

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.029; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.029.

张启扬, 刘仁志, 栾朝旭. 基于 PLUS 模型的典型农牧交错带土地利用驱动力分析与多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 368-378.

Zhang Qiyang, Liu Renzhi, Luan Chaoxu. Analysis of driving force and multi-scenario simulation of land use in a typical agro-pastoral ecotone based on the PLUS model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 368-378.

基于 PLUS 模型的典型农牧交错带土地利用 驱动力分析与多情景模拟

张启扬, 刘仁志, 栾朝旭

(北京师范大学 环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: [目的] 实现农牧交错带地区破碎化土地利用变化的精准预测, 为农牧交错带土地利用预测与结构调整提供重要工具。[方法] 研究针对性构建了农牧交错带土地利用模拟方法 (APE-PLUS), 引入土地扩张分析策略 (LEAS)、基于多类型随机斑块种子的 CA 模型 (CARS)、Markov 模型和土地利用情景设计, 解决农牧交错带土地利用模拟中斑块零散、景观破碎、变化机制复杂的问题。采用二调、三调土地利用数据, 分析了 2014—2020 年土地利用变化及其驱动力, 模拟了 2032 年科左后旗自然增长、生态优先、耕地保护和可持续发展情景下的土地利用格局。[结果] (1) 农牧交错带土地利用模拟方法 (APE-PLUS) 精度较高, Kappa 系数为 0.87, 总体精度达到 0.92; (2) 科左后旗 2014—2020 年土地利用变化显著, 全旗 47.85% 的土地类型发生改变, 14.65% 的土地由耕地转变为草地, DEM 和水资源是这一时期土地利用变化的主要驱动力; (3) 2032 年多情景预测中, 可持续发展情景耕地面积增长 1.31%, 林地和草地分别减少了 0.77% 和 1.72%, 其他用地面积减小 28.4%, 相比于其他 3 种情景, 土地利用数量结构与空间格局更合理。此情景有助于减缓耕地扩张趋势和草地缩减趋势, 有效控制水土流失、土壤沙化问题, 提高生态保护与经济发展的协调程度。[结论] 农牧交错带土地利用模拟方法 (APE-PLUS) 对科左后旗的土地利用具有较高的模拟精度, 可以对农牧交错带斑块级的土地利用变化进行高精度的预测。

关键词: 土地利用变化; 农牧交错带; PLUS 模型; 科尔沁左翼后旗; 驱动因子

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0368-11

Analysis of driving force and multi-scenario simulation of land use in a typical agro-pastoral ecotone based on the PLUS model

Zhang Qiyang, Liu Renzhi, Luan Chaoxu

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation,

School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to achieve precise prediction of fragmented land use changes in agro-pastoral ecotones, and to provide an important tool for land use forecasting and structural adjustment in these regions. [Methods] An Agro-pastoral Ecotone Patch-generating Land Use Simulation method (APE-PLUS) was constructed. The challenges of fragmented patches, landscape fragmentation, and complex change mechanisms in land use simulation within agro-pastoral ecotones were addressed by incorporating the land expansion analysis strategy (LEAS), a Cellular Automata model based on multi-type random patch seeds (CARS), the Markov model, and land use scenario design. Land use data from the second and third national land surveys were utilized to analyze land use changes and their driving forces from 2014 to 2020. The land use patterns in Horqin Left Back Banner for the year 2032 under scenarios of natural growth,

收稿日期: 2024-04-08

修回日期: 2024-04-23

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52170186); 国家重点研发计划项目 (2016YFC050350403)

第一作者: 张启扬 (2000—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为环境评价、规划与管理研究。E-mail: 202221180055@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 刘仁志 (1974—), 男, 四川仁寿人, 博士, 副教授, 主要从事区域环境承载力、环境风险、环境评价规划与管理研究。E-mail: liurenzhi@bnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

ecological priority, cultivated land protection, and sustainable development were simulated. [Results] (1) The Agro-pastoral Ecotone Patch-generating Land Use Simulation method (APE-PLUS) demonstrated high accuracy, with a Kappa coefficient of 0.87 and an overall accuracy of 0.92. (2) From 2014 to 2020, Horqin Left Back Banner experienced significant changes in land use, with 47.85% of the land types undergoing transformation. 14.65% of the land was converted from cultivated fields to grasslands, with DEM and water resources being the primary drivers of these changes during this period. (3) In the multi-scenario forecasts for 2032, the sustainable development scenario predicts 1.31% increase in cultivated land area, 0.77% decrease in woodland, 1.72% decrease in grassland, and 28.4% decrease in other land. Compared to the other three scenarios, this scenario presents a more rational land use quantity structure and spatial pattern. It helps mitigate the expansion of cultivated land and the reduction of grassland, effectively controls soil erosion and desertification, and enhances the coordination between ecological conservation and economic development. [Conclusion] The Agro-pastoral Ecotone Patch-generating Land Use Simulation method (APE-PLUS) demonstrates high simulation accuracy for land use in Horqin Left Back Banner, enabling high-precision prediction of patch-level land use changes in agro-pastoral ecotones.

Keywords: land use change; agro-pastoral ecotone; PLUS model; Horqin Left Back Banner; driving factors

土地利用/土地覆盖变化(Land Use and Land Cover Change, LUCC)是全球环境保护的前沿和焦点领域^[1],对气候变化、地球化学循环、生态环境保护和社会经济发展有着重要影响。LUCC 的主要研究方向有土地利用变化过程^[2]、土地利用变化模拟^[3]、土地利用变化驱动机制等^[4]。土地利用变化模拟不仅可以揭示土地利用时空变化过程,还能预测未来的变化趋势,对土地利用结构的优化调整有着重要意义。在众多土地利用变化模型中,系统动力学(SD)模型、CA-Markov 模型^[5]、CLUE-S 模型^[6]及 FLUS 模型等^[7]被广泛应用。其中,SD 模型、CA-Markov 模型和 CLUE-S 模型在模拟土地利用变化的时空维度及预测土地利用需求方面具有一定的局限性^[8-10],FLUS 模型在探究土地利用变化机制与驱动力、预测土地利用需求方面存在缺陷。斑块生成土地利用模拟(patch-generating land use simulation, PLUS)模型是一种结合传统的元胞自动机(CA)模型与斑块生成模拟策略的模拟框架,通过集成基于土地扩张分析的规则挖掘框架,识别出土地利用变化的潜在驱动因素,还可以详细演示斑块的时空演变过程,提高模拟的精确度^[11]。斑块生成土地利用模拟模型已经应用于生态系统服务价值评估^[12]、碳储量分布^[13]、生态安全格局构建^[14]、城镇开发边界划定等^[15],显示出其广泛的适用性和有效性。然而,在农牧交错带的土地利用变化模拟方面,PLUS 模型的应用尚未得到广泛探索。

