

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.004.

李井浩, 柳书俊, 王志杰. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 287-298.

Li Jinghao, Liu Shujun, Wang Zhijie. Multi-scenario Simulation of Spatiotemporal Changes of Land Use Pattern and Ecosystem Services in Yunnan-Guizhou Plateau Based on FLUS and InVEST Models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 287-298.

# 基于 FLUS 和 InVEST 模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究

李井浩<sup>1</sup>, 柳书俊<sup>1</sup>, 王志杰<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学 生命科学学院, 贵阳 550025; 2. 山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 探讨云贵高原不同情景下的土地利用与生态系统服务时空变化, 为云贵高原土地利用空间格局优化、生态系统服务功能提升和可持续发展策略制定提供科学依据。[方法] 以云贵高原为研究对象, 以 2001 年、2010 年和 2020 年 3 期 MCD12Q1 土地覆被数据为基础数据, 辅以自然和社会经济数据, 基于 ArcGIS, FLUS 模型和 InVEST 模型, 模拟 2030 年、2040 年和 2050 年自然发展情景、生态保护情景和耕地保护情景下的土地利用以及碳储量、产水量和土壤保持量 3 项生态系统服务功能时空分布格局。[结果] (1) 不同情景下云贵高原的土地利用变化以林地持续增加和草地持续减少为主要趋势; 耕地保护情景下, 耕地面积最高可占总面积的 10.38%; 生态保护情景下, 林草面积在 2050 年可达总面积的 90%。(2) 3 种情景下, 云贵高原 2020—2050 年碳储量和土壤保持量均呈上升趋势, 而产水量呈下降趋势。生态保护情景下, 2050 年碳储量预测值最高, 为  $8.13 \times 10^9$  t; 产水量减少速率显著低于另外两种情景, 降幅为 0.46%。(3) 宜昌市、普洱市和常德市等市州的生态系统服务供给能力较高; 而贵阳市、毕节市和安顺市等市州的生态系统服务供给能力较低。[结论] 云贵高原 2020—2050 年整体生态系统服务供给能力较好, 各项服务功能在不同情景下表现出较强的空间聚集性和异质性。云贵高原今后的生态系统服务管理和可持续发展中, 应考虑不同生态系统服务功能的时空异质性以及林地面积持续增加可能带来的水资源失衡问题。

**关键词:** FLUS 模型; InVEST 模型; 碳储量; 产水量; 土壤保持量

**中图分类号:** F301.2; X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)03-0287-12

## Multi-scenario Simulation of Spatiotemporal Changes of Land Use Pattern and Ecosystem Services in Yunnan-Guizhou Plateau Based on FLUS and InVEST Models

Li Jinghao<sup>1</sup>, Liu Shujun<sup>1</sup>, Wang Zhijie<sup>1,2</sup>

(1. College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region, Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the spatiotemporal changes of land use and ecosystem services under different development scenarios on the Yunnan-Guizhou Plateau, and to provide an important scientific basis for optimizing the spatial pattern of land use, improving the function of ecosystem services and formulating sustainable development strategies. [Methods] The Yunnan-Guizhou Plateau was taken as the research object. The MCD12Q1 land cover data of phases 2001, 2010 and 2020 were taken as the basic data, and the natural and socio-economic data were taken as the auxiliary data. Based on ArcGIS, FLUS model and InVEST model platform, the land use pattern change patterns of Yunnan-Guizhou Plateau from 2001 to 2020 were analyzed. The spatiotemporal distribution pattern of land use and the spatiotemporal

收稿日期: 2023-07-03

修回日期: 2023-07-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特城市景观格局时空演变及其对山体植物多样性影响的尺度效应”(42061039); 贵州大学培育项目“喀斯特山地城市生物多样性维持的景观恢复力机制研究”(贵大培育[2020]46)

第一作者: 李井浩(2001—), 男, 重庆开州人, 硕士研究生, 主要从事景观与区域生态研究。E-mail: 3354546236@qq.com

通信作者: 王志杰(1986—), 男, 甘肃会宁人, 博士, 教授, 主要从事景观与区域生态、山地生物多样性保护研究。E-mail: zjwang3@gzu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

changes of three ecosystem services function (carbon storage, water yield and soil conservation) were simulated under the Natural Development Scenario (NDS), Ecological Protection Scenario (EPS) and Farmland Protection Scenario (FPS) in 2030, 2040 and 2050. [Results] (1) The main trend of land use structure in Yunnan-Guizhou Plateau under different scenarios was the continuous increase of forestland and the continuous decrease of grassland. The farmland area can account for 10.38% of the total area under the FPS. The forestland and grassland area will reach 90% of the total area by 2050 under the EPS. (2) Under the three scenarios, the total carbon storage and soil conservation of ecosystem services in the Yunnan-Guizhou Plateau from 2020 to 2050 show an increasing trend, while the total water yield shows a decreasing trend. Under the EPS, the predicted value of carbon storage in 2050 will be the highest,  $8.13 \times 10^9$  t, and the reduction rate of water yield will be significantly lower than the other two scenarios, with a decrease of 0.46%. (3) Yichang, Pu'er and Changde have higher ecosystem services supply capacity. However, the supply capacity of ecosystem services in Guiyang, Bijie and Anshun is low. [Conclusion] The supply capacity of ecosystem services in the study area is better from 2020 to 2050, and all service functions show strong spatial aggregation and heterogeneity under different scenarios. When formulating strategies for ecosystem service management and sustainable development in the Yunnan-Guizhou Plateau, the spatial differentiation characteristics of different ecosystem service functions and the water shortage caused by the continuous increase of forest area should be considered.

