

基于 CLUE - S 情景模拟的挠力河流域耕地适宜性评价研究

李 衡 陈国银 王世晶 张 震 张志伟 靳焕焕
(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 以挠力河流域为研究区,选择 2000、2010、2020 年 3 期土地利用数据,从土地利用动态度和转移矩阵两方面分析土地利用时空变化,运用 CLUE - S 模型对研究区 2030 年土地利用变化格局进行模拟验证,设基线、农业发展和生态保护 3 种情景预测 2030 年土地利用变化格局,最后对 3 种情景下耕地适宜性进行评价。结果表明:研究区土地利用类型以耕地为主,2000—2020 年森林、湿地、水体和人造地表呈增加趋势,耕地和草地呈减少趋势。2000—2020 年土地利用转移主要发生在耕地、草地和森林之间,2000—2010 年草地面积转入最多,耕地次之,森林最少,转出面积相反;2010—2020 年森林转入转出面积最多,草地次之,耕地最少。CLUE - S 模型对挠力河流域土地利用变化具有良好的模拟能力,Kappa 系数为 0.894,模拟总体精度为 91.18%;基线情景下耕地、草地和水体地类面积减少,其他地类面积增加;农业发展情景下耕地面积增加 23.68%,人造地表面积未发生变化,其他地类面积均较少;生态保护情景下与农业发展情景正好相反。依评价指标体系和评价模型,分析计算出 3 种情景下耕地位于适宜区的面积占研究区总面积的 96% 以上,不适宜区占比低于 4%。研究结果可为加强未来耕地质量建设与管理、落实耕地保护目标和科学管理土地资源提供科学决策。

关键词: 耕地适宜性评价; CLUE - S 模型; 转移矩阵; 土地利用变化; 挠力河流域

中图分类号: F301.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0329-11 OSID: 

Suitability Evaluation of Cultivated Land in Naoli River Basin Based on CLUE - S Scenario Simulation

LI Heng CHEN Guoyin WANG Shijing ZHANG Zhen ZHANG Zhiwei JIN Huanhuan
(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Taking the Naoli River basin as the research area, three periods of land use data from 2000, 2010 and 2020 were selected to analyze the spatiotemporal changes of land use from two aspects: land use dynamics and transfer matrix. The CLUE - S model was used to simulate and verify the land use change pattern in the study area in 2030. Three scenarios, namely baseline, agricultural development, and ecological protection, were used to predict the land use change pattern in 2030. Finally, the adaptability of cultivated land under these three scenarios was evaluated. The results indicated that the land use type in the study area was mainly cultivated land. From 2000 to 2020, forests, wetlands, water bodies and artificial surfaces showed an increasing trend, while cultivated land and grassland showed a decreasing trend. From 2000 to 2020, land use transfer mainly occurred between cultivated land, grassland and forests. From 2000 to 2010, the grassland area transferred most, followed by cultivated land and forests, with the opposite area transferred out. From 2010 to 2020, the area of forest transfer in and out was the highest, followed by grassland and cultivated land. The CLUE - S model had good simulation ability for land use change in the Naoli River basin, with Kappa coefficient of 0.894 and overall simulation accuracy of 91.18%. Under the baseline scenario, the area of cultivated land, grassland and water bodies was decreased, while the area of other land types was increased. In the context of agricultural development, the area of cultivated land was increased by 23.68%, and the artificial surface area was not changed, while the area of other land types was relatively small. The ecological protection scenario was exactly the opposite to the agricultural development scenario. According to the evaluation index system and the evaluation model, it was calculated that the cultivated land located in the suitable area

accounted for more than 96% of the total area, and the unsuitable area accounted for less than 4%. The results can provide scientific decision-making for cultivated land quality construction and management in the future.

Key words: cultivated land suitability evaluation; CLUE – S model; transfer matrix; land use change; Naoli River basin

0 引言

近年来,随着经济的快速发展和城镇化进程的加快,土地利用/覆被变化(Land use and cover change,LUCC)成为了全球气候与环境变化研究的热点问题。其中,2020 年中国城镇化率达到 63.89%,预计在 2030 年将达到 70%^[1]。城镇化率的提高和土地利用的变化将大量的耕地、草地等转变为建设用地,这一过程将会产生社会、资源和环境问题,为此,减少此类问题的发生已显得刻不容缓。当前,国内外学者针对土地利用/覆被变化的研究主要集中在 LUCC 驱动机制和演变过程^[2]、土地利用变化的生态风险及优化^[3]、LUCC 的可持续性和生态效益评估以及 LUCC 模型与未来变化模拟^[4-5]、土地利用变化带来的碳排放时空差异和作用机理^[6]等方面。然而 LUCC 研究的一个重要方向是未来土地利用变化的模拟,其中比较成熟的模型包括系统动力学模型^[7]、Markov 模型^[8]、CA 及改进模型^[9-12]、智能体模型(ABM)^[13]、FLUS 模型^[14]、PLUS 模型、CLUE 模型^[15]以及在其基础上改进的 CLUE – S (Conversion of land use and its effects at small regional extent) 模型^[9,16-18]等。而 CLUE – S 模型适用于小范围内土地利用空间数量和空间位置变化的模拟与预测,且能够对土地利用变化与其社会、经济和自然等驱动因子相互关系进行定量分析,应用较广泛^[19]。

挠力河流域作为三江平原主要的粮食产区和国家重要商品粮基地,地理位置优越,在受到自然环境和经济社会双重影响下土地利用类型发生变化,势必会造成土地利用适宜与不适宜,因此,研究该地区历史年份地类时空变化、模拟未来年份地类变化格局和地类适宜性至关重要。

本文以挠力河流域作为研究区,利用挠力河流域 2000、2010、2020 年 3 期土地利用数据,从土地利用动态指数和土地利用转移矩阵两方面分析历史时期土地利用时空变化,利用二元逻辑回归模型选取高程、坡度和坡向等 15 个驱动因子,运用 CLUE – S 模型对挠力河流域 2020 年土地利用时空变化进行模拟验证,在此基础上设置基线情景、农业发展情景和生态保护情景预测 2030 年研究区土地利用空间变化并对各情景下耕地适宜性进行评价,从而为

