

DOI: 10.20103/j.stxb.202205161375

王森, 彭立. 权衡生态保护与经济发展的土地利用多情景模拟. 生态学报, 2023, 43(23): 9938-9951.

Wang S, Peng L. Land use multi-scenario simulation for balancing ecological protection and economic development. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9938-9951.

权衡生态保护与经济发展的土地利用多情景模拟

王 森^{1,2}, 彭 立^{1,2,*}

1 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610066

2 四川师范大学西南土地评价与资源监测教育部重点实验室, 成都 610066

摘要: 从土地利用视角切入, 首先对龙门山过渡带的生态服务功能重要性与生态脆弱性进行了综合评价, 采用自然断点法将生态服务功能重要性与脆弱性计算值进行分级, 以此为基础结合研究区现状已划定生态保护区, 划分生态综合评价等级为 V 级的区域为规划约束情景下土地利用限制转换区, 划分生态综合评价等级为 IV 级、V 级的区域为生态保护情景下土地利用限制转换区。设置自然发展情景研究区土地利用规律保持 2010—2015 年不变, 规划约束情景在自然发展情景基础上将耕地、林地与水域、草地向建设用地转化的概率分别降低 30%、20% 与 10%, 生态保护情景在自然发展情景基础上将耕地向建设用地转化概率降低 30% 并补充于耕地向林地转化之上, 将林地、草地向建设用地转化的概率降低 50%。基于多情景土地利用模拟结果, 提取待权衡用地斑块, 划定生态综合评价结果 V 级、坡度 25°、地方林线海拔 3500m 为判定阈值, 结合现状地类、主体功能区划定等因素进行多重逻辑判定, 将多情景模拟结果进行集成, 权衡判定后的集成方案既能很好地保护生态环境, 又能较好兼顾研究区经济发展。

关键词: 土地利用变化; 多情景模拟; 未来土地利用变化情景模拟模型 (FLUS); 龙门山

Land use multi-scenario simulation for balancing ecological protection and economic development

WANG Sen^{1,2}, PENG Li^{1,2,*}

1 College of Geography and Resources, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China

2 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Chengdu 610066, China

Abstract: From the perspective of land use, we made a comprehensive assessment on the importance and vulnerability of ecological functions in the Longmen Mountain transition zone. The Natural Breaks method was adopted to classify the calculated values of the importance and vulnerability of ecological functions. Then we referenced the designated ecological reserves, the area with comprehensively ecological assessment grade V was classified as the land use restriction conversion area under the planning-controlling situation, and the area with comprehensive ecological assessment grade IV and V was classified as the land use restriction conversion area under the ecological-protecting situation. The regulation of land use in the research area with natural-developing situation was remained as 2010 to 2015. Compared with the natural-developing situation, the conversion probability under the planning-controlling situation of the cultivated land to the construction land was reduced by 30%, the conversion probabilities under the planning-controlling situation of the forest land and the water area to the construction land was reduced by 20%, and the conversion probability of grassland to the construction land was reduced by 10%, and all reduced parts remained the same as the original land type. And in the ecological-protecting situation, the conversion probability of the cultivated land to construction land was reduced by 30%, and this part of cultivated land was converted to forest land. And the conversion probabilities of forest land and grassland to construction

基金项目: 四川省科技计划项目 (2022JDJQ0015); 国家自然科学基金项目 (42071222)

收稿日期: 2022-05-16; 网络出版日期: 2023-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengli@imde.ac.cn

land were reduced by 50%, and this part of forest land and grassland were remained the same as the original land type. In the three different situations, the cultivated land, forest land, water area and unused land in the research area were reduced, especially the cultivated land, which was reduced by more than 300km². Under the planning-controlling situation, the cultivated land was reduced less than other two situations. The grassland and construction land were expanded, and the construction land increased quickly in the natural-developing situation. Based on the multi-scenario land use simulation results, we extracted the land patches that needed to be weighed. The decision thresholds were classified as Grade V, slope 25°, and local forest line elevation of 3500m. Multiple logical decisions were made in combination with the current land class, main function zoning and other factors, and the multi-scenario simulation results were integrated. The integrated scheme can not only protect the ecological environment well, but also take into account the economic development of the research area.

Key Words: land use and cover change; multi-scenario simulation; future land use simulation model; Longmen Mountain

随着城镇化进程的推进,我国土地利用结构发生了极大变化,许多自然土地,尤其是林地和草地被进一步开垦成耕地、建设用地。随着研究领域不断发展成熟,出现了针对海岸带^[1]、河流流域^[2]、喀斯特地区^[3]等极具地方特色的特殊地域、特殊对象的土地利用模拟研究,但较为缺乏针对不同分区之间的过渡地区的土地利用模拟研究。现阶段,随着国土空间规划与主体功能区规划的制定与实施,各大分区之间定位合理、分工明确,但对于地处不同功能分区之间的过渡与交汇区域而言,各类用地空间之间的权衡与竞争关系得以加强,如何合理配置区域土地资源、兼顾“三生”空间需求已成为亟待解决的问题,因此本文着眼于地处由生态示范区向经济发展区过渡、高原特色牧业区与粮油主产区交汇的龙门山过渡带区域,以期合理配置土地资源、提出更好协调农业生产、城镇化发展与生态保护之间的关系的土地利用方案,为类似的山地-平原过渡区域、山周盆地地区社会经济发展与生态环境保护协调发展、生态保护与经济发展双线并行提供思路与参考。

土地利用模拟当今国内外学术界对于土地利用变化预测模拟的相关研究领域发展得相当成熟,方法理论上有系统动力学、多元统计学、指数分析法、地理加权回归、遗传算法、蚁群算法等^[4-6];模型工具上有元胞自动机模型(CA)、Markov模型、地理模拟优化系统(GeoSOS)、小尺度土地利用变化及其空间效应模型(CLUE-S)、FLUS模型等^[7-9];已取得的重大成果上有黎夏团队的高精度全球未来100年模拟产品、宫鹏团队的全球未来土地利用预测数据集、George C. Hurtt团队的Land Use Harmonization数据集等^[10];土地利用模拟与研究区实际情况的适配程度不断提高,模拟对象不再局限于城市、大城市群或平原地区,研究视角不再局限于单纯的用地模拟,土地利用模拟与国土空间、生态安全、“三生”空间等进行交汇^[11],形成多角度、多层次、多维度的土地利用模拟研究,近年来随着研究的深入,针对不同情景、不同用途、不同研究对象的多模型耦合的土地利用模拟模型得以研发并应用^[12],进一步提高了模拟精度。

“过渡带”这一概念被广泛应用于地质学、生物学、气象学等许多方面的研究中^[13],如生态过渡带、降水量过渡带、农业牧业过渡带等,主要表现为多种因素在一定区域内具有一定空间规律的交错分布。龙门山地处四川盆地与青藏高原东缘交界处,跨越了我国第一、第二级阶梯^[14],无论是地形地势、气候条件还是社会经济条件都十分特殊且非常具有代表性,龙门山及其周围地区呈现出典型的山地-平原过渡、都市-乡村过渡、人口密集区-人口稀疏区过渡的情形,因此,本研究致力于研究龙门山过渡带的土地利用变化规律、预测土地利用演变趋势,不仅有利于合理开发利用土地资源,促进土地资源可持续发展,也能为情况类似的山地-平原过渡区、都市-乡村过渡区的土地利用发展与规划提供参考与思路。