农牧交错带是位于干旱、半干旱区与半湿润区,农业区与牧业区之间的生态过渡地带,耕地与草地在时间上交替存在、空间上镶嵌分布^[16],既是维护东部地区生态安全的关键地带,也是西部地区重要的饲草

供应基地,同时在促进民族团结和地区稳定方面发挥着不可替代的作用。然而,该地区面临着降水稀少、年降水量波动大以及土壤条件较差的自然挑战,这些因素使得农牧交错带地区更适宜发展畜牧业,而不适宜发展种植业。尽管如此,受到经济利益的驱动,当地农户仍旧大规模开垦耕地,加剧了水土流失、土地荒漠化、草场退化以及植被覆盖率降低等环境问题。种植业与畜牧业之间的竞争还引发了产业结构不合理、经济效益低下、居民收入有限的问题,影响了当地居民的生活水平。总之,不合理的土地利用模式严重阻碍了农牧交错带地区的生态保护与经济发展,亟需通过精确的土地利用变化模拟来指导调整土地利用结构,以实现生态与经济的和谐发展。

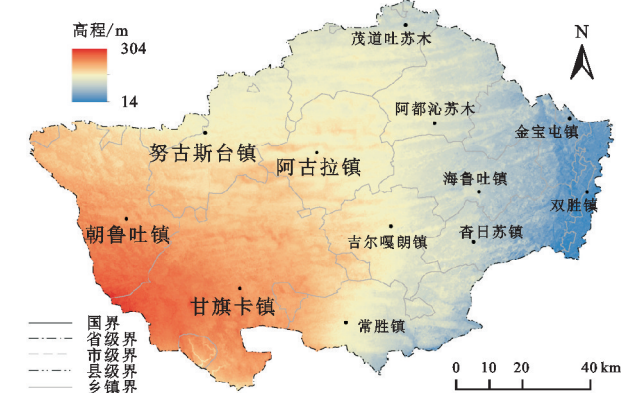
本研究采用 PLUS 模型,集成土地利用变化机制挖掘框架(land expansion analysis strategy, LEAS)、多类型随机斑块种子生成机制(CA based on multi-type random patch seeds, CARS)、Markov 模型以及土地利用情景设计,针对农牧交错带土地高度破碎化、地块零散以及多种地类交错分布的复杂地理特征,构建农牧交错带土地利用模拟方法(agro-pastoral ecotone patch-generating land use simulation, APE-PLUS)。选取科尔沁左翼后旗(以下简称“科左后旗”)作为案例研究区,该地区具有典型的农牧交错带特征,包括干旱少雨、土壤贫瘠、水土流失等。本文使用 APE-PLUS 方法探讨科左后旗土地利用变化及其驱动因子,并基于 2020 年的土地利用模拟结果进行精度验证,设计 4 种发展情景,模拟分析 2032 年科左后旗在多政策导向下的土地利用格局。本研究旨在通过精确模拟科左后旗的土地利用变化,为制定

有效的农牧交错带土地利用管理策略和地区持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

科尔沁左翼后旗,位于内蒙古自治区通辽市东南部,范围为东经 $121^{\circ}30'$ — $123^{\circ}42'$,北纬 $42^{\circ}40'$ — $43^{\circ}42'$,全旗总面积为 $11\,570\text{ km}^2$,东邻吉林省双辽市,南邻辽宁省彰武市、内蒙古自治区奈曼旗等,北部与科尔沁区和科尔沁左翼中旗接壤,地处科尔沁沙地腹地。科尔沁沙地范围为东经 $118^{\circ}\sim 124^{\circ}30'$,北纬 $42^{\circ}40'$ — $45^{\circ}15'$,主要分布在西辽河平原和大兴安岭的山间河谷地带。科左后旗境内呈西南向东北后向东南逐渐降低的地势,海拔高度 $88.5\sim 308.4\text{ m}$ (图 1)。年均降水量为 414.9 mm ,全旗降水东南部多,西北部少,主要集中在 5—9 月,约占全年总降水量的 85%。科左后旗地下水埋深较深,平均为 5.26 m 。除东、西辽河交汇处占总面积不到 3% 的冲积平原,其他大部分地区以沙地和沙丘为主,呈现沙陀草甸交错、沙丘连绵起伏的地貌特征。在土地利用类型上,耕地和草地是主要的土地利用类型,占总面积的 70% 以上,耕地以旱地为主,草地中天然牧草地占 94.7%,人工牧草地仅占 5.2%。近年来,由于耕地的过度扩张和不合理开垦,导致草地面积减少,单位面积载畜量增加,地下水位逐年下降,水资源短缺和土壤沙化问题日益突出^[17]。科左后旗位于世界三大“黄金玉米带”之一的中国东北玉米带核心区,玉米的播种面积和产量均超过地区农业总量的 80%,然而这种高耗水的玉米种植业与当地水资源短缺的现状形成了尖锐的矛盾。科左后旗现有人口 40.15 万人,有蒙、汉、满、回等 19 个民族,其中蒙古族占总人口的 75.24%,构成了该地区多元的民族结构。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)3333 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 科左后旗位置示意图

Fig. 1 Location of the Horqin Left Back Banner

1.2 数据来源

研究使用的数据包括土地利用数据、自然与社会经济驱动因子数据和规划数据。土地利用数据来源于全国第二次土地利用调查年度更新数据和全国国土变更调查数据。全国第二次土地利用调查的 2014 年度更新数据在 2009 年二调数据基础上得到。2020 年度全国国土变更调查是在第三次全国国土调查统一时点调查成果基础上,利用遥感影像和实地调查更新“三调”数据库得到。调查将土地划分为耕地、园地、林地、草地、水域、其他用地与城镇、工矿和道路用地 7 类。坡度、坡向数据在通辽市 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ 数字高程模型基础上提取获得。河流距离采用 ArcGIS 10.8 中的欧式距离计算得到。地下水埋深数据来源于当地水利部门地下水监测数据,并采用插值方法处理。夜间灯光数据来源于 Chen 等^[18]。道路数据来自 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>)。生态保护红线和永久基本农田根据通辽市国土空间规划结果数字化得到。根据模型的数据输入要求,统一数据的坐标系、分辨率和空间范围,计算精度采用 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的栅格,范围为 $5\,745\times 3\,865$ 个格元。具体数据及其来源见表 1。

