

耿思筱,杨 志,党小虎,等. 基于 SD-FLUS 模型的宁夏土地利用多情景模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 806-818.
GENG Si-xiao, YANG Zhi, DANG Xiao-hu, et al. Multi-scenarios Simulation of Ningxia Land Use in China Based on SD-FLUS Model
[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 806-818.

DOI:10.19814/j.jese.2022.08042

• 环境与可持续发展专刊 •

基于 SD-FLUS 模型的宁夏土地利用多情景模拟

耿思筱¹, 杨 志², 党小虎^{1*}, 隋博洋¹, 曹小曙^{3,4},
李 鹏^{5,6}, 郑智宇¹

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 宁夏回族自治区水土保持监测总站,
宁夏 银川 750002; 3. 陕西师范大学 自然资源与国土空间研究院, 陕西 西安 710062;
4. 陕西师范大学 西北城镇化与国土环境空间模拟重点实验室, 陕西 西安 710062;
5. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 6. 西安理工大学
旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要:土地利用变化会对区域发展及生态环境产生重要影响。通过分析宁夏 2005~2020 年土地利用变化, 综合自上而下的系统动力学(SD)模型和自下而上的未来土地利用模拟(FLUS)模型(SD-FLUS 模型), 结合国际耦合模式比较计划第 6 阶段(CMIP6)提出的耦合共享社会经济路线和代表性浓度路线(SSP-RCP)情景, 模拟了 2035 年不同情景下的土地利用变化。结果表明:①SD 模型模拟的历史时期各类型土地利用面积误差均小于 5%, FLUS 模型模拟的 2020 年土地利用总体精度为 93%, Kappa 指数为 0.90, 模型精度和可靠性总体符合要求。②2035 年所有情景下的建设用地均呈现增加趋势, 增长速率从大到小的情景依次为 SSP585 情景、SSP245 情景、SSP119 情景; 所有情景下, 林地面积增加, 水域面积保持稳定, 草地面积呈现不同程度的减少; 耕地面积在 SSP585 情景下增加, 在 SSP245 情景下稳定, 在 SSP119 情景下减少。③在 SSP119 情景下, 建设用地扩张的同时, 生态用地被挤占的程度最小, 该情景兼顾社会经济发展和生态保护两种需求, 可以作为宁夏黄河流域生态保护和高质量发展先行先试区的未来土地利用参考模式。

关键词:土地利用; 多情景模拟; SD-FLUS 模型; SSP-RCP 情景; 生态保护; 高质量发展; 宁夏

中图分类号: X321; F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)04-0806-13

Multi-scenarios Simulation of Ningxia Land Use in China Based on SD-FLUS Model

GENG Si-xiao¹, YANG Zhi², DANG Xiao-hu^{1*}, SUI Bo-yang¹, CAO Xiao-shu^{3,4},
LI Peng^{5,6}, ZHENG Zhi-yu¹

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, Ningxia, China;
3. Natural Resources and National Land Use Research Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory for Urbanization and Environment Simulator in Northwest China, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China; 5. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2023-03-02

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 宁夏回族自治区水土保持监测总站项目(GZ4-21-05-069/-ZC-F); 国家自然科学基金项目(42271309)

作者简介: 耿思筱(1999-), 女, 陕西商洛人, 工学硕士研究生, E-mail: g2384946023@163.com.

* 通讯作者: 党小虎(1968-), 男, 宁夏隆德人, 教授, 理学博士, E-mail: dangxh2018@xust.edu.cn.

6. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Land use change has a significant impact on regional development and ecological quality. The land use change in Ningxia from 2005 to 2020 was analyzed; and based on the scenarios of CMIP6 shared socioeconomic pathways and the representative concentration pathways (SSP-RCP), the system dynamics (SD) model and future land use simulation (FLUS) model were integrated to simulate the possible land use change of Ningxia in 2035. The results show that ① compared to the land use changes in the historical periods, the area error for the land use simulated by SD model is less than 5%, and the overall accuracy of FLUS model for the land use in 2020 is 93% with the Kappa index of 0.90, indicating that the model accuracy and robustness are satisfactory. ② The construction land areas simulated under all scenarios increase, and the scenarios are SSP585, SSP245 and SSP119 in the descending order of growth rate; the simulated area of forest increases with a constant water area and a reduced area of grassland in 2035; the simulated area of cultivated land increases under SSP585 scenario, remains stable under SSP245 scenario, and decreases under SSP119 scenario. ③ Under SSP119 scenario, the construction land expands with the least loss of ecological land, which takes a trade-off of socio-economic development and ecological protection into account, thus can be used as a reference paradigm for future land use in Ningxia, which is the pilot area of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin.

Key words: land use; multi-scenario simulation; SD-FLUS model; SSP-RCP pathway; ecological protection; high-quality development; Ningxia

0 引言

土地作为非再生资源,既担负着粮食安全的重任,还要满足人类发展的其他需求。人类参与的土地利用过程(包括森林砍伐、农业开发和城市建设等)导致温室气体加速排放^[1],最终将对全球生物多样性造成不可逆转的破坏^[2]。而土地利用变化系统内的反馈是通过空气污染、自然资源短缺和粮食安全风险等对人类福祉及社会可持续发展产生的不良影响表现出来的^[3]。因此,科学预测和合理规划国土空间开发利用是实施土地资源管理的有效手段,借助模型预测各土地利用类型的需求总量,模拟不同情景下各土地利用类型的空间格局,探讨其空间格局变化的异质性,可为区域土地资源流转、产业布局调整及城市发展提供参考依据。

目前,常用的土地利用/覆被变化(Land Use/Cover Change,LUCC)模拟模型主要包括量化土地需求的数量模型、微观土地空间分配的空间模型以及综合模型^[4]。其中,数量模型侧重于分析各土地利用类型的面积变化及变化速率等特征,研究引起土地利用变化的直接因子和潜在因素,以系统动力学(System Dynamics,SD)模型^[5-6]、马尔科夫

(Markov)模型^[7]最常见,但数量模型以模拟计算各土地利用类型的面积为主要特点,缺少对空间分布格局的描述,难以反映空间格局变化。空间模型侧重于模拟土地利用的空间分配,常见模型有元胞自动机(Cellular Automata,CA)模型^[8-9]、CLUE(Conversion of Land Use and Its Effects)模型^[10-11]、CLUE-S模型^[12-13]、未来土地利用模拟(Future Land Use Simulation,FLUS)模型^[14-15]、斑块生成土地利用模拟(Patch-generating Land Use Simulation,PLUS)模型^[16-17]及多智能体(Agent-based Model,ABM)模型^[18-20]等。单一的空间模型可视化土地利用变化的具体区域和范围,但需要输入对应年份的土地面积需求数量。为取长补短、突破单一模型固有的局限性,现有研究构建了诸多综合模型,将数量模型模拟的用地需求通过空间模型可视化,更加合理地将各类土地在空间上进行分配,如多智能体模型与CA模型结合分析农村土地利用变化的驱动机制^[21],SD模型与CA模型结合预测土地利用时空变化^[22]。对于土地利用/覆被变化模拟,CA模型缺少元胞状态转变限制模块,只能针对某一地类进行模拟,具有一定限制性。多智能体模型是未来土地利用模拟的一种主流模型,是多学科