加强未来耕地质量建设与管理、落实耕地保护目标和科学管理土地资源提供可持续发展的科学决策。

1 研究区概况

挠力河流域位于黑龙江省三江平原腹地,地理范围为 45°42' ~ 47°31'N、131°10' ~ 134°09'E,行政区划包括富锦市、饶河县、七台河市、双鸭山市、集贤县、宝清县、友谊县以及建三江和红兴隆农垦分局部分地区,流域总面积为 $2.27 \times 10^4 \text{ km}^2$,占三江平原总面积的 1/4^[20],如图 1 所示。该流域地形主要以平原和丘陵为主,平原主要分布在流域的北部和中部的内、外七星河及挠力河中游地区,丘陵主要分布在流域的西南部和南部,地势上呈西南高、东北低的特点^[21]。挠力河流域建国以来经历了 4 次大规模的土地利用开发^[22],耕地面积持续上升,呈现出“三山一水六分田”的土地利用特点,耕地类型主要有旱地(玉米-小麦轮作)和水田(单季稻种植为主),水浇地面积极少,是三江平原主要的粮食产区和国家重要商品粮生产基地^[20-23]。

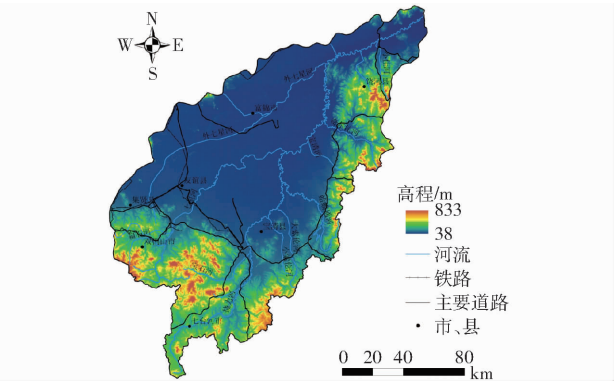


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic of study area

2 数据来源和处理

土地利用数据来源于国家基础地理信息中心,本文选取 2000、2010、2020 年 3 期数据,空间分辨率为 30 m (2000、2010 年数据总体精度为 83.50%, Kappa 系数为 0.78; 2020 年数据总体精度为 85.72%, Kappa 系数为 0.82)。该数据包括耕地、森林、草地、灌木林、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪 10 个土地利用类型,本文选取 6 个地类进行研究,数据说明见表 1。数字高程模型数

表 1 地类类型说明
Tab.1 Description of earth type

代码	类型	内容
10	耕地	用于种植农作物的土地,包括水田、灌溉旱地、雨养旱地、菜地、牧草种植地、大棚用地、以种植农作物为主间有果树及其他经济乔木的土地,以及茶园、咖啡园等灌木类经济作物种植地
20	森林	乔木覆盖且树冠盖度超过 30% 的土地,包括落叶阔叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、混交林,以及树冠盖度为 10% ~ 30% 的疏林地
30	草地	天然草本植被覆盖,且盖度大于 10% 的土地,包括草原、草甸、稀树草原、荒漠草原,以及城市人工草地等
50	湿地	位于陆地和水域的交界带,有浅层积水或土壤过湿的土地,多生长有沼生或湿生植物。包括内陆沼泽、湖泊沼泽、河流洪泛湿地、森林/灌木湿地、泥炭沼泽、红树林、盐沼等
60	水体	陆地范围液态水覆盖的区域,包括江河、湖泊、水库、坑塘等
80	人造地表	由人工建造活动形成的地表,包括城镇等各类居民地、工矿、交通设施等,不包括建设用地内部连片绿地和水体

据 (DEM) 来源于美国国家航空航天局 (NASA) 全球的全分辨率 30 m DEM 数据 (NASA DEM), 具有质量好、覆盖范围广等优点。人口密度、国内生产总值 (GDP)、中国水系矢量数据和中国道路数据均来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。土壤 pH 值数据和土壤剖面深度数据来源于国家青藏高原数据中心的土壤有机质数据集。

利用 ArcGIS 10.6 软件将栅格数据 (土地利用、DEM、人口密度、GDP、土壤剖面深度和土壤 pH 值) 经投影、重采样、重分类、掩膜提取得到挠力河流域 100 m × 100 m 的栅格图层, 土壤剖面深度和土壤 pH 值要进行 4 级量化处理; 将矢量数据 (道路、水系) 经投影、裁剪得到挠力河流域矢量图层。坡度、坡向栅格图层是由数字高程数据经空间分析—水文分析工具提取。各种道路距离是根据欧氏距离工具提取。根据 CLUE-S 模型需求, 制备的驱动因子可以分为自然因素因子 (DEM、坡度、坡向, 与河流距离, 与水系距离, 与乡道、县道、省道距离, 与城市一、二、三、四级道路距离, 与铁路距离) 和社会经济因素因子 (GDP、人口密度)。本文所用的地理数据投影统一采用 WGS_1984_Albers, 重采样后像元大小为 100 m × 100 m。

3 研究方法

3.1 土地利用动态度

选择单一土地利用动态度和综合土地利用动态度分析研究区土地利用变化的速率。

3.1.1 单一土地利用动态度

单一土地利用动态度表征研究区内某一地类演变的基本特征, 值越大, 表明该地类在研究期内变化越活跃, 值越小, 表明在研究期内变化越稳定, 计算公式为

$$K = \frac{S_b - S_a}{S_a} \cdot \frac{1}{T} \times 100\%$$

(1)

式中 K ——研究期单一土地利用动态度
 S_a ——研究期初期单一土地利用类型面积
 S_b ——研究期末期单一土地利用类型面积
 T ——研究时段

当 T 为年时, K 为研究区内土地利用类型年变化率。

3.1.2 综合土地利用动态度

综合土地利用动态度表征研究区内土地利用类型动态度演变的综合特征, 计算公式为

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n LU_i} \times 100\%$$

(2)

式中 L ——综合土地利用动态度
 LU_i ——研究初期第 i 类地类面积
 ΔLU_{i-j} ——研究开始至结束时段内第 i 类地类转为其他地类的面积绝对值
 n ——地类总数量

3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是 Markov 模型在土地利用/覆被变化研究中的应用。利用 Markov 模型可以定量描述土地利用面积增加来源和减少去向^[24]。转移矩阵数学表达式为^[25]

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

(3)

式中 A_{ij} ——地类面积
 $i、j$ ——研究初期和末期的地类类型

3.3 土地利用变化模拟与预测

CLUE-S 模型是通过自然因素和社会经济两类驱动因子相结合模拟土地利用变化及环境效应的模型。模型输入数据包括: 根据政策红线设置限制区域、转移规则、土地利用类型面积需求量和空间分析。