2 研究方法

2.1 驱动因子的选取

土地利用变化受到自身理化性质以及自然、社会经济条件等外部因子的共同作用。地形地貌决定土地利用的基本空间格局,平原多耕地,低洼、陡坡处多草地。气温、水资源是影响农牧交错带土地利用变化的根本原因,我国农牧交错带范围与 400 mm 等降水量线基本吻合。土壤理化性质与耕地扩张、土壤沙化有着重要联系,土壤条件优良、地力强的地块会优先用于农业。社会经济条件对短期内的土地利用类型转变起着重要作用,政策倾向影响耕地、林地、草地的关系。农牧交错带区别于其他土地利用类型单一的区域^[19-20],具有土地利用类型丰富的特点,在选择驱动因子时要兼顾地形地貌、气温、水资源、土壤理化性质和社会经济等因素^[21]。本文根据数据可获取性、空间差异性和全面性的原则,最终选取了 12 个驱动因子,包括 DEM、坡度、年均气温、年均降水量、地下水埋深、到开放水面距离、土壤有机质、土壤厚度、人口、GDP、夜间灯光、到道路距离。

2.2 农牧交错带土地利用模拟方法

农牧交错带土地利用模拟方法(agro-pastoral ecotone patch-generating land use simulation, APE-PLUS)综合运用了 PLUS 模型、Markov 模型和土地利用情景设计三大核心组件,PLUS 模型进一步细化为基于土地

扩张分析策略的规则挖掘方法(LEAS)和基于多类型随机斑块种子的 CA 模型(CARS)两个关键子模块。本研究以科左后旗 2014 年和 2020 年土地利用数据为基

础,以 6 a 为时间步长,模拟 2032 年多情景土地利用情况。CARS 模块设置斑块衰减阈值为 0.8,斑块扩张系数为 0.08,种子百分比设为 0.000 1。

表 1 数据信息

Table 1 Data information

数据类型	数据名称	数据来源
土地利用数据	全国第二次土地利用调查更新数据	当地政府
	全国第三次国土资源调查数据	
	数字高程模型(DEM)	
自然因子	年均降水量	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
	年均气温	
	地下水埋深	国家地球系统数据中心(https://soil.geodata.cn/ztsj.html)
	科左后旗土壤厚度图	
	中国 1 km 栅格土壤有机质含量图	
社会经济因子	人口密度	中国科学院资源与环境数据中心(http://www.resdc.cn)
	地均 GDP	
	道路距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)
	夜间灯光	
规划数据	生态保护红线	Chen 等人 ^[18]
	永久基本农田	

2.2.1 基于 LEAS 的驱动因子分析 LEAS 模块有着识别土地利用变化规则的数据挖掘框架,可以揭示非线性的土地利用动态变化规则。基于随机森林(RF)算法,对土地利用扩张图和驱动因子数据集进行随机采样与训练,计算各地类扩张概率和因子贡献度。输出第 i 个单元格上土地利用类型 k 的增长概率 $P_{i,k}^d$ 。

$$P_{i,k}^d(x) = \frac{\sum_{n=1}^M I(h_n(x)=d)}{M} \quad (1)$$

式中: d 的值为 0 或 1,值为 1 表示其他的土地利用类型转变为 k 类土地利用类型,值为 0 表示其他转变; x 是由多个驱动因子组成的矢量; $I(\cdot)$ 是决策树集的指示函数; $h_n(x)$ 是向量 x 的第 n 个决策树的预测类型; M 是决策树总数^[22]。

2.2.2 基于 Markov 的土地利用数量预测 Markov 模型是一种关于事件发生概率的预测方法,根据初始状态和状态转移概率矩阵,预测未来可能出现的各种状态的概率。将 Markov 模型用于土地利用需求数量预测,弥补 PLUS 模型在数量预测方面的不足。时刻 n 的转移概率 P_{ij} 表示为:

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

$$S_{i+1} = P_{ij} \times S_i \quad (3)$$

式中: P_{ij} 表示土地利用类型 i 转换为土地利用类型 j 的转移概率; n 为土地利用类型数量; S_i, S_{i+1} 分别为

t 和 $t+1$ 时刻土地利用类型的状态。

2.2.3 基于 CARS 的土地利用空间模拟 CARS 模块在传统 CA 模型的基础上,集成了多类型随机斑块种子生成机制和轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制。通过自适应系数、邻域权重和扩张概率计算土地利用总体转换概率,使用蒙特卡罗方法在每种土地利用类型的生长概率面生成“种子”,通过轮盘赌选择机制和阈值递减系数确定像元转变的类型,多次迭代直至达到数量需求^[23]。计算土地利用类型 k 的总体转换概率 $OP_{i,k}^{d=1,t}$ 的公式表示为:

$$OP_{i,k}^{d=1,t} = P_{i,k}^d \times \Omega_{i,k}^t \times D_k^t \quad (4)$$

式中: $P_{i,k}^d$ 表示第 i 个单元土地利用类型 k 的增长概率; $\Omega_{i,k}^t$ 表示单元格 i 的邻域效应; D_k^t 表示未来土地利用类型 k 需求的影响,是一个自适应驱动系数,取决于迭代 t 次时的当前土地数量与土地利用的目标需求 k 之间的差距。

2.2.4 土地利用情景设计 土地利用情景设计通过调整邻域权重、土地利用过渡矩阵和转换限制区,设定了在不同政策背景下土地利用变化的竞争条件和转换约束^[24-25]。在多情景模拟中,邻域权重的变化影响土地利用类型的总体转换概率,过渡矩阵可以限制部分地类之间发生转移,转换限制区可以禁止设定范围内的土地发生任何变化。本文借鉴了国土空间总体规划、“十四五”发展规划、耕地“非农化”政策和“退耕还林还草”工程等,基于规划和政策背景,设计了自然增长、生态优先、耕地保护和可持续发展 4 种不同的土地利用情景。表 2 和表 3 展示了邻域权重和土

地利用过渡矩阵的设置。

(1) 自然增长情景。此情景假设土地利用变化遵循历史趋势,不受特定规划政策的直接影响。此情景下的邻域权重基于历史土地利用扩张数据得出,土地利用过渡矩阵不考虑外部干预,不设置转换限制区^[26]。

(2) 生态优先情景。依据《科尔沁左翼后旗国土空间总体规划(2021—2035 年)》,该情景强调生态保护的重要性,要求优先考虑生态安全和绿色发展。此情景下要严守生态保护红线,逐步扩大生态空间,强化水源涵养,构筑稳定优质的生态安全屏障。禁止将林地、草地转换为耕地、园地和其他用地。在邻域权重中,将林地的权重增加 60%,草地、水域的权重增加 20%,园地、其他用地与城乡、道路和工矿用地的权重减少 30%。将生态保护红线范围内设为转换限制区。