交叉融合的最新成果,但是多智能体模型的构建中如何定义多智能体(Agent)及其行为,如何对智能体进行抽象化,智能体对外部信息如何进行反馈,仍是模拟难点。SD-FLUS 模型相较于上述模型,涵盖的驱动因子较为全面。该模型将自然因素和人为影响因素充分纳入长期多类型的土地利用变化模拟中,有效模拟土地利用/覆被变化过程中的不确定性,并分析自然、气候、人类及技术创新等驱动因子对土地利用/覆被变化时空异质性的影响^[13],被广泛应用于城市扩张模拟^[23]、生态承载力预测^[24]、中国 2050 年的土地利用时空变化模拟^[14]以及中国海岸带城市的土地利用需求变化预测^[25]等。

情景模拟是土地利用模拟的热点问题,但目前研究多以模拟自然发展、生态保护及耕地保护情景^[26-27]下的土地利用空间格局为主,或以“三区三线”数据为基础的土地利用模拟及城镇开发边界划定^[28]。与之相比,国际耦合模式比较计划第 6 阶段(CMIP6)提出了耦合共享社会经济路线(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)和代表性浓度路线(Representative Concentration Pathway, RCP)情景^[29-30]。预测该耦合情景下土地利用时空变化可能是未来土地利用/覆被变化领域的核心工作之一,现阶段的研究更多关注大尺度(如全球)土地利用/覆被变化,而综合 SSP-RCP 情景的模拟需要更多关注中小尺度(如省、市)土地利用时空变化,这方面工作仍需要加强。

本文基于 SD-FLUS 模型,以宁夏为研究对象,利用 CMIP6 的 SSP-RCP 情景,考虑社会经济状况和生态保护政策,设计了 SSP119、SSP245、SSP585 等 3 种情景;基于 2005~2020 年土地利用数据,构建并验证宁夏土地利用耦合模型,对上述 3 种情景下的土地利用变化进行模拟,以期为宁夏社会经济发展、生态环境保护、土地资源分配以及区域可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

宁夏地处我国西北内陆的干旱与半干旱区,属于黄河流域(图 1),经度范围为 104°17'E~107°39'E,纬度范围为 35°14'N~39°23'N。其地形南北狭长,地势南高北低,年均气温为 6℃~10℃,年降水量在 280 mm 左右,其中北部年均降雨量为 200 mm 左右,中部年均降雨量为 300 mm 左右,南部年均降雨量在 400 mm 以上。宁夏社会经济发展水平远低于东部发达地区,2020 年总人口约为 720 万人,地

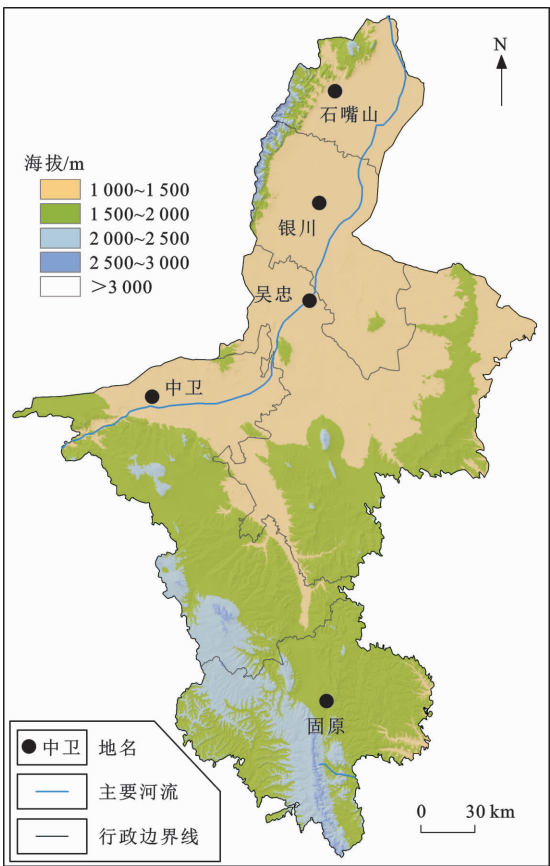


图 1 宁夏地理位置图

Fig. 1 Geographical Location Map of Ningxia

区生产总值约为 3 920 亿元,全区平均城镇化水平达到 65%。按自然环境条件、社会经济发展水平以及农业开发模式,宁夏可分为北部平原区、中部干旱荒漠草原区和南部黄土丘陵沟壑区^[27]。北部平原区社会经济发展和城市化水平较高,中部干旱荒漠草原区生态脆弱,经济发展缓慢;南部黄土丘陵沟壑区水土流失相对比较严重。

宁夏作为我国西部重要的生态安全屏障区,是我国生态安全战略格局“两屏三带一区多点”“黄土高原—川滇生态屏障”“北方防沙带”和“其他点块状分布重点生态区域”的重要组成部分。宁夏地处黄河中上游及黄土高原与沙漠的交汇地带,地理位置特殊,在全国生态安全战略格局中具有特殊地位。区域内气候波动明显,水土流失严重,自然灾害较为频繁,景观破碎度较大,面临着生态保护与区域发展的双重压力。实现宁夏生态环境保护与社会经济协调发展是当前亟需解决的关键问题^[31]。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源及预处理

本文使用的数据主要包括土地利用数据、基础

地理信息数据、社会经济数据和未来气候数据。

土地利用数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(网址为 <https://www.resdc.cn/>),包括2005、2010、2015、2018、2020年共5期全国土地利用数据,空间分辨率为30 m。在ArcGIS 10.6软件中利用空间分析模块,提取宁夏土地利用数据并将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地等6类。

基础地理信息数据主要为数字高程模型(DEM)数据,来源于地理空间数据云(网址为 <https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为90 m。坡度和坡向是利用ArcGIS软件中的表面分析,根据DEM数据提取所得;距水域的距离和距城镇的距离基于2015年及2020年土地利用数据提取,并利用欧氏距离计算所得;道路数据来源于OpenStreet-Map网站(网址为 <http://www.openstreetmap.org/>),距道路的距离也是利用欧式距离计算所得。

社会经济数据主要为历史时期人口、经济、固定资产投资等统计数据,来源于2005~2020年宁夏统计年鉴以及国民经济公报。未来人口、GDP数据采用社会共享经济路径下的预测数据。人口密度来源于WorldPop平台(网址为 <https://www.worldpop.org/>),GDP数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(网址为 <https://www.resdc.cn/>),其空间分辨率均为1 km。

未来气候数据来源于IPCC的CMIP6(网址为 <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/>)。国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(网址为 <http://loess.geodata.cn/>)具体发布了CMIP6下2021~2100年中国1 km分辨率多情景多模式的逐月降水量、平均气温数据。通过Delta空间降尺度的方法生成中国1 km分辨率的网格数据,再经剪裁、统计计算宁夏2021~2035年的年均气温和年降水量。

以土地利用数据为基准,最终所有数据(表1)在ArcGIS 10.6软件中经过重投影、重采样及裁剪等栅格处理,统一为同一坐标系(Krasovsky_1940_Albers)下300 m分辨率的栅格数据,并保证数据的行列数以及投影坐标完全一致。

2.2 分析方法

本文采用模型模拟的方式,耦合SD模型与FLUS模型对宁夏的土地利用变化进行预测和模拟。具体耦合过程如下:通过构建SD模型,模拟各土地利用类型在时间序列上、多驱动因子下的数量关系,将SD模型预测到的2035年土地利用需求数

