交通数据。

1.3 模型设置

1.3.1 景观动态度

景观类型动态度可表达区域某时间范围内某种景观类型的数量变化状况^[19],公式如下:

$$V = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V 为景观类型面积年均变化率,即动态度; U_a 为研究时段初期某景观类型面积; U_b 为研究时段末期某景观类型面积; T 为时间间隔。

1.3.2 CA-Markov模型

Markov预测方法可解释景观变化过程中数量关系;而CA模型可有效地对景观变化过程中空间变量、地块相互作用以及驱动力机制等进行解释和定义,表征元胞单元相互作用的状态转移规则;CA-Markov模型综合了Markov模型时间序列预测和CA模型空间分布模拟的优势^[20],公式包括:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \quad (2)$$

式中: S_t 和 S_{t+1} 分别为 t 和 $t+1$ 时刻景观类型结构的状态; P_{ij} 为状态转移矩阵,表达式为:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 的数值为景观中类型 i 转变为类型 j 的概率, P_{ij} 需满足两个条件: $0 \leq P_{ij} \leq 1$; $\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1$ 。其中 i 和 j

的取值均为 $0, 1, 2, \dots, n$,即各行元素之和为1。

$$S_{(t+1)} = f(S_{(t)}, N) \quad (4)$$

式中: $S_{(t)}$ 、 $S_{(t+1)}$ 分别为 t 和 $t+1$ 时刻元胞有限离散的集合状态; N 为元胞的邻域; f 为局部空间的元胞转化规则。

1.3.3 MCE模块设置

MCE(Multi-criteria evaluation)模块综合分析影响目标的诸多因素后可实现决策辅助,包含限制因子和影响因子。限制因子是将分析严格控制某种范围内,以0和1表示。影响因子通过FUZZY功能实现,将各离散、连续数据统一到0~255标准化数据,并确定各因子对该类景观影响的函数形式。将每类景观的限制、影响因子组合为该类景观的适宜性图集,利用集合生成器(Collection editor)打包6类景观适宜性图集。

根据数据的可获取性和研究目的,选取海拔、坡度、公路、高速、铁路、水域为因子。考虑到水资源短缺、水域污染等生态环境问题,出于对研究区水环境的保护,将水域作为限制因子,设置为0,其他景观设置为1。耕地、林地、草地因受地形影响较大,故选取高程、坡度为因子,遵循S形衰减模式和加权线性合并(WLC)制作适宜性图集^[21]。建设用地受经济条件影响较大,除海拔、坡度2种地形因子外,再选取距道路(公路、高速)、铁路的距离因子,并遵循S形衰减模式和层次分析法(AHP)制作适宜性图集^[21]。未利用地及其他用地遵循无特殊转化规则,选择Markov模块生成的条件概率矩阵作为适宜性图集^[22]。借助ArcGIS的Spatial analyst模块和IDRISI软件中函数工具HIS-TO分析研究区实际情况,再参考文献[21, 23]设置适宜条件:

(1)耕地:总体上,随着海拔的增加耕地数量减少,但仍存在山地农业等特殊情况,故海拔设定为100~700 m;随着坡度的增大耕作难度增加,但仍存在梯田耕作等情况,故坡度设定为 $0^\circ \sim 15^\circ$ 。

(2)林地:海拔设定为900~1 500 m;坡度设定为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 。

(3)草地:海拔设定为300~500 m;坡度设定为 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。

(4)建设用地:海拔设定为0~500 m;坡度设定为 $0^\circ \sim 5^\circ$;与道路距离设定为2 000~4 000 m;与高速公路距离设定50 000~80 000 m;与铁路距离设定为30 000~80 000 m。

1.3.4 景观格局指数的选取

对白洋淀流域各景观与全流域两个角度进行特

征分析,并综合朱增云等^[24]、郭继强等^[25]的研究结果,选取景观类型水平指数为:斑块数量(NP)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、散布与并列指数(IJI)、连接度指数(COHESION)、聚合度指数(AI)。景观水平指数为:斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、平均斑块面积(AREA_MN)、聚合度指数(AI)、香农多样性指数(SHDI)和香农均匀度指数(SHEI)。

2 结果与分析

2.1 模型验证

采用 IDRISI 软件中 CrossTAB 工具计算 Overall Kappa 系数来评价预测结果与实际结果的一致性。经计算,CA-Markov 模拟 2018 年白洋淀流域的 Kappa 系数为 0.876 4, MCE-CA-Markov 模型的 Kappa 系数为 0.900 7, 总体 Kappa 系数均落在 0.80~1 的范围内,但 MCE-CA-Markov 模型整体精度更高,且 MCE-CA-Markov 模拟各景观比例与实际误差均小于 CA-Markov 模拟结果(表 1)。