(3) 耕地保护情景。该情景致力于保障国家粮食安全,坚决制止耕地“非农化”“非粮化”行为,加强农用地转出的管制,确保耕地面积不减,大力发展农业,推动地区经济发展,确保耕地得到有效保护。此情景下禁止耕地转出,将永久基本农田设置为转换限制区,耕地的邻域权重增加 60%。

(4) 可持续发展情景。依据通辽市“十四五”规划的目标,科左后旗要打造“通辽黄玉米”和“科尔沁牛”产业链,加快农牧业综合发展,合理布局农牧、生态、城镇空间^[27]。该情景将生态保护红线、永久基本农田、城市建成区设置为转换限制区。在邻域权重中,将耕地、草地的权重减少 20%,林地与城乡、道路和工矿用地的权重增加 40%,以促进农业生产结构的优化和绿色高质量发展^[28]。

表 2 4 种模拟情景的邻域权重
Table 2 Neighborhood weights of 4 simulation scenarios

类别	耕地	园地	林地	草地	水域	其他用地	城乡、道路和 工矿用地
自然增长情景	0.4272	0.0006	0.2911	0.1539	0.0241	0.0383	0.0649
生态优先情景	0.3623	0.0003	0.3950	0.1566	0.0245	0.0227	0.0385
耕地保护情景	0.5442	0.0004	0.2317	0.1225	0.0192	0.0304	0.0516
可持续发展情景	0.3331	0.0006	0.3971	0.1200	0.0234	0.0373	0.0885

表 3 4 种模拟情景的土地利用过渡矩阵
Table 3 Land use transition matrix of 4 simulation scenarios

类别	自然增长情景							生态优先情景							耕地保护情景							可持续发展情景						
	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
c	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
d	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
e	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	
f	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	
g	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	

注:a, b, c, d, e, f, g 依次为耕地、园地、林地、草地、水域、其他用地与城乡、道路和工矿用地;表格中 1 代表可以转移,0 代表不可转移。

2.3 模型精度验证

将 2020 年土地利用空间格局与实际土地利用情况进行对比,以验证模型的精度(图 2)。Kappa 系数和总体精度的值越接近 1,模拟精度越好,当 Kappa 系数大于 0.8 时,表明模型的模拟精度在统计学意义上达到较好的满意状态^[29]。模拟结果的 Kappa 系数和总体精度分别为 0.87,0.92。空间上,2020 年土地利用实际情况与模拟结果的空间格局具有高度相似性,主要表现为耕地和草地在东西方向上交错分布的格局。从表 4 可以看出,耕地、林地、草地的用户精度均在 0.9 以上,生产者精度达到 0.8 以上,农牧交错带主要的 3 类土地利用类型表现出较高的模型精度。

APE-PLUS 方法在研究区域具有较好的适用性,模拟精度达到较高水平,可以满足研究需要。

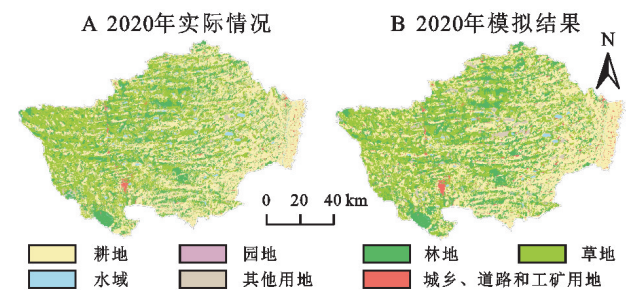


图 2 2020 年科左后旗土地利用实际情况与模拟结果
Fig. 2 Actual situation and simulation results of land use in Horqin Left Back Banner

表 4 科左后旗土地利用模拟的用户精度和生产者精度

Table 4 User's accuracy and producer's accuracy for land use simulation of the Horqin Left Back Banner

类别	耕地	园地	林地	草地	水域	其他用地	城乡、道路和工矿用地
用户精度	0.91	1.00	0.94	0.96	0.96	0.97	0.77
生产者精度	0.97	0.47	0.92	0.82	0.66	0.71	0.45

注: 用户精度表示从分类结果中任取一个随机样本, 其所具有的类型与地面实际类型相同的条件概率; 生产者精度表示相对于检验数据中的任意一个随机样本, 分类图上的统一地点的分类结果与其相一致的条件概率。

3 结果与分析

3.1 2014—2020 年土地利用时空变化

2014—2020 年科左后旗的土地利用发生了显著的时空变化, 耕地、林地和草地这 3 种主要的土地利用类型共占据了全旗总面积的 85% 以上。从表 5 可以看出, 耕地面积显著增加, 由 2014 年的 22.13% 上升至 2020 年的 38.98%, 成为了面积最大的土地利用类型。草地面积

从 52.03% 下降到 31.14%, 林地面积从 15.59% 增加到 22.45%。土地利用转移矩阵中, 5 535.96 km² 的土地发生了转移, 占全旗总面积的 47.85%。草地转耕地、草地转林地、林地转耕地是科左后旗最主要的 3 种土地利用转移路径, 耕地、林地、草地之间的转移占土地利用转移总面积的 73.19%。科左后旗共有 1 695.06 km² 的土地由草地转为耕地, 占科左后旗总面积的 14.65%, 占土地利用转移总量的 30.62%。

表 5 2014—2020 年科左后旗土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix of Horqin Left Back Banner from 2014 to 2020

km²

2014 年	2020 年							转出面积
	耕地	园地	林地	草地	水域	其他用地	城乡、道路和工矿用地	
耕地	2047.21	1.00	272.06	100.58	33.81	4.10	83.23	494.78
园地	0.29	0	0.08	0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.44
林地	510.15	1.22	931.80	282.12	7.60	12.33	42.95	856.37
草地	1695.06	0.71	1192.03	2714.28	70.21	204.57	96.23	3258.81
水域	23.30	0	6.11	21.50	73.66	0.78	2.15	53.84
其他用地	95.47	0.02	138.99	420.48	25.96	65.15	10.09	691.01
城乡、道路和工矿用地	98.12	0.29	36.23	40.50	2.29	3.28	110.02	180.71
转入面积	2422.39	3.24	1645.5	865.19	139.87	225.06	234.71	5535.96

2014—2020 年间, 耕地面积增加 1 927.61 km², 草地面积减少 2 393.62 km², 林地面积增加 789.13 km²。对比 2014 年和 2020 年土地利用(图 3), 2014 年草地集中分布在西部和中部, 耕地分布于东部边界, 东西辽河交汇的洪积平原内最为集中, 林地主要集中分布在西南部的大青沟自然保护区和中部地区。2020 年, 耕