据作为FLUS模型的数量预测输入,在FLUS模型中完成土地利用空间格局变化的模拟和分配。

2.2.1 SD模型

SD模型是通过简单的建模方式及复杂的非线性关系,对城市复合系统的土地利用变化进行定量仿真模拟,预测时间序列上土地利用类型的数量变化。本文根据宁夏的位置特征及数据资料的可获取性,将SD模型的模拟期定为2005~2035年,时间步长为1年。土地利用历史变化阶段对应2005~2020年,历史阶段数据用于验证模型的准确性,所有土地利用类型面积的误差绝对值均小于5%,模型有效。情景模拟的基准年为2020年,通过输入不同情景的参数来模拟未来土地利用需求的变化。

2.2.2 FLUS模型

FLUS模型是基于对传统CA模型的改进,并引入人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)将元胞转化为各土地利用类型的概率,同时结合惯性系数与轮盘竞争机制以表达模拟过程中各土地利用类型之间的互动与竞争机制^[32-33]。首先,用人工神经网络结合驱动因子计算各元胞单元的土地利用类型适宜性概率,即每种土地利用类型在每个像元上出现的概率;其次,在CA模块中,结合适宜性概率、领域影响因子、惯性系数和转化成本,估算未来土地利用变化结果的总体概率;最后,在估算每次迭代的总体概率后,FLUS模型采用轮盘赌竞争机制来决定栅格单元是否发生土地利用类型的转换。

2.2.3 FLUS模型中空间转化限制因子及敏感性

邻域权重是土地利用类型的扩张能力,范围为[0,1]。邻域权重越接近1表示扩张能力越强,其根据各土地利用类型扩张面积的占比来计算^[34]。空间转化限制因子通过成本矩阵进行设定。根据研究区实际情况,构建不同情景下土地利用转移成本矩阵(表2)。

本文在FLUS模型中进行多因子叠加训练适宜性概率分布的同时,对研究区的样本采样方式和采样比例进行敏感性分析。采样方式分为均匀采样和随机采样两种,采样比例分别为3%、5%、10%、15%。实验发现,测试样本的精度随着采样比例的增加而略有提高,但训练的运算量相对较大。为保证选择的样本不来自同一区域及训练时间不宜过长的综合考虑,本文选用随机采样,采样比例设为10%,隐藏层设定为12,计算所得训练均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为0.287,说明训

表 1 数据来源
Table 1 Required Data

类别	数据名称	时间	数据属性	空间分辨率	数据来源
土地利用	土地利用分布	2005~2020 年	栅格	30 m	中国科学院资源与环境科学数据中心
社会经济	人口密度	2015 年、2020 年	栅格	1 km	WorldPop 平台
	GDP	2015 年、2019 年			中国科学院资源与环境科学数据中心
	人口总量	2005~2020 年	统计数据		宁夏统计年鉴、国民经济公报
	城镇化率				
	GDP				
地形	高程	2012 年	栅格	90 m	地理空间数据云
	坡度				由 DEM 计算所得
	坡向				由 DEM 计算所得
基础地理信息	水域分布	2015 年、2020 年	矢量		基于 2015 年、2020 年土地 利用数据提取
	城镇居民点分布				
	路网分布	2015 年、2020 年	矢量		OpenStreetMap 网站
气候	年平均气温	2005~2035 年	栅格	1 km	国家地球系统科学数据中心 黄土高原分中心
	年降雨量				

表 2 不同情景下土地利用转移成本矩阵
Table 2 Cost Matrix of Land Use Change Under Different Scenarios

当前土地利用类型	SSP119 情景下的土地利用类型						SSP245 情景下的土地利用类型						SSP585 情景下的土地利用类型					
	G	L	C	S	J	W	G	L	C	S	J	W	G	L	C	S	J	W
G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
L	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
J	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
W	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注：G、L、C、S、J、W 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地；1 代表允许当前土地利用类型发生转换，0 代表不允许当前土地
地利用类型发生转换。

练精度较高。时空尺度上的敏感性通过模型的迭代
次数及数据的空间分辨率进行对比。在时间尺度
上,模拟的时间跨度越长,迭代次数越多,精度越高;
在空间尺度上,元胞的空间分辨率越高,精度越高。
但基于模拟时间的考虑,本文将迭代次数定为 300
次,空间分辨率定为 300 m。

2.2.4 SSP-RCP 耦合情景

IPCC 的 CMIP6 气候情景数据是结合社会经济
和全球气候变化的反馈设计的,耦合了共享社会经
济路线和代表性浓度路线的不同场景,强调不同社
会经济发展模式对气候变化的驱动作用^[29]。

本文选择 SSP119、SSP245、SSP585 等 3 个情
景。其中,SSP119 情景是 SSP1 与 RCP1.9 的综合
场景,代表可持续社会经济发展和低辐射强迫情景;
SSP245 情景是 SSP2 与 RCP4.5 的综合场景,代表
社会经济发展的中间情景和中等辐射强迫情景;
SSP585 情景是 SSP5 和 RCP8.5 的综合场景,代表

着化石燃料大规模使用促使经济高速发展与高辐射
强迫情景^[35-36]。本文中的人口、经济及气候参数是
基于 SSP-RCP 情景下的未来预测数据,经过线性拟
合确定其变化率。此外,在上述耦合情景的基础上,
增加退耕还林还草面积和耕地保护面积 2 个情景变
量,结合多年土地转移的实际面积,确定变化幅度。
具体参数设置详见表 3。

3 结果分析

3.1 SD 模型的建立

本文构建了宁夏土地利用需求 SD 模型(图 2),
主要包括人口、经济、气候和土地利用等 4 个子系
统,主要驱动因子有人口、GDP、气温、降水、城镇
化率、固定资产投资比例以及各产业投资比例等。人
口、经济、气候系统同时作用于土地利用系统,模拟
各土地利用类型的未来发展趋势及需求量的内在联
系。例如,在人口-土地利用系统中,随着人口数量