2018 年白洋淀流域景观分布(实际、CA-Markov 模拟、MCE-CA-Markov 模拟)如图 2 所示。耕地和林地分布在东北至西南的对角线两侧分布,草地散布于林地内,建设用地主要穿插分布于耕地内部,且分布于东南部地区(含南部、东部)的建设用地普遍比西北部(含西部、北部)面积大,水域和未利用地及其他面积较小,零星分布于研究区内。基于 CA-Markov 模型模拟的 2018 年白洋淀流域水域分布与实际水域分布有明显不同,2018 年实际水域未在北部大面积分布,而 CA-Markov 模拟水域在北部却有大面积分布。基于 MCE-CA-Markov 模拟的各景观分布与实际分布高度吻合。

2.2 景观结构变化分析

2.2.1 景观面积变化特征

2008—2023 年白洋淀流域不同类型景观变化特征如表 2 所示。四个时点耕地面积均超过白洋淀流域总面积的 35%,其次为林地,水域面积占比最小,表明研究区景观结构以农林生产为主,符合该区域社会经

表 1 2018 年白洋淀流域景观面积实际值与预测值对比
Table 1 Actual and predicted area of landscape in Baiyangdian basin in 2018

景观类型 Landscape type	实际 Actuality		CA-Markov			MCE-CA-Markov		
	面积 Area/ km ²	比例 Proportion/ %	面积 Area/ km ²	比例 Proportion/ %	比例误差/百分点 Proportion error/ Percent point	面积 Area/ km ²	比例 Proportion/ %	比例误差/百分点 Proportion error/ Percent point
耕地	13 470.53	39.76	12 571.71	37.11	-2.65	12 966.89	38.28	-1.48
林地	12 841.34	37.91	11 190.79	33.03	-4.88	12 057.60	35.59	-2.32
草地	3 030.14	8.94	3 382.78	9.99	1.05	3 356.16	9.91	0.97
建设用地	3 689.52	10.89	4 860.36	14.35	3.46	4 384.48	12.94	2.05
水域	262.83	0.78	952.35	2.81	2.03	304.53	0.90	0.12
未利用地及其他	583.29	1.72	919.65	2.71	0.99	807.97	2.38	0.66

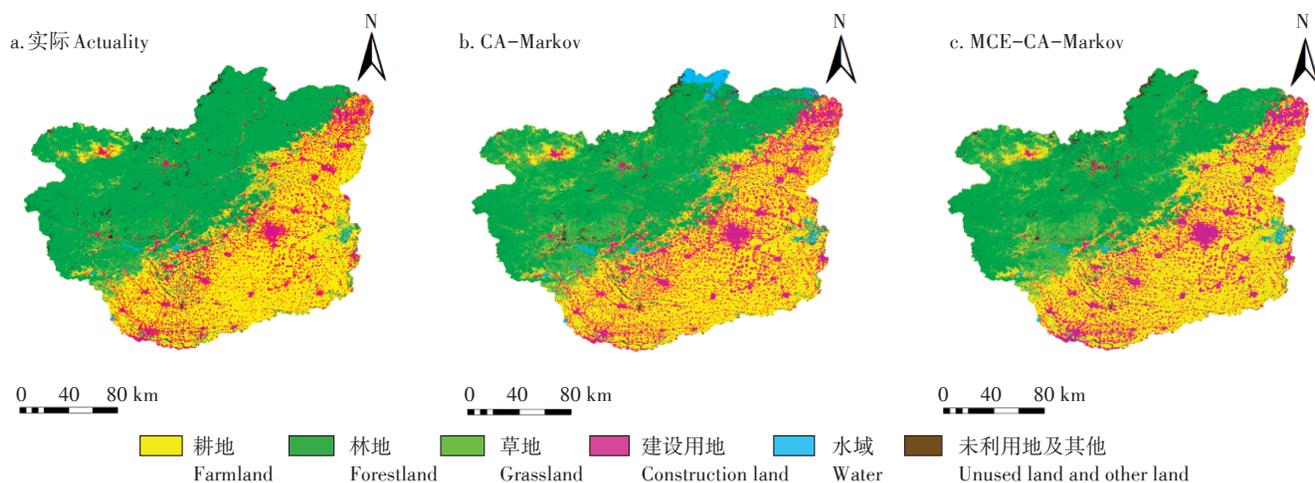


图 2 2018 年白洋淀流域景观类型实际和模型预测图

Figure 2 Map of landscape types forecast in Baiyangdian basin in 2018

济发展的特点。2008—2018年,白洋淀流域内耕地和林地呈萎缩趋势,草地2008—2013年减少,2013—2018年增加。建设用地、未利用地及其他用地面积2008—2018年持续增加,水域面积2008—2013年增加,2013—2018年略有减少。2008—2018年白洋淀流域景观动态度绝对值由大到小排序为:建设用地(7.48%)>水域(5.28%)>耕地(1.00%)>未利用地及其他(0.79%)>林地(0.14%)>草地(0.13%)。与2018年相比,CA-Markov和MCE-CA-Markov模型预测的2023年耕地、林地面积均减少,其他景观面积增加。与CA-Markov模型2023年预测值相比,MCE-CA-Markov模型预测的2023年景观(除水域外)动态度绝对值略有减少。