3.3.1 驱动因子的选取依据及处理

选取驱动因子时首先结合研究区实际情况,保证空间数据的可获取性以及数据像元大小、空间范围和空间坐标系的时空一致性,其次是选取的数据

可以实现空间量化表达,最后要全面考虑社会、经济和自然等因素,保证模拟精度的科学准确性。

结合研究区实际情况和驱动因子选取依据,本文选取 15 个驱动因子(表 2)。

表 2 驱动因子处理
Tab.2 Driving factor processing

因素属性	驱动因子	数据处理方法	因子代码
自然因素	高程	在 ArcGIS 10.6 中,用流域边界裁剪获取的 DEM 得到研究区 DEM,空间分辨率为 100 m	Sc1gr0. fil. asc
	坡度	利用 ArcGIS 10.6 对 DEM 进行坡度分析得到,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr1. fil. asc
	坡向	利用 ArcGIS 10.6 对 DEM 进行坡向分析得到,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr2. fil. asc
	与河流距离	将挠力河流域河流矢量图经过投影变换,利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr3. fil. asc
	与水系距离	将中国水系图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区水系图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr4. fil. asc
	与乡道距离	将中国道路乡道矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区乡道图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr5. fil. asc
	与县道距离	将中国道路县道矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区县道图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr6. fil. asc
	与省道距离	将中国道路省道矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区省道图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr7. fil. asc
	与铁路距离	将中国道路铁路矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区铁路图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr8. fil. asc
	与城市一级道路距离	将中国城市一级道路矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区城市一级道路图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr9. fil. asc
	与城市二级道路距离	将中国城市二级道路矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区城市二级道路图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr10. fil. asc
	与城市三级道路距离	将中国城市三级道路矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区城市三级道路图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr11. fil. asc
	与城市四级道路距离	将中国城市四级道路矢量图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区城市四级道路图,再利用欧氏距离分析而得,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr12. fil. asc
社会经济因素	人口密度	将 2015 年中国人口密度栅格图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区人口密度栅格图,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr13. fil. asc
	国内生产总值	将 2015 年中国国内生产总值栅格图经投影变换,用流域边界图裁剪得到研究区国内生产总值栅格图,像元大小、范围和空间参考与 DEM 数据一致	Sc1gr14. fil. asc

3.3.2 限制区域

由于研究区内有国家级自然保护区且都划分为人造地表用地,因此本文的限制区域为人造地表用地,即该地类不能转移为其他地类。

3.3.3 转移规则

土地利用转移规则有转移矩阵和转移弹性系数(ELAS)。转移矩阵用 1 表示可以发生转移,0 表示不发生转移,根据前文土地利用空间时空特征及研究区实际情况设定的土地利用类型转移矩阵如表 3 所示。转移弹性系数(ELAS)在 0~1 之间取值,值越大,表示该地类越稳定,不易转为其他地类。由于 CLUE-S 模型对参数非常敏感,设置时需要谨慎调节,本文根据研究区的实际情况、前人的相关研究以及在模型输入过程中反复调试,提高模拟精度,得出适合研究区各地类 3 种情景下(基线情景、农业发

表 3 土地利用类型转移矩阵
Tab.3 Transfer matrix of land use type

地类名称	耕地	森林	草地	湿地	水体	人造地表
耕地	1	1	1	1	1	1
森林	1	1	1	1	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
湿地	1	1	1	1	1	1
水体	1	1	1	1	1	1
人造地表	0	0	0	0	0	1

展情景和生态保护情景)ELAS 值(表 4)。

3.3.4 土地利用类型面积需求量和空间分析

假设土地利用变化幅度为线性变化,用 2010—2020 年现有土地利用数据借助线性内插,并通过趋势外推法得到 2030 年各地类面积需求量。空间分析中运用二元逻辑回归分析方法分析各地类空间分布与驱动因子之间的关系,比较受试者工作特征曲

表 4 土地利用转移弹性系数

Tab.4 Coefficient of elasticity of land use transfer (ELAS)

情景	耕地	森林	草地	湿地	水体	人造地表
基线情景	0.70	0.70	0.60	0.70	0.80	0.95
农业发展情景	0.95	0.60	0.55	0.60	0.80	1
生态保护情景	0.30	0.90	0.90	0.80	0.60	1

线 (Receiver operating characteristic, ROC), 选取最优尺度, 当 ROC 大于 0.7 时, 说明回归方程对各地类具有较好的解释力^[26], 计算式为

$$\lg \frac{p_i}{1-p_i} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \cdots + \beta_n X_{n,i} \quad (4)$$

式中 p_i ——每个栅格可能出现某种地类的概率
 $X_{1,i} \sim X_{n,i}$ ——与某种地类相关的驱动因子
 $\beta_0 \sim \beta_n$ ——驱动因子的回归系数

3.3.5 CLUE-S 模型空间模拟

模型的空间模拟是在空间分析模块中完成, 空间分析模块是整个 CLUE-S 模型的核心内容, 其分析由总的分配概率决定, 机制表述为

$$T_i = P_{i,u} + I_u + E_u \quad (5)$$

式中 T_i ——每个栅格适合于地类的总概率
 $P_{i,u}$ ——通过二元逻辑回归方程计算的空间分布概率
 I_u ——地类的迭代变量
 E_u ——根据转换规则设置的参数

3.3.6 CLUE-S 模型精度检验方法

将挠力河流域 2020 年土地利用变化模拟图和土地利用现状图进行对比分析验证模拟精度。本文利用地类模拟准确率和 Kappa 系数检验模拟结果。

(1) 地类模拟准确率

基于 ArcGIS 10.6 中的 Combine 功能, 将 2020 年土地利用变化模拟图和土地利用现状图进行比较, 将相同的栅格数除以 2020 年土地利用现状图栅

格数, 即为各地类模拟准确率。

(2) Kappa 系数

Kappa 系数是检验模拟精度的常用手段之一, 当 Kappa 系数大于 0.75 时, 模拟精度高; Kappa 系数为 0.4 ~ 0.75 时, 模拟精度一般; Kappa 系数为 0 ~ 0.4 时, 模拟精度差。

3.4 土地适宜性评价

土地适宜性评价是对某块土地对于某种用途是否适宜以及适宜程度, 做出等级评价。本文基于 ArcGIS 10.6 软件, 对上文 3 种情景下 2030 年耕地的适宜性进行评价, 评价结果能够为未来充分利用自然资源, 开发土地潜力, 实现作物高产, 优化作物种植布局 and 为国土空间规划提供决策支持。