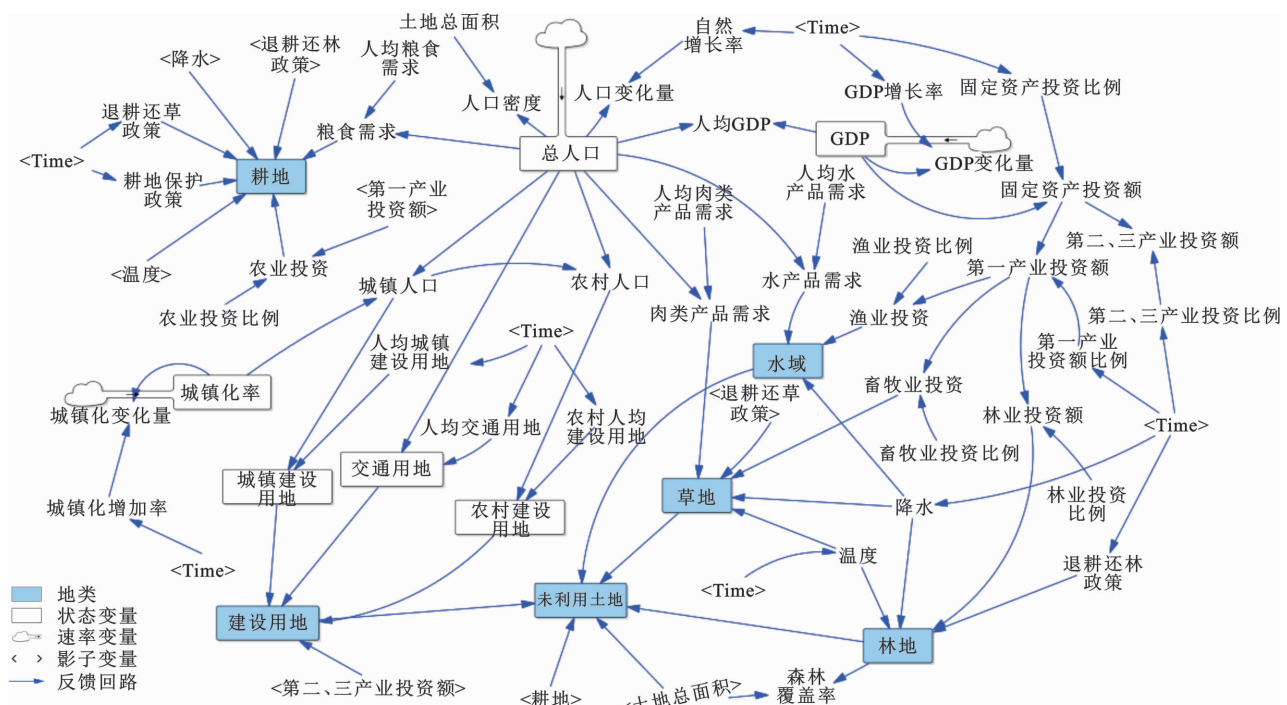


图 2 宁夏土地利用变化 SD 模型

Fig. 2 SD Model of Land Use Change in Ningxia

表 3 不同情景参数设置

Table 3 Parameter Settings for Different Scenarios				
类型	情景变量	SSP119 情景	SSP245 情景	SSP585 情景
人口	人口增长率/%	0.6	1.0	0.8
	GDP 增长率/%	6.5	5.0	7.5
经济	城镇化率/%	0.9	1.0	1.1
	年均降雨量变化/ (mm·年 ⁻¹)	4.375 5	0.685 2	1.322 8
气候	年均气温变化/ (℃·年 ⁻¹)	0.010 2	0.018 1	0.055 1
	退耕还林还草 面积变化	增加 10%	保持不变	下降 10%
保护 政策	耕地保护 面积变化	下降 10%	保持不变	增加 10%

的变化,农产品、水产品、肉类产品等的需求产生变化,因此对土地利用类型的需求也产生反馈作用;在经济-土地利用系统中,各产业的发展及投资比例的变化影响土地利用结构的转化,各变量之间的具体逻辑关系在 SPSS 软件中通过多变量回归和拟合得到。

3.2 历史土地利用时空动态特征

宁夏土地利用总体格局为:以草地、耕地为主,未利用土地、林地次之,建设用地、水域占比最小。2005~2020 年,宁夏林地、建设用地面积增加,草地、未利用土地面积减少,其中建设用地增加最明

显。城镇化率从 2005 年的 42.28% 增加至 2020 年的 64.96%,土地利用转移主要以耕地转为建设用地为主,耕地-建设用地转化的重心在北部平原区,中部干旱荒漠草原区及南部黄土丘陵沟壑区以林地增加及草地缩小为主(图 3)。

3.3 不同情景下的土地利用需求预测

至 2035 年,SSP585、SSP245 和 SSP119 情景下的耕地、林地、水域、建设用地均呈增加趋势,草地和未利用土地呈减少趋势(图 4)。SSP585 情景下,耕地面积增加;SSP245 情景下,耕地面积基本保持稳定;SSP119 情景下,耕地面积小幅下降。所有情景下,城镇化率、人口和 GDP 增长,建设用地面积显著增长。其中,SSP585 情景下建设用地增长率最高,2035 年的建设用地面积增长为 2020 年的 1.5 倍,SSP245 情景次之,SSP119 情景下的建设用地增长率最小。SSP119 情景下,草地面积在 2025 年前略有增加,2025 年后减少,总面积基本保持稳定,其他两种情景下的草地均呈现不同程度的减少,且 SSP585 情景下草地面积减少最为明显。随着时间推移,部分草地自然生长转换为林地,林地面积增加,其中 SSP119 情景下的林地面积显著增加。3 种情景下的水域面积增幅较小,基本保持稳定。未利用土地为总面积与其他土地利用类型面积的差值,其他土地利用类型的变化导致未利用土地面积