2.2.2 景观转移图谱分析

利用ArcGIS叠加分析模块和栅格计算器得出各期转移图谱(图3),将图谱单元按面积大小排序,计算其变化率(表3)。2008—2013年、2013—2018年共有30类图谱单元发生了变化,主要图谱单元累积变化率分别为95.61%、95.63%。两期图谱变化最明显的是耕地→建设用地,白洋淀流域70%属于保定地区,保定平原区近年交通、商业、住宅等建设用地急剧扩张,加快了耕地非农化速度。其次为林地→草地,主要位于山区和平原过渡区,受温度、降水、地形等影响,林地和草地在交界区易呈现交替转化状态。2008—2013年林地→建设用地和2013—2018年水域→建设用地变化率最小。2018—2023年,CA-Markov模拟结果显示,共有22类图谱单元发生变化,主要图谱单元

累积变化率为97.46%;MCE-CA-Markov模拟结果显示,共有27类图谱单元发生变化,主要图谱单元累积变化率为95.96%,接近2008—2013年、2013—2018年主要图谱单元累积变化率。CA-Markov、MCE-CA-Markov模型模拟结果均表明,2018—2023年图谱变化最明显的是耕地→建设用地,建设用地聚集区由保定市(2008—2018年)转变为保定市和北京市。2023年MCE-CA-Markov模型转移图谱位于前列的是建设用地→耕地、耕地→林地,符合我国耕地占补平衡、退耕还林等用地政策;而CA-Markov模型转移图谱位于前列的除耕地→建设用地外,其余为林地→其他用地,转化较为单一。

2.3 景观格局特征演变分析

2.3.1 景观类型水平变化特征分析

由图4可知,耕地、林地两种基质景观2008—2018年斑块数量增加,聚合度指数略有减小,表明斑块破碎且分散;最大斑块指数呈下降趋势,表明两种优势景观对流域控制力减弱;景观形状指数保持增加状态,说明斑块形状趋于复杂;散布与并列指数持续增加,表明研究区与耕地、林地相邻景观类型增加;耕地、林地的连接度指数无明显变化。草地与林地斑块除散布与并列指数外其他各景观指数变化趋势一致,草地散布与并列指数在2008—2013年略有下降,2013—2018年略有上升。建设用地2008—2018年斑块数量、景观形状指数呈上升状态,斑块形状趋于复杂。连接度指数在2008—2018年略有增加,连通性增高;散布与并列指数升高,表明研究区建设用地向

表2 2008—2023年白洋淀流域各景观面积、比例和动态度

Table 2 Landscape area, proportion and rate of change in Baiyangdian basin from 2008 to 2023

项目 Items	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	建设用地 Construction land	水域 Water	未利用地及其他 Unused land and other land
2008年面积/km ²	14 963.05	13 020.52	3 070.79	2 110.85	171.96	540.47
2008年比例/%	44.17	38.43	9.06	6.23	0.51	1.60
2013年面积/km ²	14 347.17	12 911.60	2 979.67	2 788.25	293.71	557.24
2013年比例/%	42.35	38.11	8.80	8.23	0.87	1.64
2018年面积/km ²	13 470.53	12 841.34	3 030.14	3 689.52	262.83	583.29
2018年比例/%	39.76	37.91	8.94	10.89	0.78	1.72
2023年(CA-Markov)面积/km ²	11 867.34	11 332.07	3 828.17	5 715.16	284.57	850.33
2023年(CA-Markov)比例/%	35.03	33.45	11.30	16.87	0.84	2.51
2023年(MCE-CA-Markov)面积/km ²	11 867.11	11 360.01	3 818.18	5 678.49	304.28	840.57
2023年(MCE-CA-Markov)比例/%	35.06	33.53	11.27	16.76	0.90	2.48
2008—2013年动态度/%	-0.82	-0.17	-0.59	6.42	14.16	0.62
2013—2018年动态度/%	-1.22	-0.11	0.34	6.46	-2.10	0.93
2018—2023年(CA-Markov)动态度/%	-2.38	-2.35	5.27	10.98	1.65	9.16
2018—2023年(MCE-CA-Markov)动态度/%	-2.37	-2.31	5.20	10.78	3.15	8.82