随着城镇化与工业化进程的发展,粗放式的土地利用方式导致的生态环境恶化、土地利用矛盾加剧,如何统筹“三生”空间,如何优化国土空间结构已成为需要回答的重大问题,未来土地利用的权衡与配置优化研究已成为研究热点。从土地利用优化研究方法上看,现有优化方法主要分为数量结构优化与空间结构优化,数量结构优化研究主要方法主要有线性规划、多目标规划、系统动力学模型等,空间结构优化主要通过CLUE模型、CA模型、多智能体系统(MAS)、仿生智能算法(如遗传算法、蚁群算法等)实现^[11],总体看来目前的土地

利用权衡优化研究计算量较大,计算耗时较长且权衡判定的自动化程度较低。本研究根据研究区实际情况与数据,通过设定多重判定条件,对待权衡斑块进行多层次逻辑判定,提出了权衡优化的程序化逻辑。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区的界定与概况

研究区地处 102° — 107°E , 30° — 34°N 的四川省北部偏东地区(图 1),共约九万平方千米。地形单元由西至东大致为川西高原山地区-成都平原区-川东北低山丘陵区,从主体功能上看,研究区自西向东呈现明显的生态保护区-经济发展区的过渡趋势;在气候条件方面,龙门山以东地区受季风影响强烈,降水集中在夏季,年降水量在 800—1200mm 之间,年平均气温约 15°C — 18°C ,昼夜温差相对较小,而研究区西部气候呈现较明显的垂直地带性,汶川、平武等县区海拔相对较低,年均温约为 10°C — 15°C ,而地处更西部的松潘、小金、黑水等海拔高的区县年均温仅为 5°C — 10°C ,同时降水受地形影响较大,研究区西部汶川、平武以西区县年平均降水量不足 800mm,日间太阳辐射强度大,昼夜温差大。总体看来,研究区气候条件自西向东呈现明显的高原高山气候-亚热带季风气候的过渡趋势。

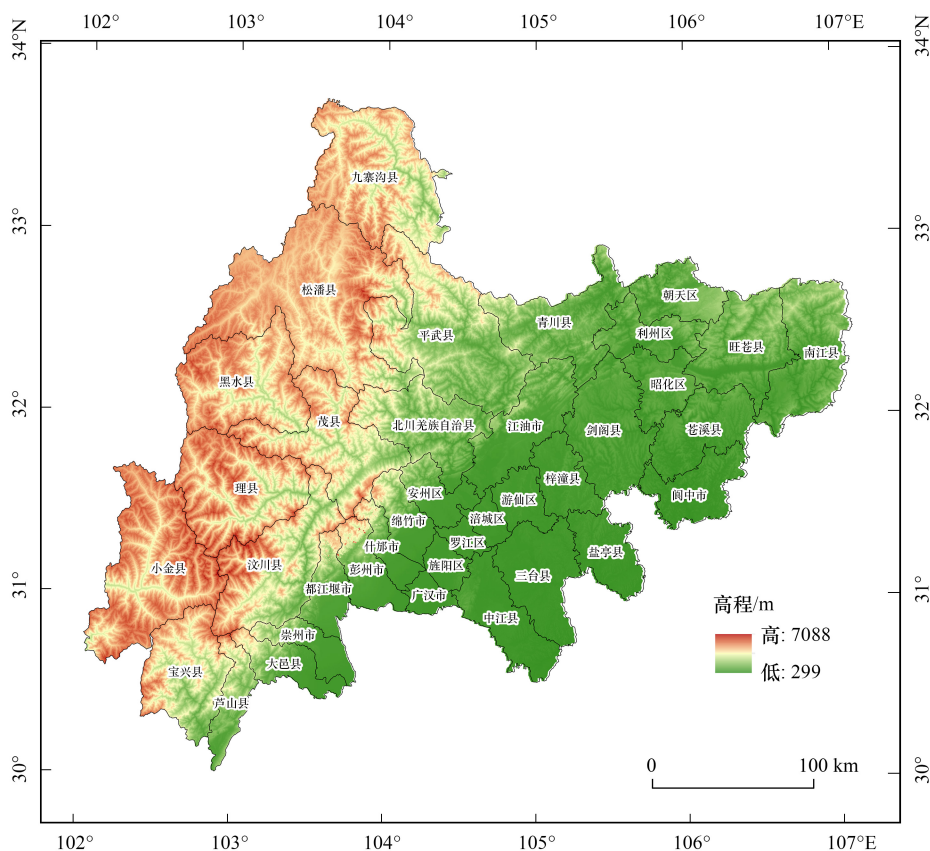


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the research area

研究区土地利用地区发展较不均衡,如西部耕地资源在数量上与质量上均显不足,农业生产空间受到制约,东部地区城镇空间与建设用地扩展迅速,挤压其他用地空间等。除此之外,研究区内还存在数量众多、占地面积广阔的自然保护区、森林公园、生态优先保护区等各级生态保护地^[15—16],随着研究区内各类用地的发展与竞争,研究区生态压力增大,如何较好地协调经济发展与生态保护之间的矛盾,权衡农业生产空间、城镇化发展空间与生态保护空间三者之间的关系已成为研究区未来国土空间规划面临的重要问题。

1.2 主要数据来源及预处理

土地利用变化是在不同时空范围内自然条件和人类活动相互作用产生的结果^[17],参照 FLUS 模型模拟土地利用变化的相关研究^[18—20],选取自然因子、社会经济因子、可达性因子一共 9 个因子。土地利用数据来自中科院资源环境与数据中心(www.resdc.cn),包括 2010 年、2015 年与 2020 年三期四川省土地利用栅格数据,初始分辨率为 30m×30m(其他主要数据及其来源详见表 1)。考虑到研究区实际尺度同时为方便 FLUS 模型计算及模拟,将各类数据分辨率统一为 100m×100m,行列数统一为 4853×4218。

表 1 主要数据及其来源
Table 1 Main data and their sources

数据类型 Data types	数据名称 The names of the data	数据来源 The source of the data
基础数据 The underlying data	土地利用数据	中科院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)
	年平均气温	中国气象数据网(data.cma.cn),经插值相关运算得到
	年平均降水量	
自然因子 Natural conditions	高程	地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)
	坡度	根据数字高程模型(DEM)数据计算提取得到
	坡向	
社会经济因子 Socioeconomic status	人口密度	各县市统计年鉴于统计公报
	人均国民生产总值	
可达性因子 Reachability	到城镇距离	基于各县级政府所在地矢量点欧式距离计算得到
	到河流距离	基于原始土地利用数据提取河流欧氏距离计算得到
	到铁路距离	基于铁路路网数据欧式距离计算得到
	到主干道距离	基于主干道数据欧式距离计算得到
其他数据 Other data	植被净初级生产力	地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)
	归一化植被指数	
	地形起伏度	基于 DEM 进行计算
	干旱度	基于气温降水数据进行计算
	土壤侵蚀性因子	基于土壤侵蚀数据进行计算
	耕地面积	各县市统计年鉴于统计公报

1.3 研究方法

1.3.1 SRP 模型

生态敏感性-压力度-恢复力模型(SRP)主要分为敏感性、压力度、恢复力三个部分,本次生态敏感性计算指标选取高程、地形起伏度、坡度、坡向、气温、干旱度、降水、土壤侵蚀度,生态恢复力选取植被覆盖度与植被净初级生产力(NPP)两个指标,生态压力度选取国内生产总值(GDP)、耕地面积、人口密度三个指标进行评价^[21]。根据各个指标的具体性质对各个指标分别进行标准化处理,并进行主成份分析,依据主成分分析结果,生态脆弱性指数计算公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \times P_i)$$
(1)