通过查阅相关历史耕地适宜性评价文献以及研究区的实际发展情况, 根据影响研究区耕地适宜性的道路因素、地形因素、土壤因素和水利因素等以及选取评价因子时要遵循差异性原则、定性定量结合原则、可操作性原则和综合性原则^[27], 选取 8 个评价因子用于 2030 年耕地适宜性评价。研究区的地形因素选取 DEM、坡度和坡向作为评价因子, 交通便捷性因素选取与主要道路距离和与耕地距离作为评价因子, 环境适宜性因素选取与水体距离作为评价因子, 土壤因素选取土壤 pH 值、土壤剖面深度作为评价因子, 建立评价指标和评价模型, 根据 FAO 的《土地评价纲要》将研究区划分为高度适宜区、中度适宜区、勉强适宜区、暂时适宜区 4 个等级进行评价^[27-29]。

3.4.1 评价因子权重

确定权重的方法为层次分析法 (AHP), 数值越大权重越高。分析结果见表 5。

3.4.2 熵技术修正权重

利用熵技术对 AHP 确定的权重进行修正, 可以使指标体系更加优化。修正步骤详见文献 [30]。修正后权重见表 5。

表 5 AHP 层次分析结果
Tab.5 AHP analytic hierarchy process

评价因子	A	B	C	D	E	F	G	H
AHP 法权重	6.23	10.97	8.34	9.86	23.37	22.46	9.84	8.93
熵技术修正后权重	7.42	8.65	8.54	6.84	20.76	25.95	10.92	10.92

注: A 为 DEM 因子; B 为坡度因子; C 为坡向因子; D 为与耕地距离因子; E 为与水体距离因子; F 为与主要道路距离因子; G 为土壤 pH 值因子; H 为土壤剖面深度因子。

3.4.3 评价模型建立

在建立评价模型之前, 首先需要将 8 个评价因子进行量化处理, 然后将各评价等级赋予一定的分值, 高度适宜区、中度适宜区、勉强适宜区和暂时不适宜区分值分别为 1、2、3、4。

根据设定的评价因子, 将各评价因子的权重以及评价等级进行建模, 模型为

$$Y_i = \sum_{i=1}^m a_i b_i \quad (6)$$

式中 Y_i ——耕地适宜性评价综合值

m ——评价因子个数
 a_i ——第 i 个评价因子权重
 b_i ——第 i 个评价因子等级赋分值

4 结果与分析

4.1 土地利用动态变化

根据式(1)、(2),计算研究区研究时段内各地类的 K 值和 L 值,见表 6。从 K 值可以看出,2000—2010 年耕地、草地和人造地表呈现负动态,表明这 3 种地类转化成其他地类,其余地类呈现为正动态;这一时段 K 值最大的地类是水体,最小的是耕地。

表 6 2000—2020 年研究区土地利用动态度
Tab.6 Land use dynamics in study area from 2000 to 2020 %

动态度		2000—	2010—	2000—
		2010 年	2020 年	2020 年
单一土地利用 动态度	耕地	-0.02	-0.03	-0.03
	森林	0.42	0.01	0.22
	草地	-1.56	-0.2	-0.86
	湿地	0.05	0.17	0.11
	水体	9.84	-0.32	4.6
	人造地表	-0.2	1.61	0.69
综合土地利用动态度		0.24	0.07	0.15

2010—2020 年耕地、草地、水体动态度呈现负动态,森林、湿地和人造地表地类呈现正动态。这一时期 K 值最大的地类是人造地表,最小的是森林。2000—2020 年 K 值呈现正动态的地类有森林、湿地、水体和人造地表,耕地和草地呈现负动态。这一时期 K 值最大的地类是水体,最小的是耕地。整个研究期间 K 值最大的地类是水体,达到 9.84%,最小的地类是森林,为 0.01%。

从 L 值可以看出,整个研究区 20 年间差别较为显著,综合动态度为 0.15%,第 1 个 10 年时期综合动态度最高,为 0.24%,表明这 10 年间土地利用变化较为剧烈,主要是受到大量的未利用土地开荒,旱改水等政策的影响;2010 年后用地变化逐渐趋向缓慢,综合动态度最低的时段是 2010—2020 年,为 0.07%。总体而言研究区土地利用综合动态度呈现逐渐下降趋势。

4.2 土地利用转移矩阵变化

基于 ArcGIS 10.6,利用空间分析功能计算挠力河流域 2000—2010 年和 2010—2020 年地类转移矩阵,有助于了解研究区地类空间格局变化情况,也能直观反映各地类之间的转换过程和转移方向(表 7、8)。

表 7 2000—2010 年挠力河流域土地转移矩阵

Tab.7 Naoli River basin land transfer matrix in 2000—2010 hm²

地类	耕地	森林	草地	湿地	水体	人造地表	转入面积	转出面积	合计
耕地	1 457 457.62	24 385.25	15 037.18	1 164.19	4 221.90	5 791.83	50 600.35	46 727.42	1 508 057.97
森林	14 813.92	428 601.26	24 453.95	83.38	311.12	124.17	39 786.54	59 843.31	468 387.80
草地	23 826.38	34 552.55	81 213.26	769.46	5 013.98	734.58	64 896.95	41 221.67	146 110.21
湿地	1 391.84	104.35	206.95	103 301.90	1 149.19	3.43	2 855.75	3 200.61	106 157.66
水体	821.30	319.23	480.82	1 182.61	4 246.60	20.02	2 823.98	10 725.98	7 070.58
人造地表	5 873.99	481.93	1 042.78	0.96	29.79	26 354.33	7 429.45	6 674.03	33 783.78
合计	1 504 185.05	488 444.57	122 434.94	106 502.50	14 972.58	33 028.36			2 269 568

表 8 2010—2020 年挠力河流域土地转移矩阵

Tab.8 Naoli River basin land transfer matrix in 2010—2020 hm²

地类	耕地	森林	草地	湿地	水体	人造地表	转入面积	转出面积	合计
耕地	1 453 867.00	22 054.60	14 965.90	2 321.48	1 459.49	9 293.41	50 094.88	45 092.19	1 503 961.88
森林	20 017.80	432 856.00	33 143.40	1 440.32	767.95	411.15	55 780.62	56 508.08	488 636.62
草地	15 009.00	34 049.80	71 016.00	750.56	777.69	850.39	51 437.44	49 088.29	122 453.44
湿地	3 868.51	53.03	411.70	101 046.00	1 115.59	10.29	5 459.12	7 195.92	106 505.12
水体	1 519.45	150.25	255.58	2 681.23	10 345.40	22.53	4 629.04	4 129.66	14 974.44
人造地表	4 677.43	200.40	311.71	2.33	17.93	27 826.20	5 209.80	10 587.77	33 036.00
合计	1 498 959.19	489 364.08	120 104.29	108 241.92	14 484.05	38 413.97			2 269 568