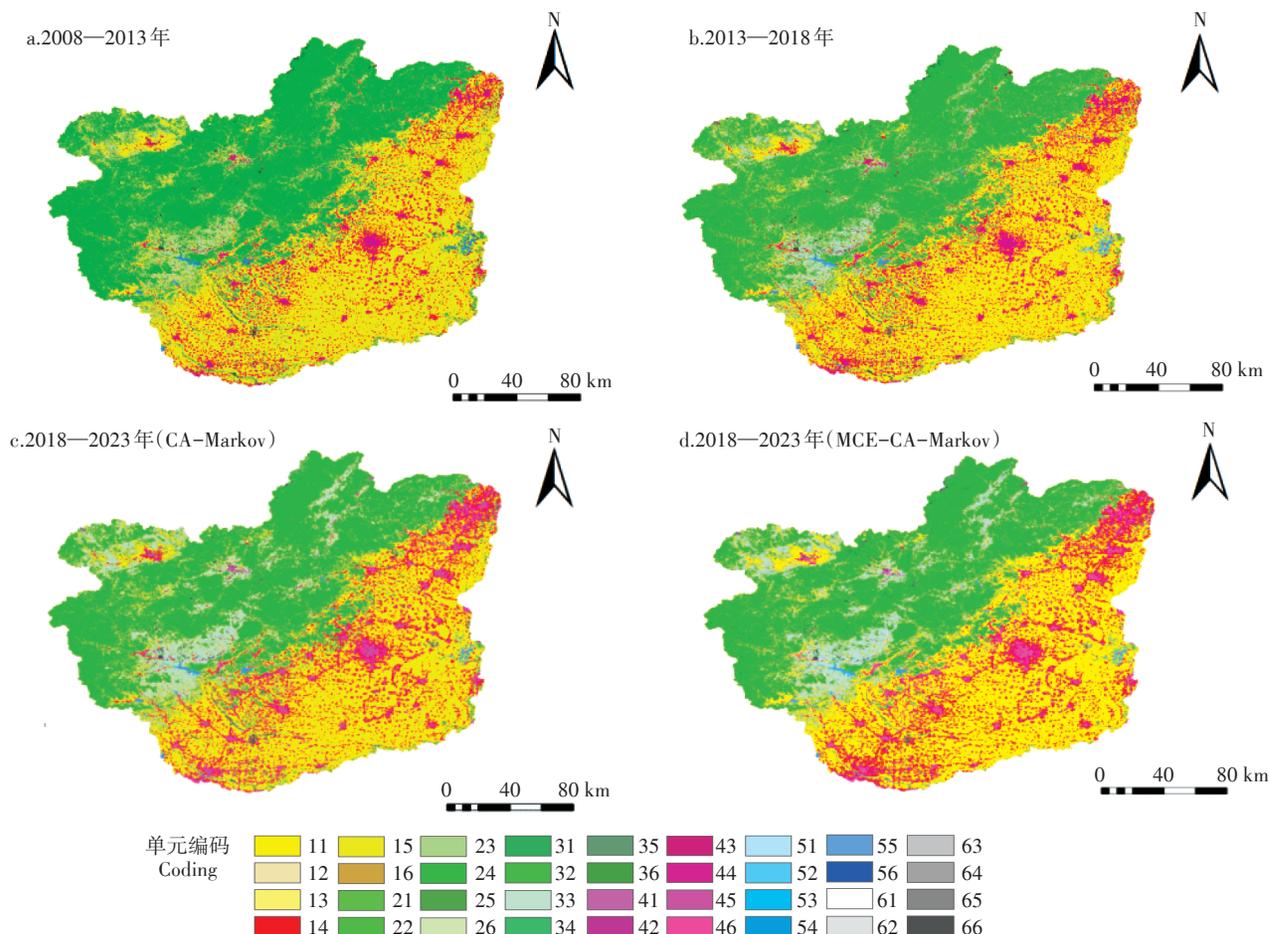


图3 白洋淀流域景观转移图谱

Figure 3 Landscape transfer map in the Baiyangdian basin

四周扩张,与多种景观类型相邻。研究区修建水库、人造湖等使大部分水体景观受到人为干扰,水域斑块数量、景观形状指数在2008—2018年持续增加;连接度指数和聚合度指数在2008—2018年持续减少;水域的散布与并列指数在2008—2013年减少,2013—2018年增加。未利用地及其他用地2008—2018年斑块数量增加,聚合度指数下降,斑块破碎且分散;景观形状指数和散布与并列指数增加,未利用地及其他用地斑块形状复杂且与多种景观相邻。建设用地、水域、未利用地及其他用地的最大斑块指数无明显变化。

基于MCE-CA-Markov和CA-Markov预测的2023年耕地、林地、草地各景观指数与2018年趋势一致,斑块数量、景观形状指数明显降低,聚合度指数增加,其他景观指数无明显变化,但基于MCE-CA-Markov所计算的耕地、林地、草地的斑块数量、景观形状指数变化幅度明显低于基于CA-Markov的模拟结果。耕地与区域内其他景观之间的关系变得简单,形状趋于规则和紧实,可能是土地整理以及农业规模经营使耕

地布局更具规律性。林地、草地分布格局也逐渐从分散向聚集转变。水域为MCE-CA-Markov模型中的限制因子,其斑块数量远大于CA-Markov的预测数量,基于MCE-CA-Markov预测的水域景观指数中,除最大斑块指数无明显变化外,其余景观指数变化幅度略小于CA-Markov预测结果。基于MCE-CA-Markov和CA-Markov预测的建设用地和未利用地及其他用地的各景观指数与2018年相比变化趋势和幅度无明显差别。2023年建设用地和未利用地及其他用地的斑块数量和景观形状指数明显下降,聚合度指数和散布与并列指数上升,建设用地优势度增加,其他景观指数无明显变化。

2.3.2 景观水平变化特征分析

由表4可知,2008—2018年,白洋淀流域斑块密度增加,平均斑块面积和聚合度指数减少,表明白洋淀全流域斑块破碎度逐渐升高、离散。景观形状指数越大,形状越不规则;香农多样性指数和香农均匀度指数增加,多样性和复杂程度明显增强。基于两种模