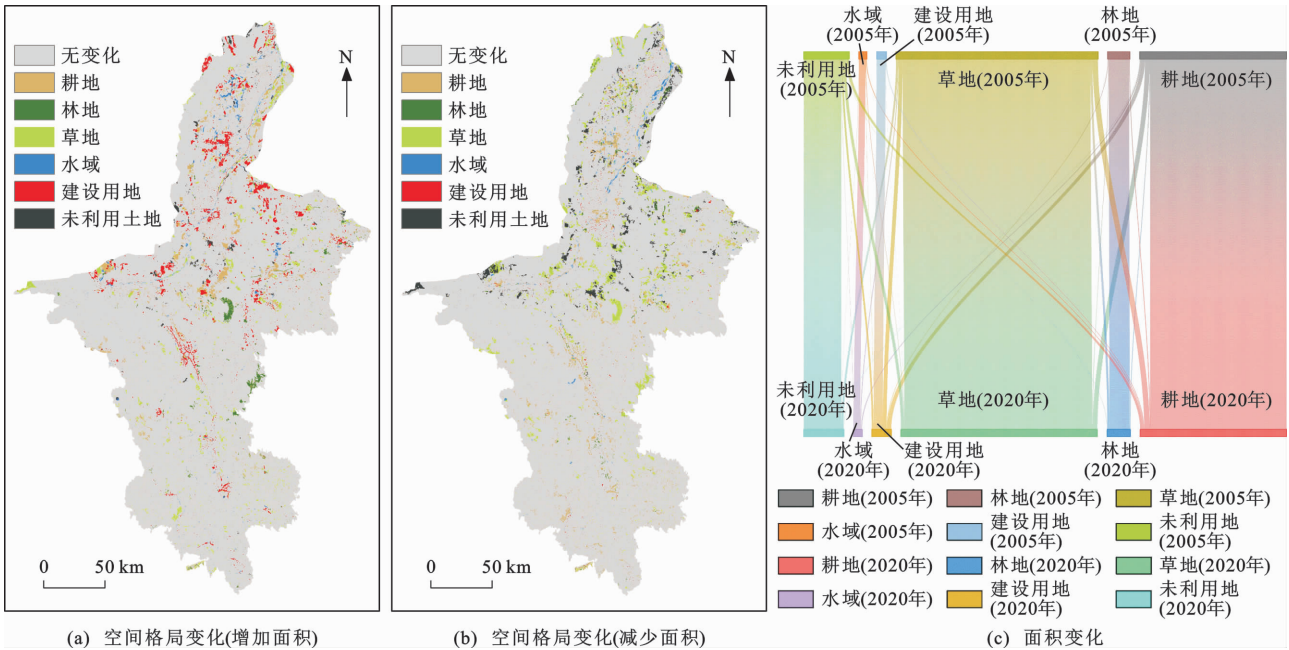


图 3 2005~2020 土地利用变化空间格局及面积变化

Fig. 3 Changes of Spatial Pattern and Area of Land Use Change from 2005 to 2020

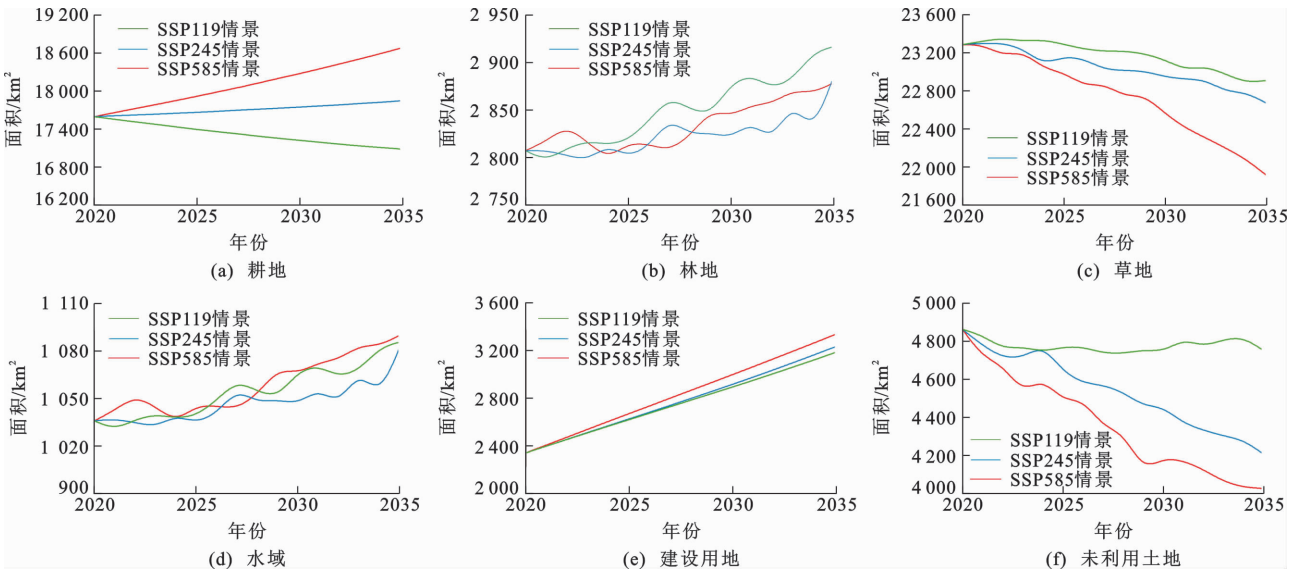


图 4 不同情景下土地利用类型需求预测

Fig. 4 Demand Prediction of Land Use Types Under Different Scenarios

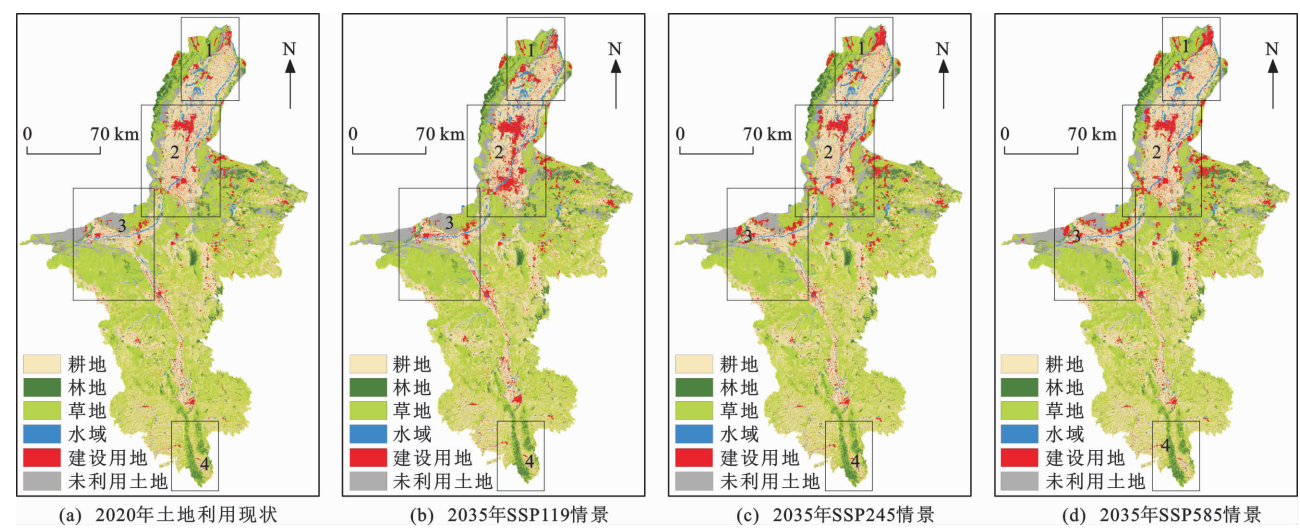
减少。

3.4 不同情景下的土地利用空间格局变化

基于 2005~2015 年的土地利用数据及转移概率模拟 2018 及 2020 年的土地利用,并将模拟结果与实际数据进行比较,整体模拟精度为 93.1%,Kappa 系数为 0.90,模型有效。然后,基于 2020 年的土地利用数据模拟了 2035 年不同情景下的土地利用分布(图 5)。

2035 年宁夏土地利用总体格局与 2020 年相似,北部平原区以耕地和建设用地为主,中部干旱荒

漠草原区以草地和未利用土地为主,南部黄土丘陵沟壑区以耕地和林地为主。与 2020 年土地利用结构相比,2035 年 SSP585 情景下宁夏耕地周边草地和未利用土地以转为耕地为主,以北部的引黄灌溉区耕地周围土地最为明显,SSP245 和 SSP119 情景下的耕地主要表现为被建设用地占用和草地侵蚀;林地主要集中在北部的贺兰山区和南部的六盘山区;草地为占比最大的土地利用类型,SSP585 情景下大部分被建设用地和耕地侵占,SSP119 情景下以南部六盘山区为主的草地自然生长为林地;3 种情



1~4 为转化明显且具北部平原区、中部干旱荒漠草原区、南部黄土丘陵沟壑区代表性的区域编号

图 5 不同情景下土地利用模拟结果

Fig. 5 Simulated Results of Land Use Under Different Scenarios

景下的水域分布基本相似,都以河流为主;建设用地面积大幅增长且变化明显,城市扩张主要发生在北部平原区,SSP585 和 SSP245 情景下,建设用地以草地和未利用土地转入为主,离城市和居民点较近的草地被建设用地占用,SSP119 情景下,建设用地以耕地占用为主;未利用地主要集中于西部的中卫市和东部的盐池等地区,SSP585 情景下被建设用地明显占用,SSP245 和 SSP119 情景下逐渐转变为草地。因为宁夏范围较大,且土地利用转化较为分散,所以选取图 5 中标注的转化明显且具北部平原区、中部干旱荒漠草原区、南部黄土丘陵沟壑区代表性的 4 个区域进行阐述(图 6)。

区域 1、2 分别为石嘴山市、银川市附近区域,用于展示不同情景下建设用地、草地、耕地及未利用土地之间的转化及变化。SSP585 情景下人口和经济增长较快,耕地增加,建设用地扩张明显,建设用地占用区域 1、2 周围草地及未利用土地,耕地侵占区域 2 周围部分草地;SSP245 情景下两个区域都以建设用地扩张为主,但扩张幅度相比 SSP585 情景要小,两个区域均表现为建设用地对周围耕地、草地及未利用地的侵占;SSP119 情景下耕地减少,建设用地扩张最慢但较为集中,对周围耕地进行大量侵占,且以区域 2 周围变化最为显著。

区域 3 为西部中卫市附近一处以草地为主,夹杂少量建设用地、耕地和未利用土地的区域。此区域的建设和未利用土地变化最为明显,建设用地扩张速率从大到小的情景依次为 SSP585 情景、SSP245 情景、SSP119 情景。SSP585 和 SSP245 情