式中, E 表示生态脆弱性指数; m_i 是第 i 个主成分所对应的贡献率; P_i 为第 i 个主成分; n 是累计贡献率为 85% 以上的前 n 个主成分。

1.3.2 Markov 模型

采用马尔可夫链来预测未来像元总量参数,即未来的各土地利用类型所占像元的总量。马尔科夫链可以通过两期土地利用数据生成土地利用转移矩阵,计算出研究区域内土地利用变化转移概率矩阵,在此基础上,预测出研究区未来各土地利用类型的数量。其公式如下^[22]:

$$S_{t+1} + P_{ab} = S$$
(2)

式中, S 表示 t 时刻的土地利用状态, S_{t+1} 表示 $t+1$ 时刻的土地利用状态, P_{ab} 表示土地利用类型 a 转变为土地利用类型 b 的概率。

1.3.3 FLUS 模型

FLUS 模型以历史土地利用变化数据为基础,基于神经网络元胞自动机模型(ANN-CA)提取土地利用变化规律,结合土地利用变化驱动因子数据模拟未来各类用地的数量与空间分布^[23]。通过神经网络训练可以产生较高概率的分布适宜性,建立各种土地类型的发生概率与驱动因素之间的关系,神经网络的模拟过程是建立起初始土地利用类型与各个驱动因子在空间上相互作用的关系^[24],公式如下:

$$\alpha(m, a, t) = \sum_j w_{j,k} \times \text{sigm}(\text{net}_j(p, t))$$

$$\text{sigm}(\text{net}_j(p, t)) = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}} \quad (3)$$

$$\text{net}_j(p, t) = \sum_i w_{i,j} \times c$$

式中, $\alpha(m, a, t)$ 表示土地利用类型 a 于时间 t 出现在栅格 m 上的概率, $w_{j,k}$ 与 $\text{sigm}(\text{net}_i(m, t))$ 分别表示隐藏层与输出层间的权重系数与关联函数, $\text{net}_i(p, t)$ 是在 i 隐藏层像神经元 i 在栅格 m 的 t 时间发送的信号, $w_{i,j}$ 表示输入层与隐藏层之间的信号。

2 基于生态综合评价的限制转换区划定

本研究在进行生态服务功能重要性评价的同时结合了生态脆弱性的评价,利用生态综合评价分级的方法,将研究区划分为不同的生态保护需求度等级,并以其等级为根据对不同模拟情景设置不同的限制转换区。

2.1 生态服务功能重要性评价

生态服务功能重要性评价的方法与指标参考了《生态保护红线划定技术指南》(环办生态[2017]48号)文件,基于2020年现状数据进行计算,考虑到研究区实际并不存在荒漠化、石漠化问题,故从水源涵养、水土保持、生物多样性保护三个方面来进行评价,限于篇幅,具体计算方法见蔡德峰^[25]与李月臣^[26]等的研究,将计算值以分位数断点法进行分级,结果如图2所示。

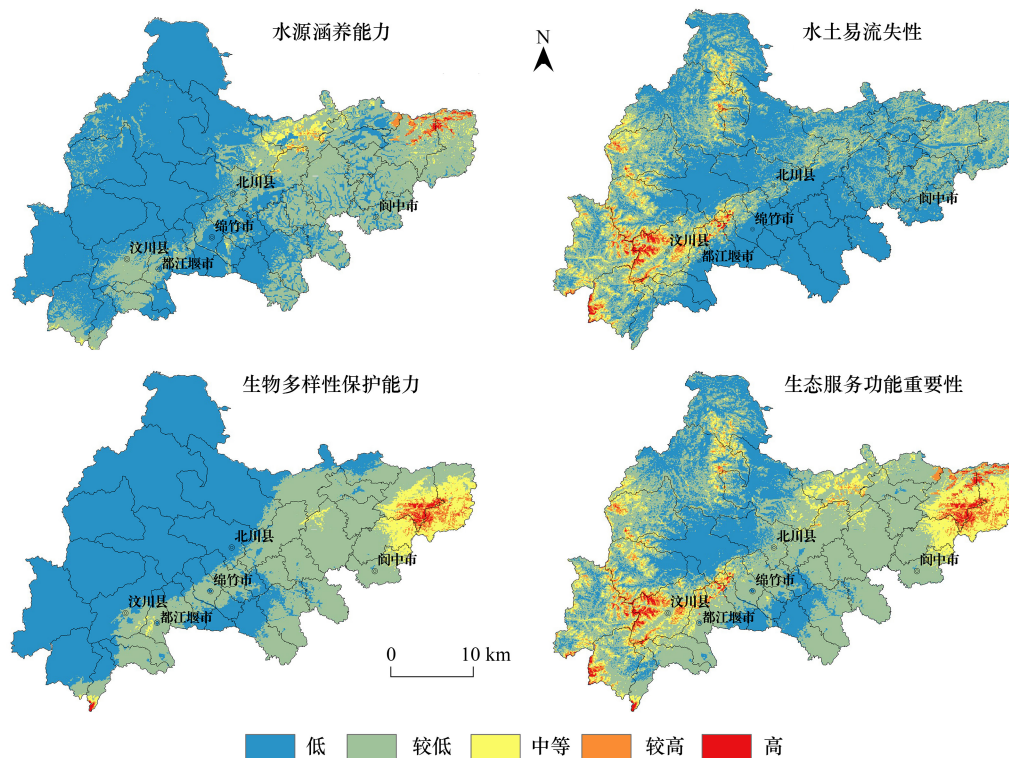


图2 生态服务功能重要性评价

Fig.2 Importance of ecological services

2.2 生态脆弱性评价

生态脆弱性评价采用敏感性-压力度-恢复力模型 (SRP 模型) 进行计算,限于篇幅,具体计算方法见贾晶晶^[27]的研究,将计算结果按照分位数断点法进行分级,从低到高分为一般脆弱、比较脆弱、中等脆弱、脆弱、极度脆弱五个等级,计算结果如图 3。

2.3 限制转换区的提取与处理

将生态系统服务功能重要性与生态系统脆弱性计算结果进行空间叠加(一般脆弱/重要赋值为 1,比较脆弱/重要赋值为 2,以此类推),计算并提取每个像元的最大值(值为 1 的像元对应 I 级,值为 2 的像元对应为 II 级,以此类推),并在此基础上叠加研究区现阶段已划定的生态保护区数据(现阶段已划定保护区直接赋值为 V 级),得出生态综合评价结果(如图 4 所示),即等级越高的区域生态保护需求度越高。