表3 2008—2023年主要景观转移图谱单元排序表

Table 3 Sorting table of major landscape transfer map units from 2008 to 2023

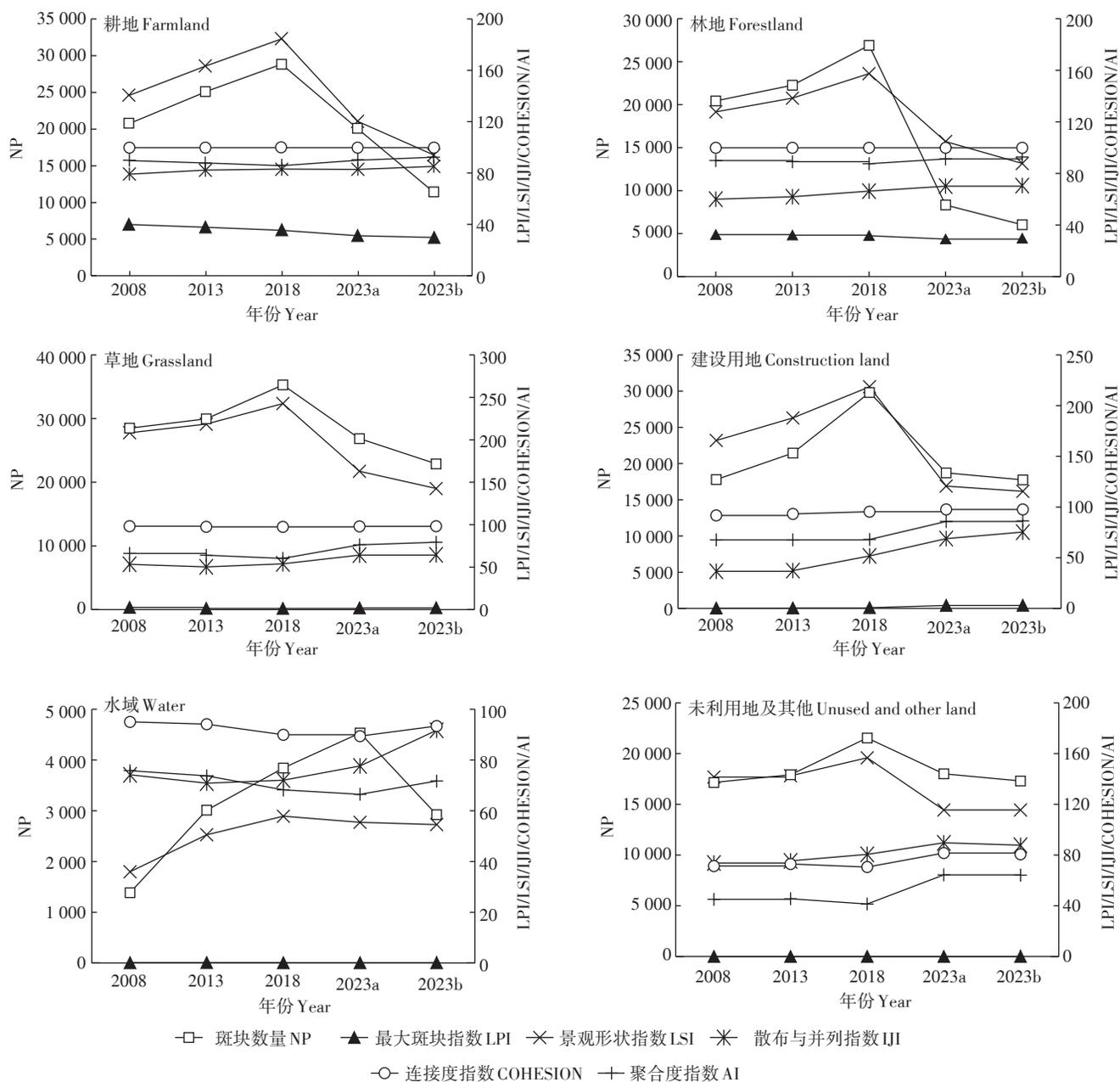
2008—2013年				2013—2018年			
编码 Coding	景观类型 Landscape type	转移面积 Area transferred/km ²	变化率 Rate of change/%	编码 Coding	景观类型 Landscape type	转移面积 Area transferred/km ²	变化率 Rate of change/%
14	耕地→建设用地	589.28	44.20	14	耕地→建设用地	895.20	51.50
23	林地→草地	99.29	7.45	23	林地→草地	152.94	8.80
64	未利用地及其他→建设用地	98.25	7.37	12	耕地→林地	107.37	6.18
12	耕地→林地	67.37	5.05	32	草地→林地	79.95	4.60
35	草地→水域	63.51	4.76	21	林地→耕地	72.67	4.18
36	草地→未利用地及其他	62.39	4.68	51	水域→耕地	61.41	3.53
25	林地→水域	53.48	4.01	16	耕地→未利用地及其他	52.78	3.04
21	林地→耕地	51.05	3.83	41	建设用地→耕地	47.15	2.71
32	草地→林地	50.97	3.82	31	草地→耕地	42.73	2.46
16	耕地→未利用地及其他	41.82	3.14	65	未利用地及其他→水域	41.51	2.39
31	草地→耕地	31.61	2.37	13	耕地→草地	36.82	2.12
41	建设用地→耕地	28.25	2.12	24	林地→建设用地	21.07	1.21
13	耕地→草地	23.51	1.76	34	草地→建设用地	20.35	1.17
24	林地→建设用地	13.83	1.04	26	林地→未利用地及其他	17.71	1.02
	合计	1 333.179	95.61	54	水域→建设用地	12.70	0.73
					合计	1 662.35	95.63
2018—2023年(CA-Markov)				2018—2023年(MCE-CA-Markov)			
编码 Coding	景观类型 Landscape type	转移面积 Area transferred/km ²	变化率 Rate of change/%	编码 Coding	景观类型 Landscape type	转移面积 Area transferred/km ²	变化率 Rate of change/%
14	耕地→建设用地	1970.33	49.60	14	耕地→建设用地	2 285.80	46.22
23	林地→草地	909.10	22.89	23	林地→草地	983.97	19.90
21	林地→耕地	325.06	8.18	21	林地→耕地	583.09	11.79
26	林地→未利用地及其他	137.11	3.45	41	建设用地→耕地	266.50	5.39
24	林地→建设用地	122.37	3.08	12	耕地→林地	172.25	3.48
16	耕地→未利用地及其他	118.51	2.98	26	林地→未利用地及其他	136.78	2.77
46	建设用地→未利用地及其他	82.81	2.08	46	建设用地→未利用地及其他	98.09	1.98
65	未利用地及其他→水域	80.72	2.03	31	草地→耕地	87.55	1.77
31	草地→耕地	70.32	1.77	16	耕地→未利用地及其他	87.13	1.76
51	水域→耕地	55.34	1.39	65	未利用地及其他→水域	44.16	0.89
	合计	3 871.69	97.46		合计	4 745.33	95.96