景下土地利用类型转化较为相似,都以建设用地占用草地和未利用土地为主;SSP119 情景下,此区域建设用地占用少量耕地,且变化不明显。

区域 4 为南部的隆德县及泾源县周边区域,主要以草地和林地为主,用于对比不同情景下林地、草地交错带的变化差异。与 2020 年的土地利用格局相比,SSP585 和 SSP245 情景下该区域的林地和草地变化不显著,存在少量的草地向林地转化;SSP119 情景下,林地恢复较为显著,主要侵占周围的草地。

4 讨论

基于 2015~2020 年历史数据的验证结果,宁夏土地利用模型总体精度为 93%,Kappa 系数为 0.90。当 Kappa 系数大于 0.75 时,模拟效果较好。从已有的研究来看,土地利用变化模拟的精度受研究区范围、驱动因子、模型验证时间跨度以及情景参数设计等因素的影响。不同研究尺度中的精度存在一定的差异。孙定钊等模拟的黄土高原土地利用总体精度为 88%^[37],而 Liu 等模拟的全国土地利用总体精度为 75%^[14]。结合本研究来看,小尺度模拟精度总体上相对略高于大尺度。

在 SSP119、SSP245、SSP585 情景下,GDP、固定资产投资比例以及人口总量和城镇化率等增长迅速,城市建设用地扩张显著,这给耕地及适合转为建设用地的其他土地利用类型带来了不小压力。北部平原区经济和人口增长较快,且地势平坦,相较于中部干旱荒漠草原区和南部黄土丘陵沟壑区更适宜于

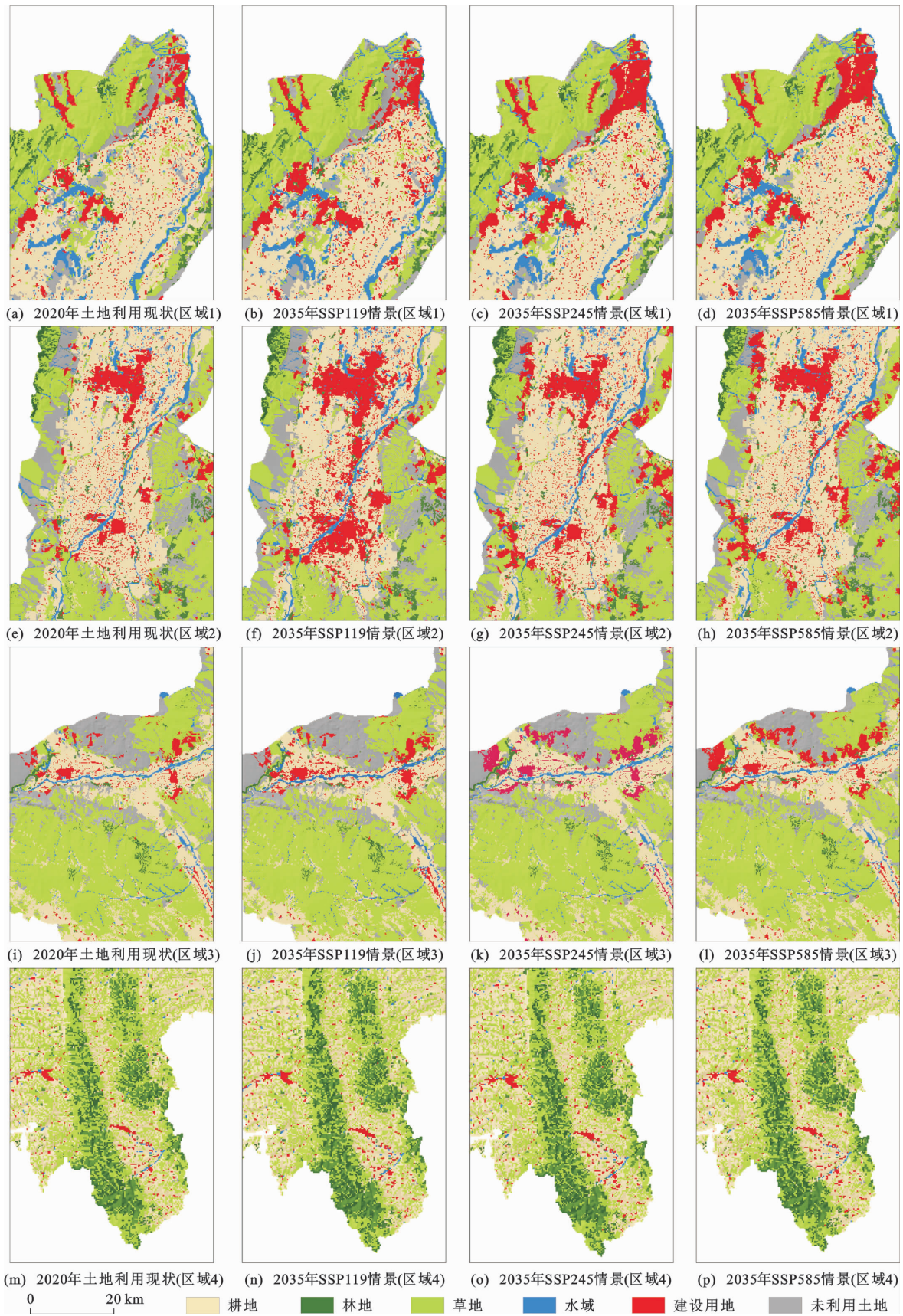


图 6 不同情景下的区域土地利用模拟对比

Fig. 6 Simulation Comparisons of Land Use in Typical Areas Under Different Scenarios

城市发展,这与程丹等的研究结果^[38]基本吻合。不同情景下耕地变化的差异性主要是人口增长导致粮食需求的增加、社会经济在农业投资方面的比例及退耕还林还草政策等因素的驱动。吴霞等认为社会经济发展、人口压力、农业生产技术、退耕还林还草政策是影响宁夏耕地面积变化的主要驱动力^[39]。为满足粮食需求,增加耕地面积只能短时间内解决粮食问题,未来应围绕创新农业发展、提升粮食种植技术,因地制宜考虑地形、海拔、气温及降雨量等因素,按照北部灌溉农业、中部草地畜牧业、南部旱地农业的发展模式,提升耕地利用的经济效应、社会效应和生态效应^[40]。

草地是宁夏占地面积最大的土地利用类型。过度放牧使得草地出现不同程度的退化沙化,可利用产草量下降,植被覆盖度和草地承载力均在下降^[41],草地短时间内难以恢复。宁夏的经济发展主要依靠畜牧业和种植业带动,在畜牧业的投资比例越大,需要的产草量越多,这使得草地面积退化趋势越严重,而且宁夏气候趋向于“暖干化”^[42],草地保护与利用面临巨大的压力。结合宁夏畜牧业发展模式和生态区位,为有效保护草地,应采取以下措施:一是因地制宜发展草地畜牧业,试点轮封轮牧模式;二是推广优质牧草品种和高产高效种植生产加工利用技术;三是分区治理,推进草原保护修复和荒漠化治理,推动草原地区的生态经济绿色协调发展。