地向西扩张, 与草地形成了东西向条带状的交错分布, 增加了土地破碎化的程度, 中部林地基于 2014 年的基础上面积扩张。此外, 其他用地规模缩减, 尤其是北部地区, 大量的其他用地被林地和草地取代。园地、水域与城乡、道路和工矿用地的规模较小, 在面积和空间分布上没有发生明显改变。

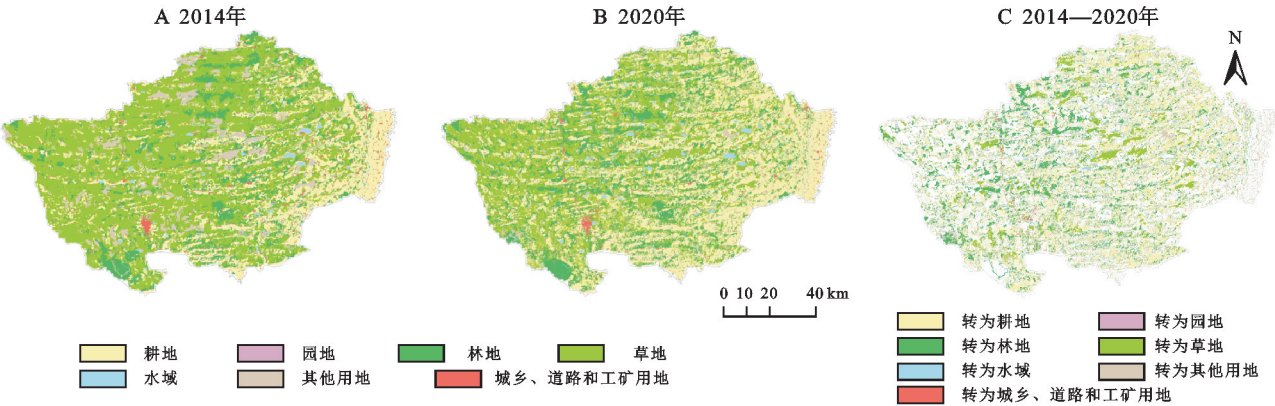


图 3 2014 年和 2020 年科左后旗土地利用分布与转移

Fig. 3 Land use distribution and transition in Horqin Left Back Banner in 2014 and 2020

3.2 土地利用变化驱动力分析

在科左后旗的土地利用模拟中,我们关注了耕地、林地和草地这 3 种主要土地类型的变化。耕地的增长概率最高,集中在较低高程、年均降水量较高以及接近水源的区域。对于林地而言,其增长概率在高程较高、年均降水量和地下水埋深较低的地区较为显著。草地的增长概率整体低于耕地和林地,主要集中在中等高程和较低年均降水量的区域。

图 4 的土地增长概率图显示,DEM 对耕地、林地和草地增长概率的影响显著,因子贡献度均在 0.1 以上,较低的高程更适宜耕地的扩张,较高的高程更有利于林地的生长,草地则主要在中等高程区域表现出较高的增长概率。到开放水面距离对所有土地利用类型均为重要的驱动因子,其贡献度均超过 0.1。接近水源的地区对耕地和草地的生长尤为有利,突显了水资源的可利用性对这些土地利用类型至关重要。

地下水埋深对于林地和草地的影响也较为显著,贡献度约为 0.1,表明林地和草地对地下水埋深的依赖性相对较高。年均降水量作为关键的环境因素,在 3 种地类的贡献度中均在 0.1 上下,直接影响植被的生长和水土保持,较高的降水量有利于耕地的扩张,而草地在适中的降水量条件下扩张最为显著。此外,土壤厚度较大的区域更适宜耕地的开垦,因为厚土通常具有更高的肥力和更好的水分保持能力。夜间灯光、人口、GDP 作为社会经济因素,贡献度综合较低,表明社会经济因子对科左后旗土地利用变化的影响较小。这可能是因为农牧交错带作为经济欠发达地区,其土地利用模式与人群聚集地和经济发达区无明显的相关性,主要受自然条件和资源特征的驱动。分析表明,DEM 和水资源相关因素(到开放水面距离、年均降水量、地下水埋深)是影响科左后旗土地利用类型当前分布和未来变化趋势的关键因素。