从表 7 可以看出,研究区 2000—2010 年地类变化为:耕地、草地和人造地表面积增加,森林、湿地和水体面积减少。耕地面积净增加 3 872.93 hm²,草地面积净增加 23 675.28 hm²,人造地表面积净增加 755.42 hm²,森林面积净减少 20 056.77 hm²,湿地面积净减少 344.86 hm²,水体面积净减少 7 902 hm²。

耕地的主要转出方向是森林、草地和湿地,森林的转出方向是耕地和草地,草地的转出方向是耕地和森林,湿地的转出方向是耕地和水体,水体的主要转出方向是湿地,人造地表用地主要转出方向是耕地和草地,这是因为随着挠力河流域地区经济的不断发展,城乡建设对土地的需求进一步增多,侵占各地类

的现象剧烈,尤其森林和水体用地面积净减少分别达到 20 056. 77 hm²和 7 902 hm²。

从表 8 可以看出,研究区 2010—2020 年地类变化为:耕地、草地和水体用地面积增加,森林、湿地和人造地表用地面积减少。其中,耕地面积净增加 5 002. 69 hm²,草地面积净增加 2 349. 15 hm²,水体面积净增加 499. 38 hm²,森林面积净减少 727. 46 hm²,湿地面积净减少 1 736. 8 hm²,人造地表用地面积净减少 5 377. 97 hm²。耕地的主要转出方向是森林和草地,森林的转出方向是耕地和草地,草地的转出方向是耕地和森林,湿地的转出方向是耕地和水体,水体的主要转出方向是湿地和耕地,人造地表用地主要转出方向是耕地,这是因为在 2010—2020 年间随着经济的发展,该地区出现了许多的空心房或者危旧房,

国家出台增减挂钩政策后地块被复垦成耕地,或者改造成草地和水塘,导致耕地、草地和水体面积增加,人造地表用地面积减少。

4.3 CLUE-S 模型精度

由二元逻辑回归方程检验结果可知,挠力河流域各地类分布概率模拟结果较好,耕地、森林、草地、湿地、水体、人造地表的 ROC 值分别为 0. 889、0. 951、0. 785、0. 958、0. 857、0. 869,均大于 0. 7,满足模型的回归要求^[31],所选取的影响因子可以用于土地利用变化模拟。以挠力河流域 2010 年土地利用数据为基础,将限制区域、土地利用转移规则、土地利用需求、二元逻辑回归方程检验结果等相关数据输入 CLUE-S 模型中,对挠力河流域 2020 年土地利用变化进行模拟,如图 2 所示。

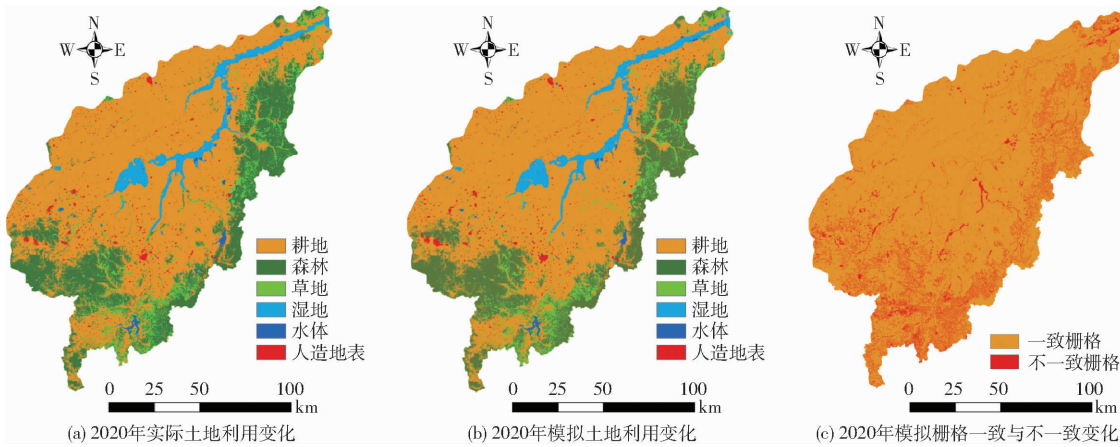


图 2 挠力河流域土地利用现状与 CLUE-S 模型预测结果

Fig. 2 Present situation of land use in Naoli River basin and forecast results of CLUE-S model

结果所示,模拟正确栅格数目与研究区总栅格数目的比值为 0. 911 8,即地类模拟准确率为 91. 18% (表 9)。从整体上看,本次研究模拟精度较高,模拟效果理想;从模拟误差上看,土地利用类型面积大且集中连片分布的地类模拟精度高于分布相对分散的地类,同时模拟结果与土地利用类型本身

的实际情况有关;从本次研究来看,挠力河流域由于地类的数量和分布差异较大,且地形复杂,海拔差异大,因此低海拔平坦区域模拟精度高于高海拔地形复杂区。通过计算 Kappa 系数为 0. 894,大于模型要求的精度 0. 75,说明模拟效果优且各参数值的设置比较合理,可使用 CLUE-S 模型和相关参数对挠

表 9 各地类模拟精度

Tab. 9 Everywhere class simulation accuracy

地类	耕地	森林	草地	湿地	水体	人造地表	合计
栅格数	1 494 961	485 615	126 978	107 942	14 956	39 116	2 269 568
栅格正确总数	1 435 790	420 398	73 041	100 625	10 477	29 152	2 069 489
准确率/%	96. 04	86. 57	57. 52	93. 22	70. 05	74. 53	91. 18

力河流域土地利用变化进行模拟。

4.4 土地利用变化特征及情景模拟分析

4.4.1 情景模拟分析

根据《黑龙江省土地利用总体规划(2006—2020 年)》《黑龙江省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》及挠力河流域自

然状况和经济社会的发展需求以及前人研究的经验,为挠力河流域未来土地利用格局的发展,本文构建了基线情景、农业发展情景、生态保护情景 3 种情景方案,对不同情景下各地类面积变化进行分析。

(1) 基线情景

在基线情景下,挠力河流域继续保持 2010—

2020 年的土地利用相关政策,土地利用需求变化按 2010—2020 年各地类的变化进行设定。如表 10 所示,到 2030 年挠力河流域耕地面积变为 1 490 099 hm²,较 2020 年减少 0.32%,人造地表地类面积由 2020 年

的 39 116 hm² 增加到 2030 年的 44 186 hm²,增加 12.91%,其余地类均有相应的增加和减少,森林和湿地较 2020 年增加 0.17% 和 1.75%,草地和水体较 2020 年减少 1.92% 和 3.13%。