土地利用变化反映了经济发展状况和产业结构,土地利用结构的转化取决于经济发展水平与生态环境建设,受人口、城镇化、GDP、产业投资、退耕还林还草政策以及城镇开发边界、生态保护红线和永久基本农田 3 条控制线等多种因素的影响。本文的不足之处是未获取到“三区三线”数据,且涵盖的驱动因子不够全面。未来有必要进一步获取相关数据,将其作为空间转化限制因子,同时增加其他驱动因子(如夜间灯光、土壤 pH 值、含沙量等),继续完善优化模型,再耦合 InVEST 模型计算生境质量^[43],对宁夏未来的土地利用进行模拟预测。

宁夏作为黄河流域生态保护和高质量发展先行先试区,为了协调生态环境和经济发展,实现从高速发展向高质量转变,应参考借鉴 SSP119 情景下的土地利用格局,在推进城镇化进程的同时,强化生态保护,科学权衡发展和保护的关系,合理利用土地资源,用极少的生态土地利用代价,实现经济社会与生态环境协调发展。

5 结 语

本文采用 CMIP6 最新 SSP-RCP 情景,结合多驱动因子,利用 SD-FLUS 模型模拟了宁夏 2005~2020 年土地利用历史变化轨迹,预测 2035 年的土地利用变化趋势。

(1)耕地变化在不同情景下差异较为明显,在 SSP585 情景下增加,在 SSP245 情景下基本保持稳定,在 SSP119 情景下下降;林地各情景下都得到不同程度恢复,在 SSP119 情景下显著恢复;草地则呈现不同程度的减少,其中在 SSP585 情景下退化最为明显;水域面积基本保持稳定;建设用地呈现不同程度的扩张,扩张速率从大到小的情景依次为 SSP585 情景、SSP245 情景、SSP119 情景。

(2)耕地面积增加主要以占用北部灌溉区周围草地为主,南部、中部耕地较为分散,且灌溉不足;森林植被恢复以六盘山和贺兰山自然保护区为主;建设用地扩张占用草地、耕地及未利用土地,且扩张速度从大到小的区域分别为北部平原区、中部干旱荒漠草原区、南部黄土丘陵沟壑区;草地退化主要发生在北部和东部,北部草地被耕地占用,东部农牧交错带草地用于发展畜牧业。

(3)经济、人口、产业结构与土地利用相互关联。SSP585 情景下,经济发展速度快,建设用地扩张明显,但以耕地和草地被占用为代价,草地减少明显;SSP119 情景下,建设用地扩张的同时,生态用地极少被占用,兼顾了社会经济发展和生态环境保护需要。鉴于宁夏属于生态环境脆弱区,又是黄河流域生态保护和高质量发展先行先试区,SSP119 情景可作为宁夏未来的可持续发展及土地资源管理参考模式之一。

参 考 文 献:

References :

- [1] KALNAY E, CAI M. Impact of Urbanization and Land-use Change on Climate[J]. *Nature*, 2003, 423: 528-531.
- [2] MATSON P A, PARTON W J, POWER A G, et al. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties[J]. *Science*, 1997, 277: 504-509.
- [3] HANSEN H S. Modelling the Future Coastal Zone Urban Development as Implied by the IPCC SRES and Assessing the Impact from Sea Level Rise[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 98(3/4): 141-149.

- [4] 刘甲红,徐露洁,潘骁骏,等.土地利用/土地覆盖变化情景模拟研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2017,16(5):551-560.
LIU Jia-hong, XU Lu-jie, PAN Xiao-jun, et al. Research Progress on Land-use and Land-cover Change Scenario Simulation[J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2017, 16(5): 551-560.
- [5] 曹祺文,顾朝林,管卫华.基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟[J].自然资源学报,2021,36(4):1062-1084.
CAO Qi-wen, GU Chao-lin, GUAN Wei-hua. China's Urbanization SD Modelling and Simulation Based on Land Use[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 1062-1084.
- [6] 高心雨,董会和,高禄年,等.基于SD模型的长春市城市经济-社会-土地利用系统动态模拟研究[J].资源与产业,2022,24(4):90-102.
GAO Xin-yu, DONG Hui-he, GAO Lu-nian, et al. Dynamic Simulation of Changchun's Economy-society-land Use System in Changchun Based on SD Model[J]. Resources & Industries, 2022, 24(4): 90-102.
- [7] 王 菲,柴旭荣.CA-Markov模型在土地利用模拟研究中的应用[J].现代农业科技,2013(2):227-235.
WANG Fei, CHAI Xu-rong. Application of CA-Markov Model in Land Use Simulation Research[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(2): 227-235.
- [8] 张亦汉,乔纪纲,刘婉华,等.城市扩张CA模型的参数敏感性分析[J].遥感学报,2018,22(6):1051-1059.
ZHANG Yi-han, QIAO Ji-gang, LIU Wan-hua, et al. Parameter Sensitivity Analysis of Urban Cellular Automata Model[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(6): 1051-1059.
- [9] 孙玮健,张荣群,艾 东,等.基于元胞自动机模型的土地利用情景模拟与驱动力分析[J].农业机械学报,2017,48(增1):254-261.
SUN Wei-jian, ZHANG Rong-qun, AI Dong, et al. Driving Force Analysis and Scenarios Simulation of Land Use Based on Cell Automata Model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(S1): 254-261.
- [10] 郭延凤,于秀波,姜鲁光,等.基于CLUE模型的2030年江西省土地利用变化情景分析[J].地理研究,2012,31(6):1016-1028.
GUO Yan-feng, YU Xiu-bo, JIANG Lu-guang, et al. Scenarios Analysis of Land Use Change Based on CLUE Model in Jiangxi Province by 2030[J]. Geographical Research, 2012, 31(6): 1016-1028.
- [11] 柯丽娜,翟宇宁,史 静,等.基于Dyna-CLUE模型的锦州市海域利用变化动态模拟[J].绿色科技,2022,24(4):184-188.
KE Li-na, ZHAI Yu-ning, SHI Jing, et al. Dynamic Simulation of Sea Use Change in Jinzhou City Based on Dyna-CLUE model[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(4): 184-188.
- [12] 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 Ming-song, XU Shao-jie, DENG Liang, et al. Simulation of Land Use Change in Typical Coal Mining City Based on CLUE-S Model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 158-168.
- [13] 李媛洁,叶长盛,黄小兰.基于CLUE-S模型的南昌市“三生”空间时空演变及情景模拟研究[J].水土保持研究,2021,28(5):325-332.
LI Yuan-jie, YE Chang-sheng, HUANG Xiao-lan. Temporal-spatial Evolution and Scenario Simulation of Production-living-ecological Space in Nanchang Based on CLUE-S Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 325-332.
- [14] LIU X P, 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] 俞钦平,吴振华,王亚蓓.一种耦合进化算法与FLUS模型的土地利用变化模拟模型[J].地球信息科学学报,2023,25(3):510-528.
YU Qin-ping, WU Zhen-hua, WANG Ya-bei. A Land Use Change Simulation Model: Coupling of Evolutionary Algorithm and FLUS Model[J]. Journal of Geoinformation Science, 2023, 25(3): 510-528.
- [16] 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.
- [17] 林素丽,王 枫.基于PLUS模型并顾及交通规划的广州市土地利用情景模拟与分析[J].农业资源与环境学报,2023,40(3):557-569.
LIN Su-li, WANG Feng. Simulation and Analysis of Land Use Scenarios in Guangzhou Based on the PLUS