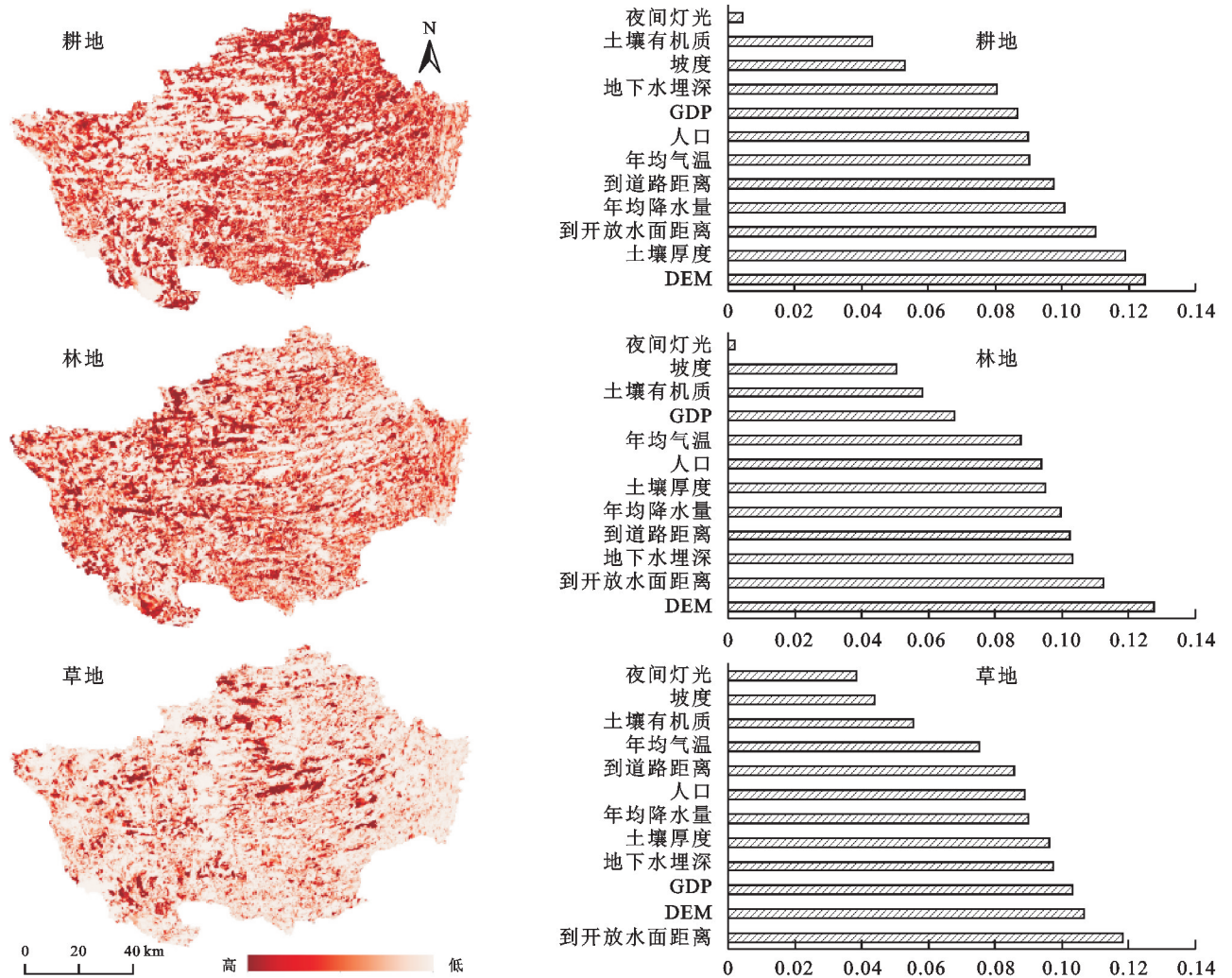


图 4 主要土地利用类型的增长概率与驱动因子贡献度

Fig. 4 The growth probability and driving factor contribution of main land use types

3.3 2032 年土地利用多情景模拟

以 2020 年作为基础年,4 种预测情景下的各种土地

利用类型的变化幅度和空间格局显示了显著的差异性,主要体现在耕地和草地的分布范围和面积变化。表 6

展示了科左后旗 4 种情景下地类的数量变化。

自然增长情景下,预测基于 2014—2020 年的历史扩张数据,未考虑任何直接的政策干预,延续了耕地急速扩张和草地迅速缩减的趋势。耕地面积增长 32.67%,占据 2032 年总面积的一半以上,形成了耕

地包围草地和林地的空间分布模式,东部地区耕地更加集中(图 5)。草地减少了 45.73%,仅占 2032 年总面积的 17%。水域面积减少了 34.94%。高强度的耕地开垦活动和生态空间的缩减也促使了其他用地的反扑,面积增加了 70.54%。

表 6 4 种情景下科左后旗土地利用类型像元数量

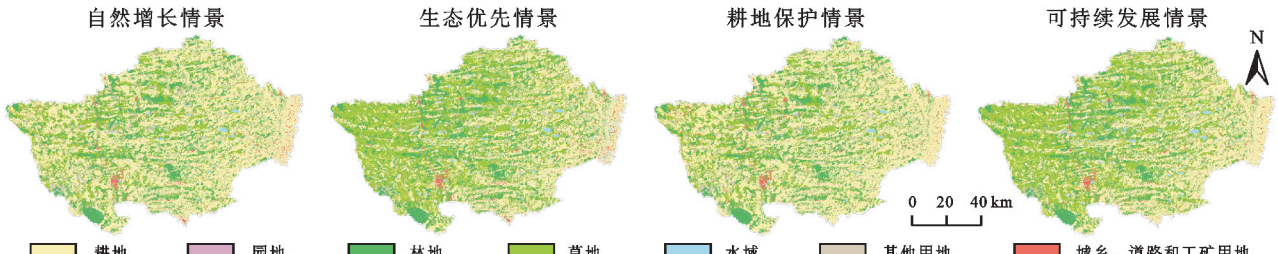
Table 6 Pixel quantity of each land use type in Horqin Left Back Banner under 4 scenarios									
类别	2020 年	自然增长情景		生态优先情景		耕地保护情景		可持续发展情景	
	数量	数量	变化率/%	数量	变化率/%	数量	变化率/%	数量	变化率/%
耕地	4824027	6390595	32.47	4587290	-4.91	6457387	33.86	4887446	1.31
园地	3473	1761	-49.29	2740	-21.11	1110	-68.04	2363	-31.96
林地	2790334	2768959	-0.77	2958779	6.04	2768959	-0.77	2768959	-0.77
草地	3928753	2132329	-45.73	3875883	-1.35	2132329	-45.73	3861328	-1.72
水域	228893	148913	-34.94	286132	25.01	120843	-47.21	286132	25.01
其他用地	306940	523443	70.54	255126	-16.88	485372	58.13	219772	-28.40
城乡、道路和工矿用地	386344	502764	30.13	502764	30.13	502764	30.13	502764	30.13

自然增长情景

生态优先情景

耕地保护情景

可持续发展情景



0 20 40 km

耕地 园地 林地 草地 水域 其他用地 城乡、道路和工矿用地

图 5 2032 年 4 种情景科左后旗土地利用模拟结果

Fig. 5 Simulation results of land use in Horqin Left Back Banner under 4 scenarios in 2032

生态优先情景下,探讨生态文明建设框架下绿色发展与生态保护措施对科左后旗土地利用格局的潜在影响,设定一套严格的生态保护政策,包括严守生态保护红线、保护水资源、扩大生态空间等。耕地和草地面积分别减少了 4.91%和 1.35%,耕地面积仍然占据最大比重,与草地的空间分布保持了东西向条带状交错分布模式。林地和水域面积分别增加了 6.04%和 25.01%,其他用地面积减少 16.88%,生态空间显著扩大。

耕地保护情景下,严格抵制耕地“非农化”“非粮化”行为,保障国家粮食安全,实施耕地面积“占补平衡”。耕地面积增加了 33.86%,草地面积缩减了 45.73%,呈现耕地快速向西扩张挤占草地的趋势。2032 年耕地分布覆盖整个科左后旗,空间分布更加集中,草地范围向西缩小,破碎化程度提高。林地面积减少 0.77%,水域面积缩减了 47.21%,其他用地面积增长了 58.13%,水资源和生态环境面临着严峻的挑战。

可持续发展情景下,秉承着绿色高质量发展的原则,构建了一个既能够保障农牧业经济基础,又能促进生态环境安全的土地利用战略框架。耕地的面积增长了 1.31%,体现了保障粮食安全的基本要求。林地

和草地面积小幅度减少,分别下降了 0.77%和 1.72%,保持了土地利用的多样性和生态空间的完整性,同时有效整合了原有的破碎化土地结构。水域面积增加了 25.01%。其他用地的面积减少了 28.4%,城乡、道路和工矿用地仍然保持稳健的增长态势。