**Keywords:** FLUS model; InVEST model; carbon storage; water yield; soil conservation

生态系统服务(Ecosystem Services)是生态系统所提供人类生存所必需的生态产品与服务的统称,包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务<sup>[1]</sup>,这些服务提供了人类赖以生存和发展的资源环境,是人类可持续发展的重要保障<sup>[2]</sup>。联合国千年评估报告指出全球 60% 的生态系统服务正在退化或丧失<sup>[3]</sup>,而土地作为承载人类生产与生活的空间载体,其利用与变化可以直接反映人类活动对区域生态系统的影响<sup>[4]</sup>,是直接影响生态系统服务的重要因素<sup>[5]</sup>。在全球气候变化和经济快速发展背景下,人类对土地过度开发和高强度转换土地覆被类型等行为极大地影响了生态系统的结构、过程与功能,对生态系统服务的稳定构成了威胁<sup>[6]</sup>。因此,如何基于有限的土地资源,协调生态保护与经济发展之间的关系,合理优化土地利用与生态系统服务空间布局,是实现区域可持续发展亟需解决的问题。

国内外关于土地利用变化和生态系统服务评估的研究方法已有大量报道。土地利用变化预测模拟方面,自 20 世纪以来,元胞自动机模型(CA)、土地利用变化及效应模型(CLUE-S)、多智能体系统模型(MAS)和未来土地利用变化情景模拟模型(Future Land Use Simulation, FLUS)等土地利用变化预测模型被相继提出,其中,FLUS 模型模拟不同情景下土地利用变化结果具有较高的模拟精度,被广泛用于土地利用模拟研究中<sup>[7]</sup>。在生态系统服务评估方面,Costanza 等<sup>[1]</sup>在 1997 年首次提出了单位面积经济价值参数评估模型,开启了生态系统服务评估的热潮。

2008 年谢高地等<sup>[8]</sup>在 Costanza 等<sup>[1]</sup>的研究基础上,结合中国实际情况提出了“中国生态系统服务当量因子表”并得到了广泛运用。近年来,随着“3S”技术在生态系统服务评估中的运用与发展,涌现出了众多生态系统服务评估模型,如 ARIES 模型、SolVES 模型和 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型等<sup>[9]</sup>,其中 InVEST 模型数据需求简单、评估精度高、结果空间表达清晰,在生态系统服务功能动态评估领域得到了广泛应用<sup>[10]</sup>。近年来,学者们尝试耦合 FLUS 模型和 InVEST 模型对未来土地利用变化与生态系统服务功能进行预测和评估,并取得了一系列成果。例如,任胤铭等<sup>[5]</sup>采用 FLUS-InVEST 模型对京津冀地区 2045 年 3 种情景下的土地利用变化和多种生态系统服务功能进行模拟,结果表明生态保护情景是最有利于可持续发展的土地利用方案;王超越等<sup>[11]</sup>运用 FLUS-InVEST 模型探究呼包鄂榆城市群土地利用与碳储量时空变化之间的关系,结果显示生态保护情景下土地利用变化碳储量稳定性最优;邵壮等<sup>[12]</sup>基于 FLUS-InVEST 模型预测了多种情景下土地利用和碳储量变化,并得出绿色集约生态保护情景下的碳储量预测值最高。综上所述,目前基于 FLUS-InVEST 模型预测土地利用和生态系统服务功能时空变化的研究模式主要为单年多情景模式,研究地区主要集中在东部经济发达地区、北部干旱区或城市化地区,研究尺度主要集中在市域尺度上,而西南喀斯特山地区域尺度的多年多情景模拟相关研究鲜见。

云贵高原是世界上喀斯特地貌发育最典型地区之一,土地利用结构复杂,地理环境差异显著<sup>[13]</sup>,拥有丰富的动植物资源和多样的生态系统<sup>[14]</sup>,为该地区提供了碳储存、水源涵养和土壤保持等多种生态系统服务功能<sup>[15]</sup>。为解决西南山区贫困问题,中国政府自 2000 年开始实施西部大开发政策,加剧了云贵高原的人类活动和土地利用变化,深刻影响了自然环境和生态系统服务功能<sup>[16]</sup>。近年来,国家越来越重视生态环境的保护并实施了一系列生态保护与恢复措施,如“喀斯特石漠化恢复工程”、“退耕还林还草工程”和“天然林保护工程”等<sup>[17]</sup>。在此背景下,云贵高原的生态环境质量和生态系统结构得到了改善和优化,显著提高了碳储存、土壤保持和净化环境等生态系统服务功能<sup>[17]</sup>。然而,云贵高原未来土地利用与生态系统服务在当下经济发展速度持续加快、人为干扰不断增强和生态保护与修复工程不断实施的多重影响下的时空变化尚不明确,且精确刻画云贵高原在不同情景下的土地利用与生态系统服务时空变化的研究鲜有报道。因此,评估云贵高原不同情景下的土地利用与生态系统服务时空变化特征对该地区未来生态保护和可持续发展具有重要的实践与科学意义。