- Model and Traffic Planning Scenario[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(3):557-569.
- [18] 王梓洋,石培基,张学斌,等. 基于多智能体模型的兰州市城镇用地扩展模拟[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6):2169-2179.
- WANG Zi-yang, SHI Pei-ji, ZHANG Xue-bin, et al. Simulation of Lanzhou Urban Land Expansion Based on Multi-agent Model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6):2169-2179.
- [19] 艾东,王朔,张荣群,等. 基于多智能体模型的银川平原土地利用情景模拟[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增1):262-270.
- AI Dong, WANG Shuo, ZHANG Rong-qun, et al. Scenario Simulation of Land Use in Yinchuan Plain Based on Multi-agent Model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(S1):262-270.
- [20] 张云鹏,孙燕,陈振杰. 基于多智能体的土地利用变化模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4):255-265.
- ZHANG Yun-peng, SUN Yan, CHEN Zhen-jie. Simulation of Land Use Change Using Multi-agent Model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(4):255-265.
- [21] 刘敬杰,夏敏,刘友兆,等. 基于多智能体与CA结合模型分析的农村土地利用变化驱动机制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6):242-252.
- LIU Jing-jie, XIA Min, LIU You-zhao, et al. Driving Mechanism of Rural Land Use Change Based on Multi-agent System and Cellular Automata[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6):242-252.
- [22] 胡烨婷,李天宏. 基于SD-CA模型的快速城市化地区土地利用空间格局变化预测[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(2):372-382.
- HU Ye-ting, LI Tian-hong. Forecasting Spatial Pattern of Land Use Change in Rapidly Urbanized Regions Based on SD-CA Model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(2):372-382.
- [23] 赵林峰,刘小平,刘鹏华,等. 基于地理分区与FLUS模型的城市扩张模拟与预警[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3):516-530.
- ZHAO Lin-feng, LIU Xiao-ping, LIU Peng-hua, et al. Urban Expansion Simulation and Early Warning Based on Geospatial Partition and FLUS Model[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(3):516-530.
- [24] 苟贞珍,尹小君,郭丽洁,等. 基于FLUS-Markov模型的喀什地区生态承载力时空格局预测[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(3):333-341.
- GOU Zhen-zhen, YIN Xiao-jun, GUO Li-jie, et al. Spatio-temporal Pattern Prediction of the Biocapacity in the Kashi Prefecture on the Basis of the FLUS-Markov Model[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2022, 40(3):333-341.
- [25] 宋百媛. 基于SD-FLUS模型的中国海岸带LUCC多情景模拟[D]. 北京:中国科学院大学, 2021.
- SONG Bai-yuan. Multi-scenario Simulation of LUCC in China's Coastal Zone Based on SD-FLUS Model[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [26] 任胤铭,刘小平,许晓聪,等. 基于FLUS-InVEST模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响研究[J]. 生态学报, 2023, 43(11):4473-4487.
- REN Yin-ming, LIU Xiao-ping, XU Xiao-cong, et al. Multi-scenario Simulation of Land Use Change and Its Impact on Ecosystem Services in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on the FLUS-InVEST Model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11):4473-4487.
- [27] 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 Xiao-yao, ZHANG Xiao, LI Dong-hua, et al. Multi-scenario Simulation of the Impact on Urban Land Use Change on Ecosystem Service Value in Shenzhen[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6):2086-2097.
- [28] 楚智,徐长春,罗映雪,等. 基于生态保护红线管理的塔里木河流域土地利用模拟及生态效益评价[J]. 生态学报, 2021, 41(18):7380-7392.
- CHU Zhi, XU Chang-chun, LUO Ying-xue, et al. Land Use Simulation and Ecological Benefit Evaluation in the Tarim River Basin Based on Ecological Protection Red Line Management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18):7380-7392.
- [29] 张丽霞,陈晓龙,辛晓歌. CMIP6情景模式比较计划(Scenario CMIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5):519-525.
- ZHANG Li-xia, CHEN Xiao-long, XIN Xiao-ge. Short Commentary on CMIP6 Scenario Model Inter Comparison Project(Scenario CMIP)[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5):519-525.
- [30] JIANG P Z, AI-H X, XIANG Q, et al. Assessment of Future Antarctic Amplification of Surface Tempera-

- ture Change Under Different Scenarios from CMIP6 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20(4): 1074-1089.
- [31] 苏胜亮. 宁夏回族自治区生态环境与经济发展耦合协调研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 367-374.
SU Sheng-liang. Research on the Coordinated Development of Ecology and Economic System of Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 367-374.
- [32] 吴欣昕, 刘小平, 梁 迅, 等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(4): 532-542.
WU Xin-xin, LIU Xiao-ping, LIANG Xun, et al. Multi-scenarios Simulation of Urban Growth Boundaries in Pearl River Delta Based on FLUS-UGB [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(4): 532-542.
- [33] 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 Xiao-rong, LI Ai-nong, NAN Xi, 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.
- [34] 陈竹安, 刘子强, 张立亭, 等. 南昌市 LUCC 多情景模拟和生境质量时空演变与预测[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 170-180.
CHEN Zhu-an, LIU Zi-qiang, ZHANG Li-ting, et al. Multi-scenario Simulation of LUCC and Spatio-temporal Evolution and Prediction of Habitat Quality in Nanchang City [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 170-180.
- [35] LIAO W L, LIU X P, XU X Y, et al. Projections of Land Use Changes Under the Plant Functional Type Classification in Different SSP-RCP Scenarios in China [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(22): 1935-1947.
- [36] 姜 彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6 模式新情景 (SSP-RCP) 概述及其在淮河流域的应用[J]. *气象科技进展*, 2020, 10(5): 102-109.
JIANG Tong, LYU Yan-ran, HUANG Jin-long, et al. New Scenarios of CMIP6 Model (SSP-RCP) and Its Application in the Huaihe River Basin [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2020, 10(5): 102-109.
- [37] 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 Ding-zhao, LIANG You-jia. 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.
- [38] 程 丹, 魏纪原, 孙鸿睿. 宁夏建设用地变化及其经济社会驱动力因素研究[J]. *宁夏大学学报 (自然科学版)*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/64.1006.N.20210701.0919.002.html>.
CHENG Dan, WEI Ji-yuan, SUN Hong-rui. Research on the Changes of Construction Land in Ningxia and Its Economic and Social Driving Factors [J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/64.1006.N.20210701.0919.002.html>.
- [39] 吴 霞, 王世荣, 尚红莺, 等. 宁夏近 18 年来耕地面积动态变化及驱动力分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(8): 98-104.
WU Xia, WANG Shi-rong, SHANG Hong-ying, et al. Analysis of Dynamic Change and Driving Forces of Cultivated Land in Ningxia During the Past 18 Years [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(8): 98-104.
- [40] 杜国明, 盖兆雪, 王洪彦. 中国耕地细碎化的理论解析与研究框架[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(6): 997-1008.
DU Guo-ming, GAI Zhao-xue, WANG Hong-yan. Theoretical Explanation and Research Framework of Cultivated-land Fragmentation in China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(6): 997-1008.
- [41] LAN J, SHEN Y. Changes of Productivity and Bearing Capacity of Grassland in Arid Zone of Central Ningxia over 20 Years [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 12(4): 600-602.
- [42] 秦大河, 翟盘茂. 中国气候与生态环境演变: 2021 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
QIN Da-he, ZHAI Pan-mao. Change of Climate and Ecological Environment in China: 2021 [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [43] 胡 丰, 张 艳, 郭 宇, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(4): 1125-1136.
HU Feng, ZHANG Yan, GUO Yu, et al. Spatial and Temporal Changes in Land Use and Habitat Quality in the Weihe River Basin Based on the PLUS and InVEST Models and Predictions [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(4): 1125-1136.