3.4 4 种模拟情景对比分析

在科左后旗的土地利用模拟研究中,对自然增长、生态优先、耕地保护和可持续发展 4 种情景进行了详细分析。在自然增长情景下,土地利用变化遵循历史趋势,耕地持续侵占草地,加剧了土壤沙化和水土流失,畜牧业的经济支柱地位被削弱,玉米种植业成为首要的经济来源,伴随着生态系统的严重破坏,构成了生态退化最严重的情景。这提示了科左后旗未来需要加强政策干预和规划引导,以避免生态系统遭受不可逆转的损害。在生态优先情景下,通过转换分散的耕地和草地为林地,增加了生态空间的面积,改善地区生态环境,但同时减少了农牧空间,限制了传统农牧业的发展,对经济发展造成制约,构成了生态恢复最好的情景。这提示了在强化生态保护措施指导下,科左后旗可以实现耕地和草地的持续性发展和生态文明的扩张,但可能对经济发展产生负面影

响,难以满足当地居民对提高生活水平的期望。在耕地保护情景下,耕地扩张趋势最显著,伴随着水域面积的大幅缩小和耕地开垦活动的加剧,构成了耕地扩张最剧烈的情景。科左后旗肥沃的表层土壤下为第四纪松散沉积物,沉积物在短期耕作后暴露,导致土壤肥力下降和耕地荒废,过度发展的高耗水农业活动严重威胁了水资源安全,不利于地区的长期可持续发展。在可持续发展情景下,耕地面积适度增长,与农牧空间稳定共存,保障了耕地面积不减的政策要求,提供了充足的生态空间和良好的水资源涵养能力,是最有利于地区长期可持续发展的方案。该情景巩固了早期农业快速扩张后的发展优势,遏制牧业萎缩趋势,有效控制水土流失和土壤“三化”问题,保障了农牧业未来的持续发展。因此,可持续发展情景下的土地利用策略最合理,是科左后旗实现绿色协调发展的理想模式,可以为未来的发展提供政策参考与指导。

实施可持续发展战略需要先理解科左后旗土地利用的核心矛盾与成因。农牧交错带的发展矛盾主要聚焦于种植业与畜牧业之间的竞争,受到经济、气候、政策等多种因素的影响。经济因素居于核心地位,耕地的生产效益远超草地,农户在经济利益的驱使下开垦荒地、侵占草地。而全球气候变暖引起的农耕地北移、强农惠农政策的推行、中原农耕文化对草原游牧文化的挤压,也是导致种植业与畜牧业之间矛盾的重要因素。

要推行可持续发展战略,首要任务是重新界定种植业与畜牧业的关系,转化竞争关系为合作关系。种植业可以为畜牧业提供必要的饲料,畜牧业为种植业提供有机肥料,构建以畜牧业为核心的农牧业循环发展体系。此外,要优化调整农牧业生产结构,推广马铃薯、中药材、杂粮等节水型高效作物,调整牧草地的内部结构,用高产高效的人工牧草地取代问题频发的天然牧草地。还应支持少数民族特色的文化畜牧业发展,并实施“退耕还林还草”等生态修复工程,构建绿色稳定的生态空间。

4 讨论

本研究中构建的农牧交错带土地利用模拟方法(APE-PLUS)集成了 LEAS, CARS, Markov 模型和土地利用情景设计的功能,针对性解决了农牧交错带地区模拟的复杂性,CARS 的随机斑块种子播种机制准确模拟了地类复杂多样的土地利用空间演变。相比于已有的研究结果,APE-PLUS 方法在处理零星地块繁多的农牧交错带地区时展现了更高的精度和适应性^[30]。

在科左后旗的应用中,APE-PLUS 方法展现了

较高的模拟精度,验证了方法在实际应用中的高效性和可靠性。该方法预测了特定政策背景下土地利用的合理分布,研究结果可以为科左后旗及农牧交错带区域的土地空间规划和政策制定提供重要的数据支撑和决策依据。但研究仍存在以下局限性。

(1) 模型的因子虽然广泛涵盖了地形地貌、水资源等因素,却未能充分考虑气候变化的直接影响,未来研究将考虑纳入多维的气候模型数据,以提高模型的预测能力和适应性;

(2) 本研究使用的土地利用数据来源于全国第二次和第三次土地调查,相较遥感数据,提供了更高精度和更真实的土地利用信息。但二调和三调在土地分类的标准和技术手段上存在不一致。未来研究应关注如何解决多次土地调查数据之间的差异,并探索有效的方法集成土地利用调查数据与遥感数据,以确保数据之间的一致性和整体分析的准确性。

5 结论

(1) APE-PLUS 方法对科左后旗的土地利用变化具有较高的模拟精度。经过验证,APE-PLUS 的 Kappa 系数为 0.87,总体精度为 0.92,方法可操作性强,可为农牧交错带土地利用模拟提供重要工具。

(2) 科左后旗的耕地、草地、林地占土地总面积的 85%以上。2014—2020 年间,科左后旗土地利用变化显著,全旗 47.85%的土地类型发生了改变,14.65%的土地由耕地转变为了草地,形成了草地和耕地东西向条带状交错分布的空间格局。科左后旗土地利用变化的主要驱动力是到 DEM 和 3 个水资源相关因素(开放水面距离、年均降水量和地下水埋深),因子贡献度均为 0.1 左右。

(3) 利用 APE-PLUS 方法得到 2032 年科左后旗 4 种情景下的模拟结果,各情景下耕地、草地的数量和空间分布均有较大差异。其中,可持续发展情景下耕地面积增长 1.31%,林地和草地分别下降 0.77%和 1.72%,牧业空间保持稳定,生态空间扩张,其他用地面积减小了 28.4%,水域面积增加了 25.01%。此情景下,土地利用数量结构和空间布局相对合理,巩固了农业扩张后的发展优势,保护区域生态环境,为农牧交错带地区生态与经济的协调发展提供了理想模式。

参考文献(References):

- [1] Veldkamp A, Lambin E. F. Predicting land-use change [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001,85 (1/3):1-6.
- [2] Cegielska K, Noszczyk T, Kukulska A, et al. Land use and land cover changes in post-socialist countries: some