表 10 不同情景下土地利用类型面积
Tab.10 Land use type area under different scenarios

情景	耕地	森林	草地	湿地	水体	人造地表	合计
2020 年	1 494 961	485 615	126 978	107 942	14 956	39 116	2 269 568
2030 年基线情景	1 490 099	486 424	124 538	109 833	14 488	44 186	2 269 568
2030 年农业情景	1 848 900	242 778	63 458	64 744	10 572	39 116	2 269 568
2030 年生态保护情景	1 153 158	728 146	190 508	140 576	18 064	39 116	2 269 568

(2) 农业发展情景

在农业发展情景下,挠力河流域优先保证耕地的充足供应,保证耕地面积在不减少的情况下,优先满足农业发展需求。持续推动森林地类中包括树冠盖度为 10% ~ 30% 的疏林地,草地地类中的稀树草原、荒漠草原以及湿地地类中有浅层积水的部分土地向耕地的转移。设定地方政府大力开展森林、草地、湿地、水体地类的结构调整,将挠力河流域耕地的潜力全部释放。如表 10 所示,2030 年挠力河流域耕地面积变为 1 848 900 hm²,较 2020 年增加 23.68%,森林、草地、湿地和水体面积变为 242 778、63 458、64 744、10 572 hm²,与 2020 年相比分别减少 50%、50%、40.02%、29.31%,人造地表地类面积由于模型的参数设置未发生变化。

(3) 生态保护情景

在生态保护情景下,挠力河流域以绿色发展为导向,严格保护森林、草地、湿地和水体地类面积的

减少,大力开发潜在生态空间。设定地方政府通过退耕还林还草和植树造林等措施,将水体地类中的部分坑塘以及耕地地类中的部分雨养旱地和牧草种植地转为生态用地。如表 10 所示,2030 年挠力河流域森林、草地、湿地和水体地类面积分别为 728 146、190 508、140 572、18 064 hm²,较 2020 年分别增加 49.94%、50%、30.23%、20.78%,在 2030 年挠力河流域生态用地约占研究区总面积的 47.47%,耕地由 2020 年的 1 494 961 hm² 减少到 2030 年的 1 153 158 hm²,减少 22.86%,同样人造地表地类面积由于模型的参数设置未发生变化。

4.4.2 土地利用空间布局及模拟

根据 3 种情景方案预测挠力河流域 2030 年各地类的面积(表 10),用 2020 年土地利用数据作为模拟的起始年份,继续使用 15 个驱动因子、各情景下 ELAS 和转移矩阵,输入 CLUE-S 模型中模拟 2030 年挠力河流域土地利用空间布局,最终生成 3 种情景下土地利用类型图(图 3)。

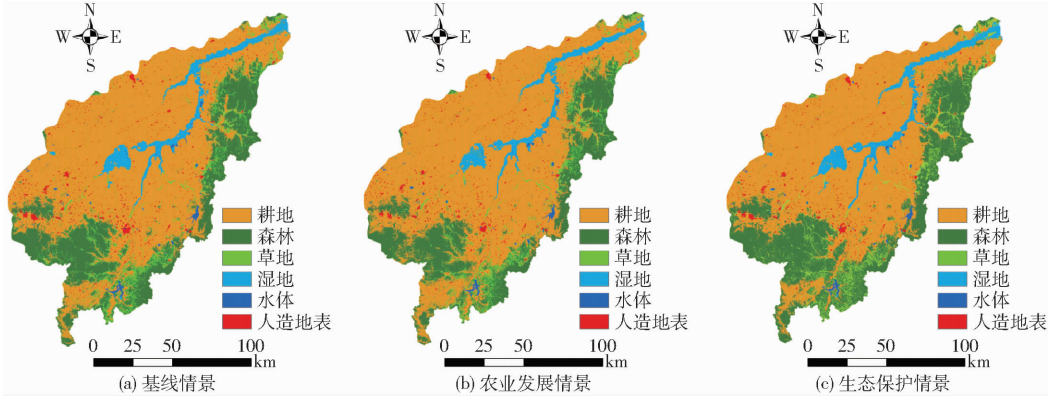


图 3 2030 年情景模式模拟图

Fig.3 Scenario pattern simulation diagrams in 2030

(1) 基线情景下,挠力河流域只有人造地表扩张趋势程度大,森林和湿地用地扩张趋势程度较小,其余地类均呈现出不同程度的缩减现象,对研究区的粮食和生态安全产生威胁。该模拟情景下,人造地表用地和森林地类扩张主要位于宝清县的中部和

西南部,占用了耕地的发展空间,对该地区农业的发展会产生一定的影响。

(2) 农业发展情景下,挠力河流域只有耕地用地呈现扩张趋势,耕地稳定性较好,粮食安全得到充足的保障。尽管研究区耕地用地集中分布,但是土

地-水资源需求压力影响下,饶河县的东南部、宝清县的东部和西南部出现大量的森林用地和草地锐减情况,还出现了富锦市西南部湿地消失的现象,由此可见该情景下生态-水资源安全会对挠力河流域的发展带来较大压力。

(3)生态保护情景下,挠力河流域森林、草地、湿地出现了扩张趋势,主要集中在宝清县的西南部和双鸭山的南部。由于生态空间的扩张主要是

耕地面积的减少,因此该情景下粮食生产能力将会受到一定程度的影响,经济发展同样会受到制约。

4.5 耕地适宜性评价结果

根据评价指标体系和评价模型,利用 ArcGIS 空间分析功能,最后得出 2030 年挠力河流域模拟 3 种情景下的耕地适宜性评价等级以及各评价等级下的面积比,如图 4、表 11 所示。