型预测2023年白洋淀流域景观水平特征,与2018年相比,白洋淀流域的斑块密度、平均斑块面积和聚合度指数增加,在未来发展过程中,斑块由多个不规则小斑块形成数量较少且形状规则的大斑块,斑块趋于紧实。景观形状指数减少,形状逐渐规则,香农多样性指数和香农均匀度指数上升,景观格局趋于多样化和均匀化。与2018年相比,基于MCE-CA-Markov模型计算的景观水平指数变化幅度略小于CA-Markov模型的计算结果。

3 讨论

从白洋淀流域2008—2018年各景观结构变化来

看,作为基质的耕地、林地呈小幅下降态势。近年来,白洋淀流域农业人口减少、非农业人口增加、工农业结构调整,耕地主要向建设用地扩张,尤其是在地势平坦地区扩张速度更快,这是城镇化发展的必然结果。2013—2018年草地面积增加,一方面是由于分辨率较低,可能将近年来新种植的树苗判别为草地;另一方面为部分林地逆向演替为草地。有研究表明,人类活动会影响土地的适宜性^[26],使得部分林地退化,如渠系衬砌、过度开采地下水会使人造林和天然林枯死,进而造成林地与水域不断缩小,对白洋淀流域的生态恢复产生遏制作用。基于景观指数方法分析白洋淀流域2008—2018年景观格局,结果表明,由



2023a 和 2023b 分别代表 MCE-CA-Markov 和 CA-Markov 模型预测结果
 2023a, 2023b indicate simulation results based on MCE-CA-Markov and CA-Markov models, respectively

图 4 2008—2023 年白洋淀流域各景观类型水平上景观指数变化

Figure 4 Comparison of landscape pattern indices change of each landscape type in Baiyangdian basin from 2008 to 2023

表 4 2008—2023 年白洋淀流域景观水平上景观格局指数

Table 4 Landscape pattern indices based on class level in Baiyangdian basin from 2008 to 2023

年份 Year	斑块密度 PD	景观形状指数 LSI	平均斑块面积 AREA_MN	聚合度指数 AI	香农多样性指数 SHDI	香农均匀度指数 SHEI
2008 年	3.142 7	149.488 4	31.819 9	85.516 5	1.211 7	0.676 3
2013 年	3.546 8	167.602 7	28.194 8	83.741 2	1.259 5	0.702 9
2018 年	4.333 4	192.701 6	23.076 6	81.279 6	1.299 2	0.725 1
2023 年(CA-Markov)	2.367 1	113.901 3	42.246 3	89.015 8	1.413 3	0.788 8
2023 年(MCE-CA-Markov)	2.811 5	130.539 2	35.568 2	87.383 7	1.412 7	0.788 4