- observations from Hungary and Poland[J]. Land Use Policy, 2018,78:1-18.
- [3] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947-3958.
- Chen L T, Cai H S, Zhang T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10):3947-3958.
- [4] 张浚茂,臧传富.东南诸河流域 1990—2015 年土地利用时空变化特征及驱动机制[J].生态学报,2019,39(24):9339-9350.
- Zhang J M, Zang C F. Spatial and temporal variability characteristics and driving mechanisms of land use in the Southeastern River Basin from 1990 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(24):9339-9350.
- [5] 李世锋,洪增林,薛旭平,等.基于 Logistic-CA-Markov 耦合模型的彬州市 LUCC 多情景模拟[J].水土保持研究,2022,29(4):292-299.
- Li S F, Hong Z L, Xue X P, et al. Multi-scenario simulation of LUCC in Binzhou city based on Logistic-CA-Markov coupling model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):292-299.
- [6] 张津,朱文博,吴舒尧,等.基于 CLUE-S 模型的京津冀城市群土地利用变化时空模拟[J].北京大学学报:自然科学版,2018,54(1):115-124.
- Zhang J, Zhu W B, Wu S Y, et al. Simulation of temporal and special land use changes in Jing-Jin-Ji urban agglomeration using CLUE-S model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018,54(1):115-124.
- [7] 王明常,郭鑫,王凤艳,等.基于 FLUS 的长春市土地利用动态变化与预测分析[J].吉林大学学报:地球科学版,2019,49(6):1795-1804.
- Wang M C, Guo X, Wang F Y, et al. Dynamic change and predictive analysis of land use types in Changchun city based on FLUS model[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2019,49(6):1795-1804.
- [8] 张晓荣,李爱农,南希,等.基于 FLUS 模型和 SD 模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟[J].地球信息科学学报,2020,22(12):2393-2409.
- Zhang X R, Li A N, Nan X, et al. Multi-scenario simulation of land use change along China-Pakistan economic corridor through coupling FLUS model with SD model [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020,22(12):2393-2409.
- [9] Halmy M W A, Gessler P E, Hicke J A, et al. Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA [J]. Applied Geography, 2015,63:101-112.
- [10] 张永民,赵士洞, P. H. Verburg. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J].自然资源学报,2003,18(3):310-318.
- Zhang Y M, Zhao S D, P. H. Verburg. CLUE-S and its application for simulating temporal and spatial change of land use in Naiman Banner[J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(3):310-318.
- [11] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021,85:101569.
- [12] 王子尧,黄楚梨,李惊,等.耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2022,42(14):5789-5798.
- Wang Z Y, Huang C L, Li L, et al. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with Invest-HFI-Plus model: a case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(14):5789-5798.
- [13] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.
- Lin T, Yang M Z, Wu D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: a case study in Guangdong Province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10):4827-4839.
- [14] 崔旺来,蔡莉,奚恒辉,等.基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(6):2136-2148.
- Cui W L, Cai L, Xi H H, et al. Ecological security assessment and multi-scenario simulation analysis of Zhejiang Greater Bay Area based on LUCC[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2136-2148.
- [15] 张世伟,魏璐瑶,金星星,等.基于 FLUS-UGB 的县域土地利用模拟及城镇开发边界划定研究[J].地球信息科学学报,2020,22(9):1848-1859.
- Zhang S W, Wei L Y, Jin X X, et al. The land use simulation and delimitation of urban development boundary in county area based on FLUS-UGB[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020,22(9):1848-1859.
- [16] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等.北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J].地球科学进展,2002,17(5):739-747.
- Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, et al. Boundary line on agro-pasture zigzag zone in North China and its problems on eco-environment[J]. Advance in Earth Sciences, 2002,17(5):739-747.

- [17] 樊嘉琦,徐艳,陈伟强.1992 年以来科尔沁沙地土地利用变化分析:以科尔沁左翼后旗为例[J].中国农业大学学报,2018,23(2):115-125.
Fan J Q, Xu Y, Chen W Q. Analyze of the land use change in Horqin Sandy Land since 1992: a case study of Horqin Zuoyihou[J]. Journal of China Agricultural University, 2018,23(2):115-125.
- [18] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series(2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J]. Earth System Science Data, 2021,13(3):889-906.
- [19] 欧阳晓,贺清云,朱翔.多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以长株潭城市群为例[J].经济地理,2020,40(1):93-102.
Ouyang X, He Q Y, Zhu X. Simulation of impacts of urban agglomeration land use change on ecosystem services value under multi-scenarios: case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2020,40(1):93-102.
- [20] 孙定钊,梁友嘉.基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟[J].地球信息科学学报,2021,23(5):825-836.
Sun D Z, Liang Y J. Multi-scenario simulation of land use dynamic in the Loess Plateau using an improved Markov-CA model[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021,23(5):825-836.
- [21] Luan C X, Liu R Z, Sun J, et al. An improved future land-use simulation model with dynamically nested ecological spatial constraints[J]. Remote Sensing, 2023,15(11):2921.
- [22] 胡信熹,勒先文,王卫林,等.基于 PLUS-InVEST 模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测[J].环境科学,2024,45(6):3284-3296.
Hu J X, Le X W, Wang W L, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiangxi Province based on PLUS-InVEST model[J]. Environmental Science, 2024,45(6):3284-3296.
- [23] 付帅,彭雨欣,徐炳先.基于 PLUS 与 InVEST 模型的鄱阳湖流域碳储量时空变化与预测[J].环境工程,2023,41(10):163-172.
Fu S, Peng Y X, Xu B X. Spatial and temporal evolution of carbon storage in Poyang Lake basin based on PLUS and InVEST model[J]. Environmental Engineering, 2023,41(10):163-172.
- [24] 张晓瑶,张潇,李冬花,等.城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟:以深圳市为例[J].生态学报,2022,42(6):2086-2097.
Zhang X Y, Zhang X, Li D H, et al. Multi-scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2086-2097.
- [25] Lou Y Y, Yang D, Zhang P Y, et al. Multi-scenario simulation of land use changes with ecosystem service value in the Yellow River Basin[J]. Land, 2022,11(7):992.
- [26] 许小娟,刘会玉,林振山,等.基于 CA-MARKOV 模型的江苏沿海土地利用变化情景分析[J].水土保持研究,2017,24(1):213-218,225.
Xu X J, Liu H Y, Lin Z S, et al. Scenario analysis of land use change in Jiangsu coast based on CA-Markov model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(1):213-218,225.
- [27] Ma L, Long H L, Tu S S, et al. Farmland transition in China and its policy implications[J]. Land Use Policy, 2020,92:104470.
- [28] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].地理学报,2019,74(3):446-459.
Zhu W B, Zhang J J, Cui Y P, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: a case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(3):446-459.
- [29] 刘强,杨众养,陈毅青,等.基于 CA-Markov 多情景模拟的海南岛土地利用变化及其生态环境效应[J].生态环境学报,2021,30(7):1522-1531.
Liu Q, Yang Z Y, Chen Y Q, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its Eco-environmental effect in Hainan Island based on CA-Markov model[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(7):1522-1531.
- [30] 杨露,颜耀文,宗乐丽,等.基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J].地球信息科学学报,2020,22(3):568-579.
Yang L, Xie Y W, Zong L L, et al. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model of agro-pastoral ecotone in Northwest China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020,22(3):568-579.