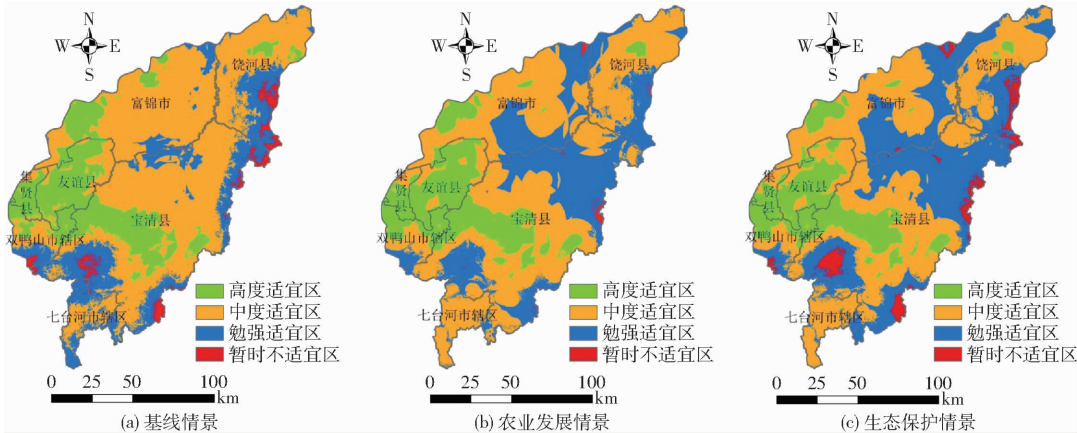


图 4 2030 年耕地适宜性评价结果

Fig. 4 Evaluation results of cultivated land adaptability in 2030

表 11 耕地适宜性评价面积统计

Tab. 11 Acreage statistics of cultivated land adaptability evaluation

等级	基线情景		农业发展情景		生态保护情景	
	面积/	占比/	面积/	占比/	面积/	占比/
	hm ²	%	hm ²	%	hm ²	%
高度适宜区	450 608	19. 85	426 690	18. 80	367 174	16. 18
中度适宜区	1 341 013	59. 09	1 197 922	52. 78	1 068 453	47. 08
勉强适宜区	417 505	18. 39	633 974	27. 93	750 468	33. 07
暂时不适宜区	60 442	2. 67	10 982	0. 49	83 473	3. 67

4.5.1 综合适宜性评价

从表 11 和图 4 可以看出,基线情景下耕地在中度适宜区是重点分布区域,面积最大,为 1 341 013 hm²,占比 59. 09%;高度适宜区面积为 450 608 hm²,分布在宝清县、集贤县和友谊县部分区域;勉强适宜区面积为 417 505 hm²,分布在高海拔地区、宝清县的西南和富锦市小部分区域;暂时不适宜区同样分布在地势高的区域,是该情景下面积最小的区域,为 60 442 hm²,由于地势高低不平,不利于农作物的种植,因此被划分为暂时不适宜区。农业发展情景下耕地在中度适宜区面积最大,为 1 197 922 hm²,和基线情景下相比面积减少 143 091 hm²;高度适宜区面积为 426 690 hm²,分布区域和基线情景下几乎相同,减少的部分主要位于友谊县和富锦市北部;勉强适宜区面积为 633 974 hm²,主要位于双鸭山市辖区南部,宝清县的东北部、西南部,富锦市南部以及饶

河县南部区域;暂时不适宜区和基线情景下相比面积减少 49 460 hm²,减少的区域演化成勉强适宜区,可能原因是环境的改变和人类活动的影响造成该区域的演化。生态保护情景下耕地在中度适宜区面积最大,为 1 068 453 hm²,占比为 47. 08%;高度适宜区面积为 367 174 hm²,和前两种情景相比分别减少 83 434 hm²和 59 516 hm²,减少区域分布在友谊县的北部和挠力河下游附近;勉强适宜区面积和前两种情景相比分别增加 216 469 hm²和 332 963 hm²;暂时不适宜区面积为 83 473 hm²,与前两种情景相比增加的区域位于原有基础上向周围扩张部分和富锦市北部区域。综合来看,3 种情景下耕地位于高度适宜区面积占比均达到 16% 以上,中度适宜区面积占比达到 47% 以上,勉强适宜区面积占比达到 18% 以上,这是因为适宜区域的土地主要分布在地势平坦地带,水热条件好,土层深厚,作物产量高,适宜农作。耕地位于暂时不适宜区在基线情景下面积占比为 2. 67%,农业发展情景下为 0. 49%,生态保护情景下为 3. 67%,这是因为暂时不适宜区域土地主要分布在宝清县的西南部、东南部和饶河县的西部区域,地势坡度较大,属于丘陵地带,不适宜农作物种植。

4.5.2 适宜性因素分析

影响挠力河流域 2030 年 3 种情景下耕地适宜性分布差异的重要因素是自然因素,包括土壤、地形

地貌等。地形地貌对耕地适宜性评价有很大影响,表现在适宜区主要分布在平原地区,不适宜区由于海拔的增加,导致耕地的水热条件发生变化,从而影响土壤类型及土壤条件发生变化,不适宜耕作;研究区由于特色的地质条件形成大面积的黑土、黑钙土和草甸土,黑土和黑钙土有机质含量高,土壤土质肥沃,利于农作物生长,因此研究区绝大部分区域的土地条件对农作物的生长十分有利。

5 结 论

- (1)研究区土地利用类型以耕地为主,2000—2020 年森林、湿地、水体和人造地表呈增加趋势,耕地和草地呈减少趋势。
- (2)研究区 2000—2020 年土地利用转移主要发生在耕地、草地和森林之间,2000—2010 年草地面积转入最多,耕地次之,森林最少,转出面积相反;

- 2010—2020 年森林转入和转出面积最多,草地次之,耕地最少。
- (3)经模拟验证,Kappa 系数为 0.894,模拟总体精度为 91.18%,精度较高,可以模拟未来地类变化。
- (4)2030 年基线情景下人造地表面积增加 12.91%,占用了耕地的发展空间,将对研究区粮食安全产生威胁;农业发展情景下耕地得到了扩张,稳定性较好,粮食安全得到保障;生态保护情景下生态用地约占研究区总面积的 47.47%,耕地面积减少 22.86%,粮食生产能力受到一定程度的影响,经济发展同样会受到制约。
- (5)根据评价指标体系和评价模型,分析计算出 3 种情景下耕地均位于适宜区的面积占比达到 96% 以上,不适宜区面积占比不足 4%,可见研究区 96% 以上的土地适合耕作,土地利用基本合理。

参 考 文 献

[1] LI Y,DUO L,ZHANG M,et al. Assessment and estimation of the spatial and temporal evolution of landscape patterns and their impact on habitat quality in Nanchang,China[J]. Land,2021,10(10):1073.

[2] 杨绮丽,何政伟. 2000—2013 年甘肃敦煌市土地利用变化及其驱动因素分析[J]. 冰川冻土,2016,38(2):558—566. YANG Qili,HE Zhengwei. Land use change and its driving forces in Dunhuang, Gansu province, 2000—2013[J]. Glacial Tundra,2016,38(2):558—566. (in Chinese)

[3] IWEGBUE C M A,MARTINCIGH B S. Ecological and human health risks arising from exposure to Metals in urban soils under different land use in Nigeria[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2018,25(13):12373—12390.

[4] 王莉红,张军民. 玛纳斯河流域人工绿洲空间扩张模式[J]. 中国科技论文,2018,13(9):1072—1077. WANG Lihong,ZHANG Junmin. Spatial expansion patterns of artificial oases in the Manas River basin[J]. Chinese Scientific Papers,2018,13(9):1072—1077. (in Chinese)

[5] TRISURAT Y,EAWPANICH P,KALLIOL R. Integrating land use and climate change scenarios and models into assessment of forested watershed services in Southern Thailand[J]. Environmental Research,2016,147:661—620.