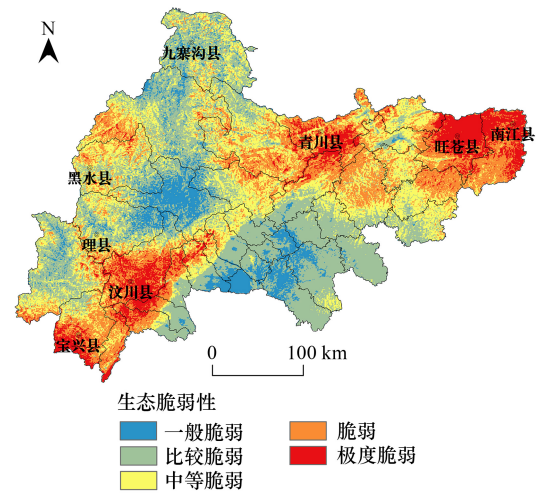


图 3 生态脆弱性评价结果

Fig.3 Ecological vulnerability

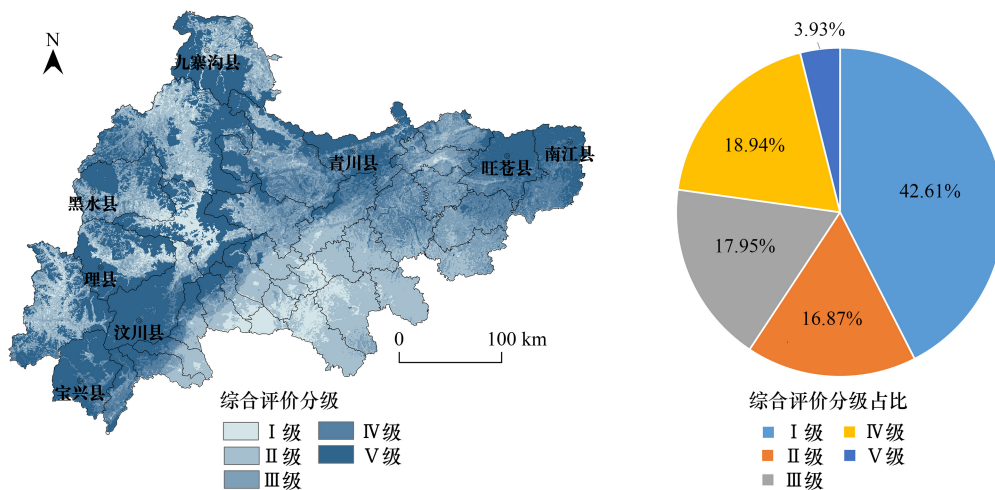


图 4 生态综合评价分级与生态综合评价分级占比

Fig.4 Comprehensive ecological evaluation and Proportion of grading of ecological comprehensive evaluation

最终计算结果显示,研究区总体生态保护需求度较高,其中处于 III 级以上的区域约占研究区总面积的 79.5%,其中等级为 V 级的区域占比为 42.61%,主要分布于西部高原高山区;等级为 I 级与 II 级区域共占比为 20.5%,主要分布在东部平原地区。

根据计算结果,将研究区生态综合评价等级为 V 级的区域提取,作为后文规划情景下的土地利用转移限制区;将研究区生态综合评价等级为 IV 级与 V 级的区域进行提取作为后文生态保护情景下的土地利用转移限制区(图 5)。

3 多情景土地利用模拟

3.1 土地利用模拟参数设置

本研究以 2020 年为现状基期年份对未来年份进行模拟,在模拟训练时分别以 2010 年、2015 年为基期,5 年为跨度对 2015 年与 2020 年土地利用情况进行模拟并以对应年份实际土地利用数据验证,2010—2015 年

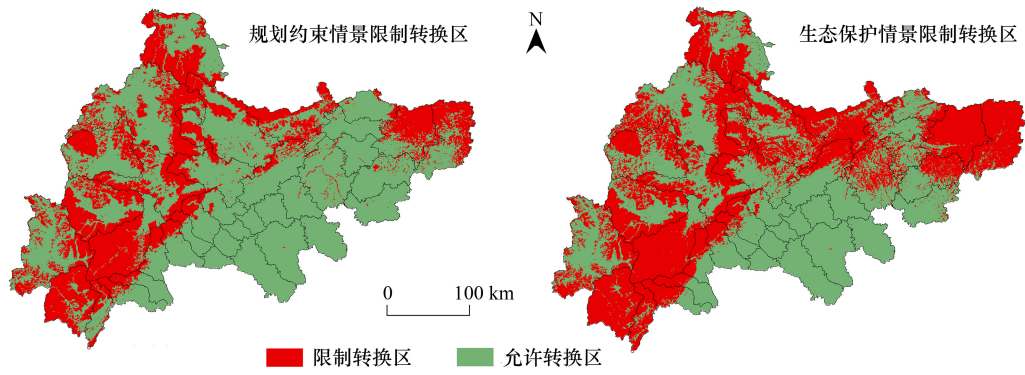


图 5 不同情景下土地利用限制转换区

Fig.5 Restricted areas of land use transfer under different scenarios

模拟结果 Kappa 系数为 0.8891,2015—2020 年模拟结果 Kappa 系数为 0.8359,故本次模拟选择 2010—2015 年土地利用变化规律进行后续模拟。

3.1.1 转移概率矩阵与需求预测

根据 2010—2015 年土地利用转移矩阵,计算研究区 2010 年至 2015 年土地利用转移概率矩阵,再利用马尔科夫链以 2015 年为基期,计算出 2020 年研究区各类土地利用需求数量(表 2)。

表 2 研究区 2015—2020 土地利用需求量预测结果/个

Table 2 Prediction results of land use demand in the research area from 2015 to 2020

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
2015 年实际 The actual in 2015	2633060	3567863	2818765	75150	141984	30778
2020 年预测 The forecast in 2020	2615203	3583573	2800410	82745	154216	30573
2020 年实际 The actual in 2020	2613826	3566579	2818308	76571	161709	29943

3.1.2 基于神经网络的适宜性概率计算

选取研究区 2015 年土地利用数据作为基期数据,将归一化处理后的相匹配年份的 9 个土地利用驱动因子栅格数据导入模型,设置神经网络训练采样方法为随机采样,采样参数设置为 20,隐藏层数量设置为 13,计算得到土地利用适宜性概率图集,其均方根误差值(RMSE)为 0.29163,表示训练结果可信。

3.1.3 转移成本矩阵及邻域权重参数设置

转移成本矩阵设置参考王芳莉的研究^[28]与 2015—2020 年实际土地利用转移量进行设置,同时将建设用地与水域间设置为相互不可转换,转移成本矩阵在此不作赘述。

土地利用邻域权重参数范围为 0—1 之间,邻域权重参数值越接近 0,表示该类用地越容易转化为其他地类^[29],本次研究邻域参数采用 3×3 的邻域窗口并参照研究区 2015—2020 年实际土地利用转移量进行计算与设置(表 3)。

表 3 邻域权重参数

Table 3 Neighborhood factor parameters

用地类型 Land use types	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
邻域权重参数 Neighborhood factor parameters	0.53	0.45	0.43	0.9	0.95	0.63

3.2 土地利用训练模拟结果及验证

3.2.1 ROC 曲线验证

由受试者特征曲线(ROC 曲线)验证结果(图 6)可知,耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地模拟曲线下方面积(AUC 值)分别为 0.873、0.725、0.790、0.790、0.906、0.881,各类用地 AUC 值高于 0.7,说明此次模拟精度较高。