于人类活动的干扰,景观之间被割裂,斑块破碎度加大,斑块形状变得复杂。

2023年较2018年而言,耕地、林地面积呈下降态势,草地和水域面积均有所增加,建设用地优势度持续增加,并由保定市一个辐射区转变为保定市和北京市两个辐射区。景观聚集化、规模化、均匀化、多样化将是今后发展趋势,这与朱增云等^[24]、潘月等^[27]研究结果一致。MCE-CA-Markov模拟的2018年白洋淀流域景观分布与传统CA-Markov模拟相比精度更高,2018—2023年白洋淀流域景观(除水域)动态度小于CA-Markov模拟结果,作为优势景观的耕地、林地斑块数量、景观形状指数和全流域水平景观指数与2018年相比变化幅度明显小于CA-Markov模拟结果。MCE-CA-Markov模型考虑了环境因素,景观结构和格局变化受到一定条件约束,模拟结果更接近实际。虽然MCE-CA-Markov模拟景观变化可以克服CA-Markov线性模拟方法的弊端,但MCE-CA-Markov模拟中仅利用地形、交通等信息,对环境保护、规划、政策等人文因素涉及少,如未涉及永久基本农田,今后可综合考量自然和人文因素,制作更为科学、全面的适宜性图集,这将更利于城市生态系统的健康发展和生态安全问题的解决。

通过对白洋淀流域景观进行动态分析,笔者认为白洋淀流域今后生态安全重点是加强耕地、林地的保护力度,一方面严格按照国家提出的生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界三条控制线,控制城市化进程对耕地、林地的占用,另一方面推进农业和林业机械化、聚集化经营。白洋淀流域东北至西南地区为林草过渡地,生态环境较脆弱,应结合《雄安新区白洋淀上游规模化林场建设规划》和各县的林地保护利用规划(2011—2020年)合理推进水土保持治理工程建设,增强生态景观控制功能。城镇发展需结合《河北雄安新区规划纲要》和《河北雄安新区启动区控制性详细规划》等重要文件,深入开展市容市貌专项整治,统一规划商服用地,区分村庄整治深度,引导村庄撤并。加快雄安新区对外主干路网建设,实现与周边城市路网的快速衔接。考虑对研究区水环境的保护,本研究将水域作为MCE-CA-Markov模型中限制因子,预测2023年水域面积将大幅增加。白洋淀生态环境建设作为雄安新区高质量发展的重要部分,其生态价值不容忽视,应恢复白洋淀区水量,保护水质,加大河道疏浚力度,并将水域作为提升新区各生态源地间连通性的生态廊道,满足新区及周边区域水源涵养

和文化休闲等生态需求。同时,应因地制宜调整各景观结构和利用方式,充分发挥各区域资源禀赋,合理优化农业空间、城镇空间和生态空间。

4 结论

(1)MCE-CA-Markov模型模拟考虑了环境因素,与CA-Markov模型相比模拟精度更高,对2023年白洋淀景观结构和格局变化特征的模拟结果更符合社会发展实际,MCE-CA-Markov模型更全面科学,适宜推广。

(2)白洋淀流域内的建设用地2008—2018年动态度最大,2023年建设用地动态度与2018年相比持续增加,且建设用地2008—2023年主要通过侵占白洋淀流域平原区耕地来实现,各时段内耕地转建设用地的变化率超过40%,人地矛盾加剧。

(3)从景观类型水平和景观水平分析白洋淀流域景观格局发现,景观斑块2018—2023年由分散、不规则向聚集、规则转变,这一转变表明流域内各景观有序、高效的空间布局是今后城镇化发展的趋势。

参考文献:

- [1] Treitz P, Rogan J. Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: An introduction[J]. *Progress in Planning*, 2004, 61(4):269-279.
- [2] 朱利凯, 蒙古军. 国际LUCC模型研究进展及趋势[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(5):782-790. ZHU Li-kai, MENG Ji-Jun. Advance in and tendencies of land use and cover change model[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(5):782-790.
- [3] 刘吉平, 赵丹丹, 田学智, 等. 1954—2010年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, 34(12):3234-3244. LIU Ji-ping, ZHAO Dan-dan, TIAN Xue-zhi, et al. Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in the Sanjiang Plain from 1954 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12):3234-3244.
- [4] Folefack A J J, Adamowski J F. Application of the Von Thünen model in determining optimal locations to transport compost for crop production outside of Yaoundé, Cameroon[J]. *Journal of Human Ecology*, 2012, 39(2):125-143.
- [5] 李杰兰, 陈兴鹏, 王雨, 等. 基于SD模型的宁夏可持续发展研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(12):21-27. LI Jie-lan, CHEN Xing-peng, WANG Yu, et al. Research on sustainable development of Ningxia, China, based on the system dynamic model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(12):21-27.
- [6] He X D, Mai X M, Shen G Q. Delineation of urban growth boundaries with SD and CLUE-S models under multi-scenarios in Chengdu metropolitan area[J]. *Sustainability*, 2019, 11(21):5919.
- [7] 余德贵, 吴群. 基于Logistic-Markov方法的土地利用结构变化多因素驱动预测模型研究与应用[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1):149-154. YU De-gui, WU Qun. Application of multiple driving-factors