[6] 顾汉龙,马天骏,钱凤魁,等. 基于 CLUE—S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报,2022,38(9):288—296. GU Hanlong,MA Tianjun,QIAN Fengkui,et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE—S model[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(9):288—296. (in Chinese)

[7] 田贺,梁迅,黎夏,等. 基于 SD 模型的中国 2010—2050 年土地利用变化情景模拟[J]. 热带地理,2017,37(4):547—561. TIAN He,LIANG Xun,LI Xia, et al. Simulation of land use change scenarios in China from 2010 to 2050 based on SD Model[J]. Tropical Geography,2017,37(4):547—561. (in Chinese)

[8] HE C,OKADA N,ZHANG Q,et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China[J]. Applied Geography,2006,26(3):323—345.

[9] HU Y,ZHENG Y,ZHENG X. Simulation of land-use scenarios for Beijing using CLUE—S and Markov composite models[J]. Chinese Geographical Science,2013,23(1):92—100.

[10] LIANG X,GUAN Q,KEITH C,et al. Mixed-cell cellular automata:a new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures[J]. Landscape and Urban Planning,2021,205:103960.

[11] FENG Y,LIU Y,TONG X. Comparison of metaheuristic cellular automata models: a case study of dynamic land use simulation in the Yangtze River Delta[J]. Computers,Environment and Urban Systems,2018,70:138—150.

[12] YANG X,ZHENG X,CHEN R. A land use change model:integrating landscape pattern indexes and Markov—CA[J]. Ecological Modelling,2014,283:1—7.

[13] 陈宝芬,张耀民,江东. 基于 CA—ABM 模型的福州城市用地扩张研究[J]. 地理科学进展,2017,36(5):626—634. CHEN Baofen,ZHANG Yaomin,JIANG Dong. Study on urban land expansion in Fuzhou based on CA—ABM model[J]. Advances in Geographical Sciences,2017,36(5):626—634. (in Chinese)

[14] LIU X,LIANG X,LI X,et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning,2017,168:94—116.

[15] FAN C, MYINT S, REY S, et al. Time series evaluation of landscape dynamics using annual Landsat imagery and spatial statistical modeling: evidence from the Phoenix metropolitan region[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2016, 58: 12 – 25.

[16] MEI Z, WU H, LI S. Simulating land-use changes by incorporating spatial autocorrelation and self-organization in CLUE-S modeling: a case study in Zengcheng District, Guangzhou, China[J]. Frontiers of Earth Science, 2018, 12(2): 299 – 310.

[17] LIU G, JIN Q, LI J, et al. Policy factors impact analysis based on remote sensing data and the CLUE-S model in the Lijiang River Basin, China[J]. Catena, 2017, 158: 286 – 297.

[18] WAIYASUSRI K, YUMUANG S, CHOTPANTARAT S. Monitoring and predicting land use changes in the Huai Thap Salao Watershed area, Uthaitхани Province, Thailand, using the CLUE-S model[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 533.1 – 533.16.

[19] 赵明松, 徐少杰, 邓良, 等. 基于 CLUE-S 模型的煤矿城市土地利用变化模拟[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 158 – 168.
ZHAO Mingsong, XU Shaojie, DENG Liang, et al. Simulation of land use change in coal mining cities based on CLUE-S model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 158 – 168. (in Chinese)

[20] 张弘强, 罗春雨, 崔玲, 等. 2011—2016 年挠力河流域生长季地表温度时空变化特征分析[J]. 国土与自然资源研究, 2018(2): 68 – 69.
ZHANG Hongqiang, LUO Chunyu, CUI Ling, et al. Spatio-temporal characteristics of land surface temperature in the Naoli River basin during the growing season from 2011 to 2016[J]. Land and Natural Resources Research, 2018(2): 68 – 69. (in Chinese)

[21] 周浩, 夏卫生, 雷国平. 挠力河流域水土资源平衡及耕地合理利用规模特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 278 – 287.
ZHOU Hao, XIA Weisheng, LEI Guoping. Characteristics of soil and water resources balance and rational use of arable land in the Naoli River basin[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 278 – 287. (in Chinese)

[22] 刘红玉, 张世奎, 吕宪国. 20 世纪 80 年代以来挠力河流域湿地景观变化过程研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(6): 698 – 705.
LIU Hongyu, ZHANG Shikui, LÜ Xianguo. A study on the process of wetland landscape change in the Naoli River basin since the 1980s[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(6): 698 – 705. (in Chinese)

[23] 周浩, 陈竹书, 冯晓娟. 基于灰色系统理论的挠力河流域净耕地面积预测[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 159 – 165.
ZHOU Hao, CHEN Zhushu, FENG Xiaojuan. Prediction of net arable land area in Naoli River basin based on grey system theory[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2021, 41(3): 159 – 165. (in Chinese)

[24] 裴亮, 陈晨, 戴激光, 等. 基于马尔科夫模型的大凌河流域土地利用/覆被变化趋势研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 525 – 531.
PEI Liang, CHEN Chen, DAI Jiguang, et al. Research on forecast trend of land use and land cover change in Dalinghe River basin based on Markov model[J]. Soil Bulletin, 2017, 48(3): 525 – 531. (in Chinese)

[25] 张荣天. 城镇化进程中丘陵区土地利用演化机理与模拟调控研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.

[26] PONTIUS R, SCHNEIDER L. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 85(1): 239 – 248.

[27] 李宇健. 高速公路临时用地复垦适宜性评价研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
LI Yujian. Study on suitability evaluation of temporary land reclamation of expressway [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[28] 农肖肖, 何政伟, 吴柏清. ARCGIS 空间分析建模在耕地质量评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 234 – 236.
NONG Xiaoxiao, HE Zhengwei, WU Baiqing. Application of ARCGIS spatial analysis modeling in cultivated land quality evaluation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 234 – 236. (in Chinese)

[29] 刘耀林, 何建华. 土地信息学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[30] 王沈佳, 汤江龙, 陈婧. 基于 AHP 法与熵技术的农村待复垦土地适宜性评价[J]. 现代经济信息, 2013(13): 360 – 361.
WANG Shenjia, TANG Jianglong, CHEN Jing. Suitability evaluation of rural land waiting to be reclaimed based on AHP and entropy technology[J]. Modern Economic Information, 2013(13): 360 – 361. (in Chinese)

[31] PONTIUS R. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. Journal of the American Society of Photogrammetry, 2000, 66(8): 1011 – 1016.