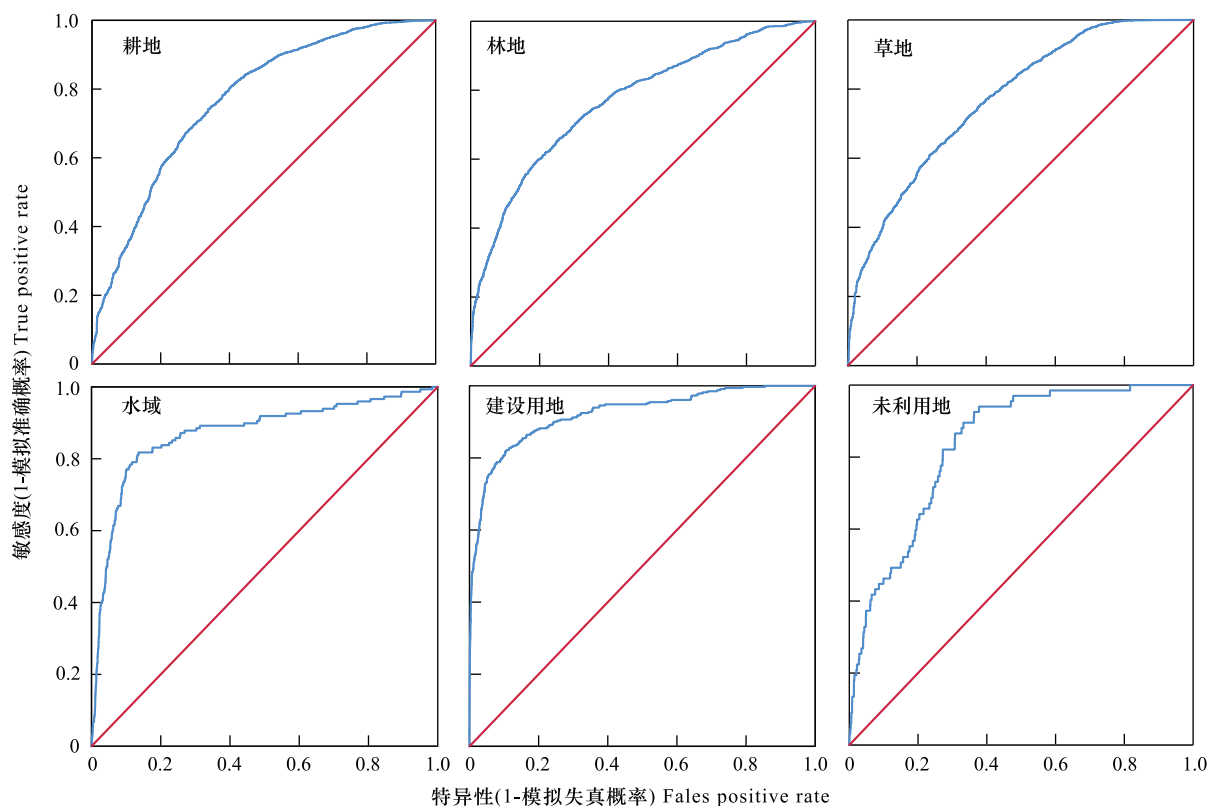


图 6 各类用地模拟 ROC 曲线

Fig.6 ROC curves of six land uses simulations

True Positive Rate: 表示真阳性(预测为真实际为真)概率;False Positive Rate: 表示假阳性(预测为真实际为假)概率;ROC:受试者特征曲线 Receiver operating characteristic curve

3.2.2 空间精度验证

计算得到 Kappa 系数值为 0.8282,此外,计算出 2020 年研究区土地利用模拟结果整体精度为 0.8834,表示 2020 年土地利用模拟结果与 2020 年研究区实际土地利用数据一致性较高(图 7),模拟结果可信。

3.3 土地利用多情景模拟

自然发展情景 是指在 2020—2030 年研究区各类土地利用变化不受政策等影响,主要受自然地理条件以及社会经济因素影响,其变化发展保持 2010—2015 年的发展变化规律不变;

规划约束情景 结合研究区实际,参考研究区所属地的规划规程等相关政策文件,根据相关指标严格控制耕地、林地、建设用地数量,在自然发展情景的基础之上,增设前文计算出的生态综合评价等级为 V 级的区域作为限制转换区,将耕地向建设用地转出概率降低 30%,减少转化的这部分耕地保持原地类不变,林地、水域向建设用地转化概率分别降低 20%,减少转化的部分保持原地类不变,草地向建设用地转化的概率降低 10%,其中减少转化的部分保持原用地类型不变;

生态保护情景 以生态保护优先,严格限制具有生态功能的林草地向其他用地类型转出的情景,其限制转换区在规划约束发展情景基础上进一步扩大,将生态综合评价等级为 IV 级的区域也纳入限制转换区,同时

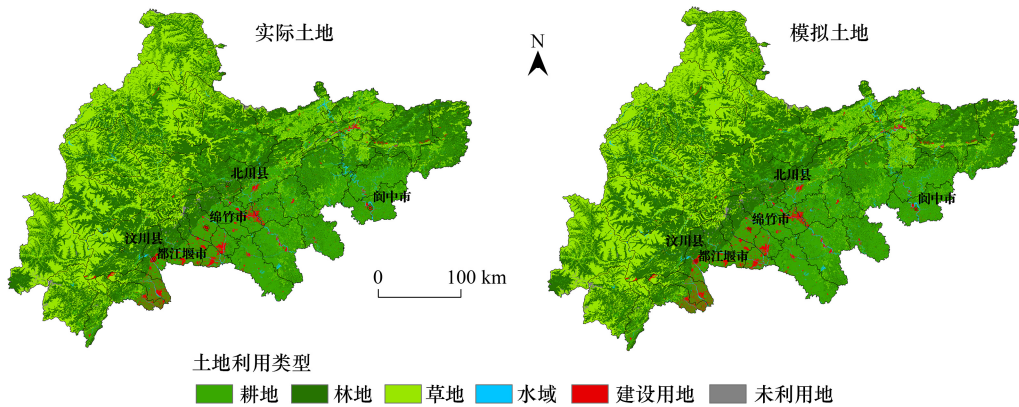


图 7 2020 年研究区模拟土地利用状况与 2020 年实际土地利用状况
Fig.7 Actual land use status and simulated land use status of the research area in 2020

参考相关研究^[30—31],在自然发展情景基础之上,将耕地向建设用地转移概率降低 30%,并将此部分增加到耕地向林地的转出之上,草地、林地向建设用地转变概率分别降低 50%,另 50%保持原地类不变。
根据 Markov 链,计算不同情景下各用地类型需求如表 4 所示。

表 4 2030 年研究区各情景各类土地利用需求栅格数量/个
Table 4 Number of grids for various types of land use demand under different scenarios in 2030

用地类型 Land use types	2015 年实际 The actual in 2015	2030 年预测 The forecast in 2030		
		自然发展情景	规划约束情景	生态保护情景
耕地 Cultivated land	2633060	2577099	2583110	2577099
林地 Forest land	3567863	3563819	3564101	3564525
草地 Grass land	2818765	2817280	2817323	2823512
水域 Water land	75150	79412	79439	79414
建设用地 Construction land	141984	199648	193284	192708
未利用地 Unused land	30078	29677	29678	29678

3.4 多情景模拟结果

根据以上参数设置,分别计算模拟出在自然发展情景、规划约束情景、生态保护情景三种情景之下 2030 年研究区土地利用状况(表 5)与空间分布情况(图 8)。

表 5 研究区 2030 年三种情景土地利用模拟结果/个
Table 5 Land use simulation results of three scenarios in 2030

用地类型 Land use types	2020 年现状 The actual in 2020	自然发展情景 Natural development scenario		规划约束情景 Planning constraint scenario		生态保护情景 Ecological conservation scenario	
		结果		结果		结果	
		结果	变化	结果	变化	结果	变化
耕地 Cultivated land	2615203	2577099	-38104	2583110	-32093	2577099	-38104
林地 Forest land	3583573	3563819	-19754	3564101	-19472	3564525	-19048
草地 Grass land	2800410	2817280	16870	2817323	16913	2823512	23102
水域 Water land	82745	79412	-3333	79439	-3306	79414	-3331
建设用地 Construction land	154216	199182	44966	192874	38658	192359	38143
未利用地 Unused land	30573	30144	-429	30089	-484	30027	-546