- prediction model for land use structure change based on Logistic-Markov model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(1): 149-154.
- [8] Syphard A D, Clarke K C, Franklin J. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in southern California[J]. *Ecological Complexity*, 2005, 2(2): 185-203.
- [9] 陈颀, 林毅伟, 林丽丽, 等. 基于 Markov 和 Logistic 模型的莆田市土地利用变化及林地转出空间模拟[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 87-97. CHEN Yi, LIN Yi-wei, LIN Li-li, et al. Study on land use change in Putian City and spatial simulation of forestland transition based on Markov model and Logistic regression model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(2): 87-97.
- [10] Zhou L, Dang X W, Sun Q K, et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102045.
- [11] Cauter H, Lawrence W M. A Markovian and cellular automata land-use change predictive model of the Usangu Catchment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(1): 64-81.
- [12] Zhao M M, He Z B, Du J, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 29-38.
- [13] 于淼, 栗云召, 屈凡柱, 等. 黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 484-492. YU Miao, LI Yun-zhao, QU Fan-zhu, et al. Spatio-temporal changes and trend prediction of degraded coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 484-492.
- [14] 成超男, 胡杨, 冯尧, 等. 基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究——以晋中主城区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1455-1462. CHENG Chao-nan, HU Yang, FENG Yao, et al. Construction of urban ecological zones based on CA-Markov model: A case study of the main urban area of Jinzhong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1455-1462.
- [15] Tony S, Sun Y, Yany Y. Generating a future land use change scenario with a modified population-coupled Markov cellular automata model[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2012, 19(2): 108-119.
- [16] 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. FENG Li-yuan, MI Wen-bao, MA Guo-qing. A study of land use change and simulation of a Ningxia economic belt along Yellow River based on CA-Markov model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 218-222, 230.
- [17] 易丹, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态敏感性评价和 CA-Markov 模拟的平原型城市开发边界划定——以南昌市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 208-218. YI Dan, ZHAO Xiao-min, GUO Xi, et al. Elimination of urban development boundary based on ecological sensitivity evaluation and CA-Markov simulation in plain city: A case of Nanchang, Jiangxi[J]. *China Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 208-218.
- [18] Mohamed A, Worku H. Simulating urban land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding[J]. *Urban Climate*, 2020, 31: 100545.
- [19] 于元赫, 李子君, 林锦阔, 等. 沂河流域土地利用时空变化图谱特征分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 975-988. YU Yuan-he, LI Zi-jun, LIN Jin-kuo, et al. TUPU characteristics of spatiotemporal variation for land use in the Yihe River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 975-988.
- [20] 胡雪丽, 徐凌, 张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1652-1660. HU Xue-li, XU Ling, ZHANG Shu-shen. Land use pattern of Dalian City, Liaoning Province of northeast China based on CA-Markov model and multi-objective optimization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6): 1652-1660.
- [21] 刘瑾, 田永中, 田林, 等. 快速城镇化区域用地扩张模拟的规划约束对比研究[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(1): 82-88. LIU Jin, TIAN Yong-zhong, TIAN Lin, et al. A comparative study on planning constraints of the rapid urbanization area expansion simulation[J]. *Geography and Geo-Information Scienc*, 2019, 35(1): 82-88.
- [22] Wang L J, Wu L, Hou X Y, et al. Role of reservoir construction in regional land use change in Pengxi River basin upstream of the Three Gorges Reservoir in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(13): 1048.
- [23] 史婧蕾, 王远东, 黄绍丽. 基于 CA-Markov 的赣州土地利用变化模拟研究[J]. 赣南师范大学学报, 2019, 40(6): 112-120. SHI Jing-lei, WANG Yuan-dong, HUANG Shao-li. Land use change in Ganzhou based on CA-Markov model[J]. *Journal of Gannan Normal University*, 2019, 40(6): 112-120.
- [24] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 基于 CA-Markov 模型的呼图壁县土地利用景观格局预测研究[J]. 生态科学, 2020, 39(1): 136-145. ZHU Zeng-yun, KASIMU Alimujiang. Prediction of land use landscape pattern in Hutubi County based on CA-Markov model[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(1): 136-145.
- [25] 郭继强, 潘洁. 基于 CA-Markov 模型的南京市热环境格局演变及预测分析[J]. 大气与环境光学学报, 2020, 15(2): 143-153. GUO Ji-qiang, Pan jie. Evolution and prediction of thermal environment pattern in Nanjing based on CA-Markov model[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(2): 143-153.
- [26] 贾科利, 张俊华, 马正亮, 等. 生态脆弱区土地利用变化与沙漠化响应研究——以宁夏中部干旱带为例[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 98-103. JIA Ke-li, ZHANG Jun-hua, MA Zheng-liang, et al. Land use change and its desertification response in vulnerable ecological area: A case in arid area of central Ningxia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 98-103.
- [27] 潘月, 于东升, 王秀虹, 等. 基于 CA-Markov 模型的土地利用景观格局预测研究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 391-397. PAN Yue, YU Dong-sheng, WANG Xiu-hong, et al. Prediction of land use landscape pattern based on CA-Markov model[J]. *Soils*, 2018, 50(2): 391-397.