在自然发展情景下,无其他政策等因素干扰,研究区 2020—2030 年各类用地变化趋势与 2010—2015 年保持一致,经过单位换算,得出自然发展情景下,2020—2030 年间,研究区耕地共减少 381.04km²,林地共减少

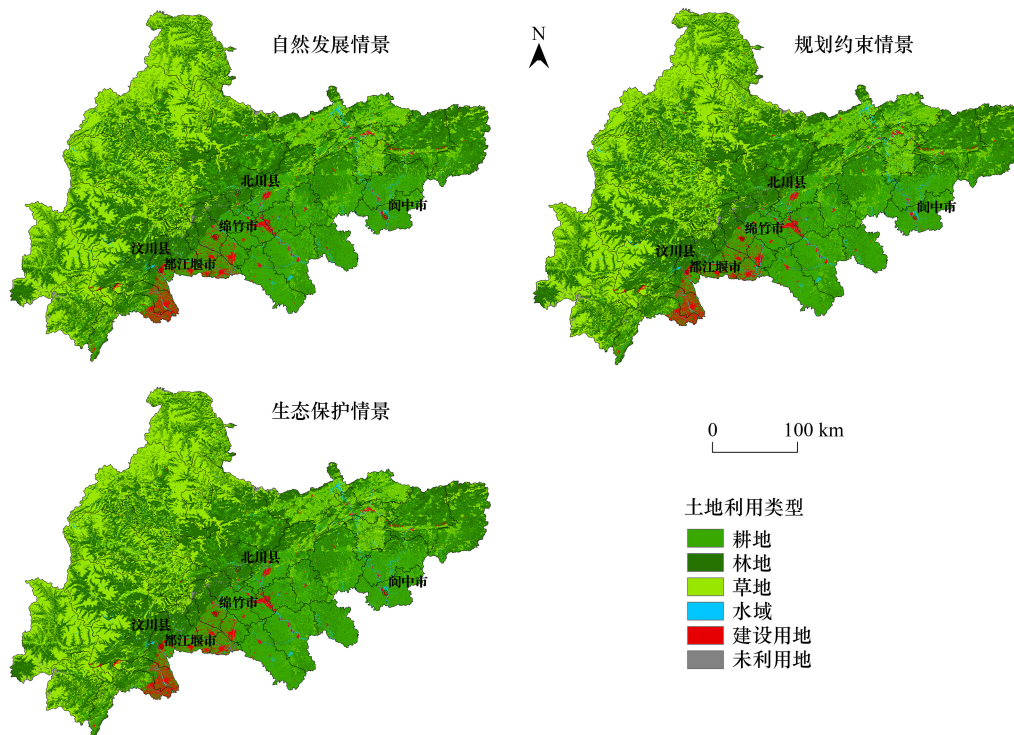


图 8 2030 年研究区土地利用多情景模拟结果

Fig.8 Results of multi-scenario simulation of land use in 2030

197.54km², 草地共增加 168.7km², 水域共减少 33.33km², 建设用地共增加 449.66km², 未利用地减少 4.29km²。

规划约束情景下, 耕地、林地得到一定程度保护, 建设用地总规模得到限制, 在该情景下, 2030 年模拟结果耕地减少了 320.93km², 相对自然发展情景耕地减少的情况得以好转; 该情景下林地较 2020 年减少了 194.72km², 与自然发展情景相比, 林地缩减数量更少; 规划约束情景下草地增加 169.13km², 水域减少 33.06km², 建设用地增加 386.58km², 未利用地减少 4.84km²。

在生态保护情景下, 林地、草地等具有生态价值的用地类型得到相应保护, 在此情景下, 耕地、林地、未利用地与 2020 年实际土地利用数据相比, 分别减少了 381.04km²、190.48km²、5.46m², 其中林地栅格数量虽处于减少趋势, 但与自然发展情景及规划约束情景相比, 生态保护情景下的林地缩减量得到了控制; 生态保护情景下, 2030 年研究区草地、建设用地均呈增加趋势, 分别增加的面积为 231.02km²、381.43km², 其中草地增加栅格数明显大于其他两种情景, 建设用地扩张程度明显小于自然发展情景且小于规划约束情景。

由于研究区在地理位置以及社会经济结构上的特殊性, 在三种情景下, 草地面积均被压缩; 在规划约束情景下耕地减少得到较为明显的改善, 但由于西部耕地资源短缺, 人地矛盾加剧, 耕地保护力度还需加大; 在自然发展情景下, 建设用地增长未被管控, 建设用地扩张大大压缩了其他地类空间, 而在规划约束情景特别是生态保护情景下研究区建设用地增涨幅度较小, 较难满足研究区经济发展的需要。因此需要提出一种综合集成各种情景优点, 既能更好地保护耕地与具有生态功能的林草地, 又能更好地满足研究区经济发展需求的土地利用方案。

4 斑块权衡与多情景综合集成

4.1 待权衡斑块的定义与提取

在未来国土空间开发与土地利用规划过程中, 一定存在重点关注区域与可优化空间。将三种情景模拟结果进行叠加分析, 将某像元的用地类型设置为 A, 其中自然情景下该像元用地类型为 A1, 规划约束情景下该

像元用地类型为 A2,生态保护情景下该像元用地类型为 A3,若自然情景下该像元用地类型与规划约束情景下用地类型相同,则有 $A1 = A2$,若自然情景下该像元用地类型与规划约束情景不同,则有 $A1 \neq A2$,在此基础上将三种情景不同结果进行排列组合,共五种可能情况(图 9),根据不同的情况提取斑块,其中 $A1 = A2 = A3$ 时,该斑块三种情景下用地类型相同,不存在用地类型冲突,将此类对象进行提取,当 A1、A2、A3 中有任意二者不等时,表示该斑块不同情景间用地类型存在冲突,故判定其为待权衡斑块,将此类斑块进行提取。在未来的国土空间规划与开发中,应重点关注与慎重考虑这些存在差异的区域。

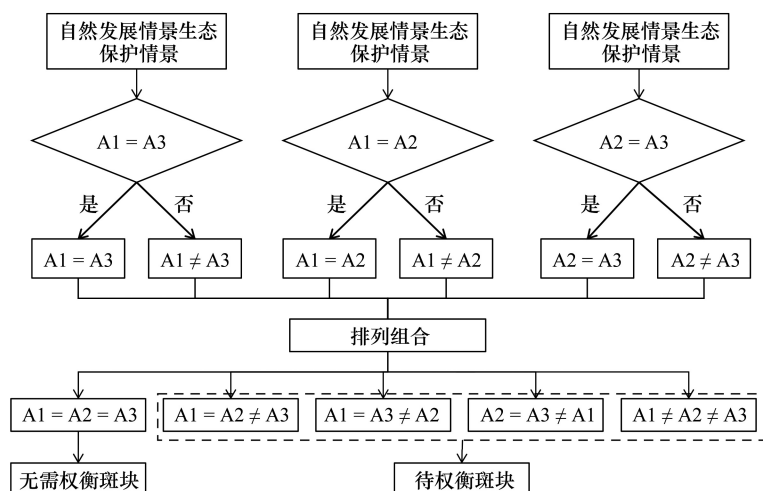


图 9 待权衡斑块定义与判定原理示意图

Fig.9 The principle of plaque definition and determination to be weighed

A1 表示自然发展情景下某像元的地质; A2 表示规划约束情景下某像元的地质; A3 表示生态保护情景下某像元的地质

4.2 待权衡斑块的多层级权衡判定

参考耕地质量等别、城建用地标准等相关政策与规程文件,结合研究区实际情况,设置生态综合评价等级是否为 V 级为第一级判定依据,坡度是否大于 25° 为第二级判定依据,研究区 2020 年土地利用现状作为第三级判定依据,林线分布海拔^[32-33]作为第四级判定依据,主体功能区划分作为第五级判定依据,整理出待权衡斑块多层级权衡判定的基本逻辑如下:

生态综合评价为 V 级的区域应以生态效益优先,保护林草地,限制林草地转出;坡度 $>25^\circ$ 的区域更低于建设用地适宜性过低,应考虑还林还草;当待权衡图斑的生态保护需求度、坡度等条件较为相似时,通过现状用地类型、林线分布、主体功能区划分进行判定;判定应综合考虑经济效益与生态效益,其中生态效益以林草地优先,经济效益以建设用地优先;根据研究区实际情况,研究区绝大部分水域坡度不超过 25° 。

根据以上判定逻辑,将待权衡斑块转为矢量数据并新建生态保护需求度是否为 V 级(1 是,0 否)、坡度是否大于 25° (1 是,0 否)、2020 年土地利用类型(1 耕地,2 林地,3 草地,4 水域,5 建设用地,6 未利用地)、海拔是否大于 3500m(1 是,0 否)、主体功能区划分(1 农产品主产区,2 重点开发区)等多个字段,通过 Python 等编程手段实现自动权衡判定。

4.3 基于权衡判定的综合集成结果

通过权衡判定将待权衡斑块赋予相对应的土地利用类型后转为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的栅格,与三种情景下均为耕地、林草地、水域及其他用地、建设用地的图层进行合并集成,得到基于权衡判定结果的土地利用方案(图 10)。

为方便计算统计,也为了更直观地对比三种情景与权衡判定集成方案的差异,将单位换算为平方千米进行比较,计算结果如表 6 所示。

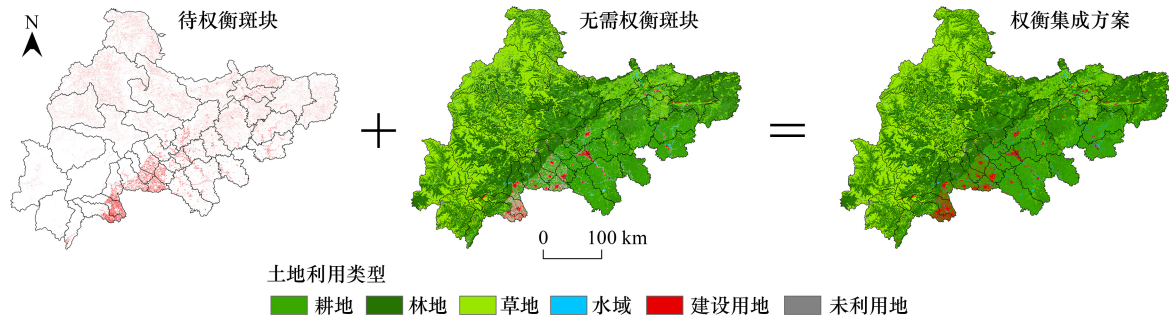


图 10 多情景土地利用权衡集成示意图

Fig.10 Integration of multi-scenario land use tradeoffs

表 6 集成结果与三种情景的比较/km²

Table 6 Comparison of trade-off results with the three scenarios

方案名 Schemes	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
2030 年自然发展情景 Natural development scenario	25770.99	35638.19	28172.8	794.12	1991.82	301.44
2030 年规划约束情景 Planning constraint scenario	25831.1	35641.01	28173.23	794.39	1928.74	300.89
2030 年生态保护情景 Ecological conservation scenario	25770.99	35645.25	28235.12	794.14	1923.59	300.27
权衡集成方案 Trade-offs solution	25904.15	35847.67	27878.23	793.36	1944.83	301.12

由上表可知权衡集成方案中,耕地面积较自然发展情景模拟结果增加了 133.16km²,较规划约束情景模拟结果增加了 73.05km²,较生态保护情景模拟结果增加了 133.16km²,由此可见在权衡集成土地利用方案之下,研究区耕地得到了更好的保护;林地较自然发展情景模拟结果增加了 209.48km²,较规划约束情景增加了 206.66km²,较生态保护情景增加了 202.42km²,从林地面积上看,权衡集成的土地利用方案林地面积明显大于其他三种情景,林地得到了较好的保护;权衡集成方案中建设用地面积为 1944.83km²,较自然发展情景减少了 46.99km²,较规划约束情景增加了 16.09km²,较生态保护情景增加了 21.24km²,从建设用地数量上看,权衡判定方案的建设用地面积仅次于自然发展情景,高于规划约束情景与生态保护情景。权衡集成土地利用方案下,耕地、林地都得到了更好的保护,同时建设用地也能较好的发展,因此,合理的权衡判定对未来土地利用模拟研究区起到了优化的作用,能在未来的土地利用规划中更好地兼顾生态保护与经济发展的需要。

5 讨论

多情景土地利用模拟的意义在于研究不同情景不同导向下的土地利用结构发展趋势,为未来的国土空间规划布局提供建议与参考。从空间分布上看,多情景土地利用模拟结果基本符合新一轮国土空间规划布局:未来耕地主要集中分布于研究区东南部地势平坦的“粮油主产区”,如中江县、三台县、盐亭县、梓潼县等区县;未来建设用地及其增长主要集中分布于“成都平原经济区”及其周边地区,如大邑县、什邡市、广汉市等区县;林草地主要分布于西部高原山地广布的“川西北生态示范区”,该地区作为高生态组分与落后发展交织区域,在发展高原特色牧业的同时也要注重对林草地的保护。

龙门山过渡带作为多种地形单元、多类国土空间交界处,各类用地空间需求存在多样性与更强的竞争性,传统的自然发展情景、规划约束情景以及生态保护情景三种情景的用地情况对比之下各有优劣,均较难满足龙门山过渡带的实际土地利用需求,如何权衡生态环境保护、社会经济发展与粮食生产安全之间的关系显得

尤为重要。故本文在多情景模拟基础上综合考虑了三种不同情景的优点,并通过斑块权衡与集成的方式提出新的土地利用集成方案,在此方案之下(表6),建设用地扩张规模既能保证经济发展需求,又能得到合理控制,耕地、林地、草地面积均大于传统多情景土地利用模拟结果,表明在该方案下,龙门山过渡带的耕地、林地、草地均能得到较好的保护。因此,基于多情景土地利用结果提出的权衡集成方案可以更好地协调生态保护、农业生产、经济发展之间的关系,更能适应未来土地利用的多方面多层次的需求。

从基于神经网络 CA 与 Markov 链的 FLUS 模型虽然能很好地对未来土地利用情况进行模拟,但在 FLUS 模型模拟未来土地利用过程中,各土地利用类型需求量是以转移概率或历史数据为基础来进行预测;在对驱动因子的选取方面,由于 FLUS 模型自身要求必须使用可量化可栅格化的因子,限制了因子的选取。二者均可能会在一定程度上影响模拟精度。

6 结论

本研究选取龙门山过渡带这一典型山地-平原过渡区,在生态服务功能重要性与生态脆弱性综合评价基础上划定了不同情景的限制转换区,对 2030 年该区域土地利用情况进行了多情景模拟,在此基础上进行了用地斑块权衡,提出了基于多情景模拟结果的权衡集成土地利用方案,主要结论如下:

FLUS 模型在山地-平原过渡区域仍具有较强的适用性,模拟结果 Kappa 系数为 0.8282,整体精度为 0.8834,可以较好地模拟该区域未来土地利用变化进行模拟,未来该区域国土空间规划可以参考此模型模拟结果。

在三种不同情景下,研究区耕地、林地、水域、未利用地总体处于缩减状态,其中耕地减少尤为明显,减少面积均在 300km² 以上,耕地仅在规划约束情景下缩减较少,得到了相对较好的保护;草地、建设用地总体处于扩张状态,在自然发展情景下建设用地增长程度较高,在规划发展情景与生态保护情景增量分别为 386.58km² 与 381.43km²。

在基于用地斑块权衡提出的多情景权衡集成土地利用方案下,耕地、林地都得到了更好的保护,同时建设用地也能较好的发展,综合考虑并了耕地保护、生态保护、经济发展等多种需求。通过生态综合评价等级、坡度、海拔、主体功能区等多条件多层次的逻辑判定方式,可以实现较好地兼顾耕地保护、生态保护、经济发展多种需求的用地斑块自动化权衡与判定。

参考文献(References):

- [1] 宋百媛,侯西勇,王晓利,刘玉斌. 海岸带土地利用变化多情景模拟——以山东海岸带为例. 海洋科学, 2022, 46(1): 22-33.
- [2] 汤佳,胡希军,韦宝婧,罗紫薇,赵思文,王烨梓. 基于 FLUS 模型的流域土地利用变化预测及水文响应评估. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 63-69.
- [3] 薛贝,张红旗,刘长星,许尔琪,蔺小虎. 贵州六盘水市土地利用动态模拟研究. 山地学报, 2018, 36(1): 132-142.
- [4] 蔡成瑞,舒帮荣,朱慧,袁秀,雍新琴. 顾及区域异质性驱动的土地利用变化模拟模型研究. 中国土地科学, 2020, 34(11): 38-47.
- [5] 史焱文,李小建,许家伟. 基于 GeoSOS 的乡村工业化地区土地利用变化模拟分析——以河南省长垣县为例. 地域研究与开发, 2018, 37(5): 140-146.
- [6] 王惠,许月卿,刘超,黄安,卢龙辉,郑伟然. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应——以河北省张家口市为例. 北京大学学报:自然科学版, 2019, 55(3): 509-518.
- [7] Guan D J, Gao W J, Watari K, Fukahori H. Land use change of Kitakyushu based on landscape ecology and Markov model. 地理学报:英文版, 2008, 18(4): 455-468.
- [8] Yecui HU, Y Zheng, X Zheng. Simulation of land-use scenarios for Beijing using CLUE-S and Markov composite models. 中国地理科学:英文版, 2013. 23(001): 92-100.
- [9] 谢凌凌,许进龙,臧俊梅,黄天能. 基于 Markov-FLUS 模型的广西土地利用变化模拟预测. 水土保持研究, 2022, 29(2): 249-254, 264.
- [10] 乔治,蒋玉颖,贺瞳,卢应爽,徐新良,杨俊. 土地利用变化模拟:进展、挑战和前景. 生态学报, 2022(13): 1-12[2022-05-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220316.1653.005.html>
- [11] 李少英,刘小平,黎夏,陈逸敏. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展. 遥感学报, 2017, 21(3): 329-340.

- [12] 邓华, 邵景安, 王金亮, 高明, 魏朝富. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟. 地理学报, 2016, 71(11): 1979-1997.
- [13] Hermogenes De Mendonça L, Ebach M C. A review of transition zones in biogeographical classification. Biological Journal of the Linnean Society, 2020, 131(4): 717-736.
- [14] Tang L J, Yang K M, Jin W Z, Wan G M, Lü Z Z, Yu Y X. Differential tectonic deformation of the Longmen Mountain thrust belt, western Sichuan Basin, China. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(1): 158-169.
- [15] 吕远洋, 刘志红, 叶帮苹, 张思, 张洋. 川西高原精细化生态敏感性评价. 水土保持研究, 2016, 23(1): 272-277.
- [16] 杨雪婷, 邱孝枰, 徐云, 朱付彪, 刘运伟. 典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及动态特征——以川西山区为例. 生态学报, 2021, 41(19): 7555-7567.
- [17] 袁磊, 杨昆. 土地利用变化驱动力多尺度因素的定量影响分析. 中国土地科学, 2016, 30(12): 63-70.
- [18] 赵轩, 彭建东, 樊智宇, 杨晨, 杨红. “双评价”视角下基于 FLUS 模型的武汉大都市区土地利用模拟和城镇开发边界划定研究. 地球信息科学学报, 2020, 22(11): 2212-2226.
- [19] 张晓荣, 李爱农, 南希, 雷光斌, 王昌博. 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. 地球信息科学学报, 2020, 22(12): 2393-2409.
- [20] 杨露, 颜耀文, 宗乐丽, 邱天, 焦继宗. 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. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568-579.
- [21] 孙宇晴, 杨鑫, 郝利娜. 基于 SRP 模型的川藏线 2010—2020 年生态脆弱性时空分异与驱动机制研究. 水土保持通报, 2021, 41(6): 201-208.
- [22] Rimal B, Zhang L F, Keshkar H, Haack B, Rijal S, Zhang P. Land use/land cover dynamics and modeling of urban land expansion by the integration of cellular automata and Markov chain. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018, 7(4): 154.
- [23] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 石洪, 欧金沛. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟. 热带地理, 2019, 39(3): 397-409.
- [24] 李丹, 胡国华, 黎夏, 刘小平, 丁冠乔, 蔡玉梅. 耦合地理模拟与优化的城镇开发边界划定. 中国土地科学, 2020, 34(5): 104-114.
- [25] 蔡德峰, 张扬建, 丛楠, 殷国栋, 王荔, 张明勋, 俎佳星, 周全, 陈宁, 刘瑶杰, 蓝健均, 蔡绍荣, 张戈. 藏中联网工程生态系统服务功能重要性评价. 生态学报, 2021, 40(2): 593-603.
- [26] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. 生态学报, 2013, 33(1): 168-178.
- [27] 贾晶晶, 赵军, 王建邦, 高超, 常若莹. 基于 SRP 模型的石羊河流域生态脆弱性评价. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 34-41.
- [28] 王芳莉. 基于 FLUS 模型的陇南市土地利用变化与模拟[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [29] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 邱全毅, 王琳, 唐立娜. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [30] 卞子浩, 马小雪, 龚来存, 赵静, 曾春芬, 王腊春. 不同非空间模拟方法下 CLUE-S 模型土地利用预测——以秦淮河流域为例. 地理科学, 2017, 37(2): 252-258.
- [31] 张经度, 梅志雄, 吕佳慧, 陈进钊. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 531-542.
- [32] 曾瑞琪, 赵家国, 刘银占, 陈国鹏, 鲜骏仁. 川西林线交错带岷江冷杉幼苗异龄叶形态对长期模拟增温的响应. 生态学报, 2018, 38(11): 4008-4017.
- [33] 朱万泽, 冉飞, 李迈和, 王文志, 贾敏. 贡嘎山高山林线动态与生理形成机制. 山地学报, 2017, 35(5): 622-628.