基于此,本研究以云贵高原 2001—2020 年 MODIS 土地覆被数据集为基础数据,利用 FLUS-InVEST 模型预测云贵高原 2020—2050 年 3 种情景下的土地利用和生态系统服务功能空间分布格局,探讨不同情景下土地利用和多项生态系统服务功能时空变化特征,以期为该地区的土地资源可持续利用、优化土地利用结构和提升生态系统服务功能提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

云贵高原位于中国西南部,是中国四大高原之一,大致位于东经 100°—111°,北纬 22°—30°,总面积约  $77.54 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[18]</sup>。云贵高原属于典型喀斯特地区,是中国重要的生态功能区,也是全球生态脆弱区,其生态系统对气候变化和人类活动的影响极为敏感<sup>[19]</sup>。云贵高原是青藏高原向丘陵和平原地区的过渡地带,整体地形由西向东下降<sup>[20]</sup>,由于其独特的地理位置、气候条件和生态系统多样性,云贵高原拥有着丰富的生态系统服务功能,包括碳储存、水源涵养、土壤保持和生物多样性保护等<sup>[21]</sup>。然而,在过去的几十年中,由于经济快速发展导致人地矛盾突出,云贵高原的生态环境受到严重的影响和破坏,主要包括石漠化、水土流失和生态系统退化等问题<sup>[18]</sup>。

### 1.2 数据来源与数据预处理

本研究所采用的数据主要包括:(1) 土地覆被数据:云贵高原 2001 年、2010 年和 2020 年 3 期 MCD12Q1 土地覆被数据(IGBP 方案),并根据研究区特点将数据中 17 类地类重分类为 7 类地类,即林地、草地、湿地、耕地、水域、裸地和建设用地;(2) 生态系统服务功能评估数据:降水侵蚀性因子 R,土壤可蚀性因子 K,潜在蒸散发数据,土壤数据(沙含量、淤泥含量、黏土含量、有机物含量),流域数据提取自 DEM;(3) 土地利用变化驱动因子数据:社会经济因素(GDP 和人口密度)、自然因素(DEM、坡度、坡向、年均气温、年均降水量和土壤类型)、交通区位因素(距公路距离)(图 1)。

所有数据统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48 N 投影坐标系,并重采样至 500 m 空间分辨率。具体数据及其来源如表 1 所示。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用变化多情景模拟

(1) FLUS 模型。FLUS 模型在传统 CA 模型基础上采用多层前馈神经网络算法和轮盘赌选择机制进行了改进<sup>[22]</sup>,可以很好地用于多种驱动因素作用下的土地利用变化多情景模拟<sup>[23]</sup>。模型主要计算过程如下:

(1) 基于神经网络的适宜性概率计算。神经网络算法(ANN)包括预测与训练阶段,由输入层、隐含层和输出层组成<sup>[24]</sup>,计算公式为:

$$p(p, k, t) = \sum_j w_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}} \quad (1)$$

式中: $p(p, k, t)$ 为第  $k$  类地类在栅格  $p$ ,时间  $t$  上的适宜性概率; $w_{j,k}$ 是隐藏层和输出层之间的自适应权重; $\text{net}_j(p, t)$ 在隐含层中表示神经元  $j$  在时间  $t$  从栅格单元  $p$  上所接收的信号。

(2) 自适应惯性系数。自适应惯性系数由每类土地的现状数量与未来需求决定,并在迭代过程中进行自适应调整使各地类数量向需求目标发展<sup>[25]</sup>。第  $k$  类地类在时间  $t$  上的自适应惯性系数  $A_{i,k}^t$  为:

$$A_{i,k}^t = \begin{cases} A_{i,k}^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ A_{i,k}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ A_{i,k}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_k^{t-1}$ ,  $D_k^{t-2}$  分别为  $t-1$ ,  $t-2$  时第  $k$  类地类栅格数量与需求量之间的差值。

(3) 邻域因子与权重。邻域因子表示不同地类间以及邻域范围内不同土地利用单元间的相互作用<sup>[26]</sup>,其表达式为:

$$\Omega'_{p,k} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k \quad (3)$$



式中： $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1}=k)$ 表示在  $N \times N$  的 Moore 邻域窗口中,上一次迭代结束后第  $k$  类地类的栅格总数; $w_k$  为各地类邻域作用的权重。本文采用  $3 \times 3$

Moore 邻域,CA 迭代次数为 300 次。根据过往研究经验<sup>[12]</sup>与研究区土地利用特征,对各地类邻域权重赋值并反复调试,详细赋值信息如表 2 所示。

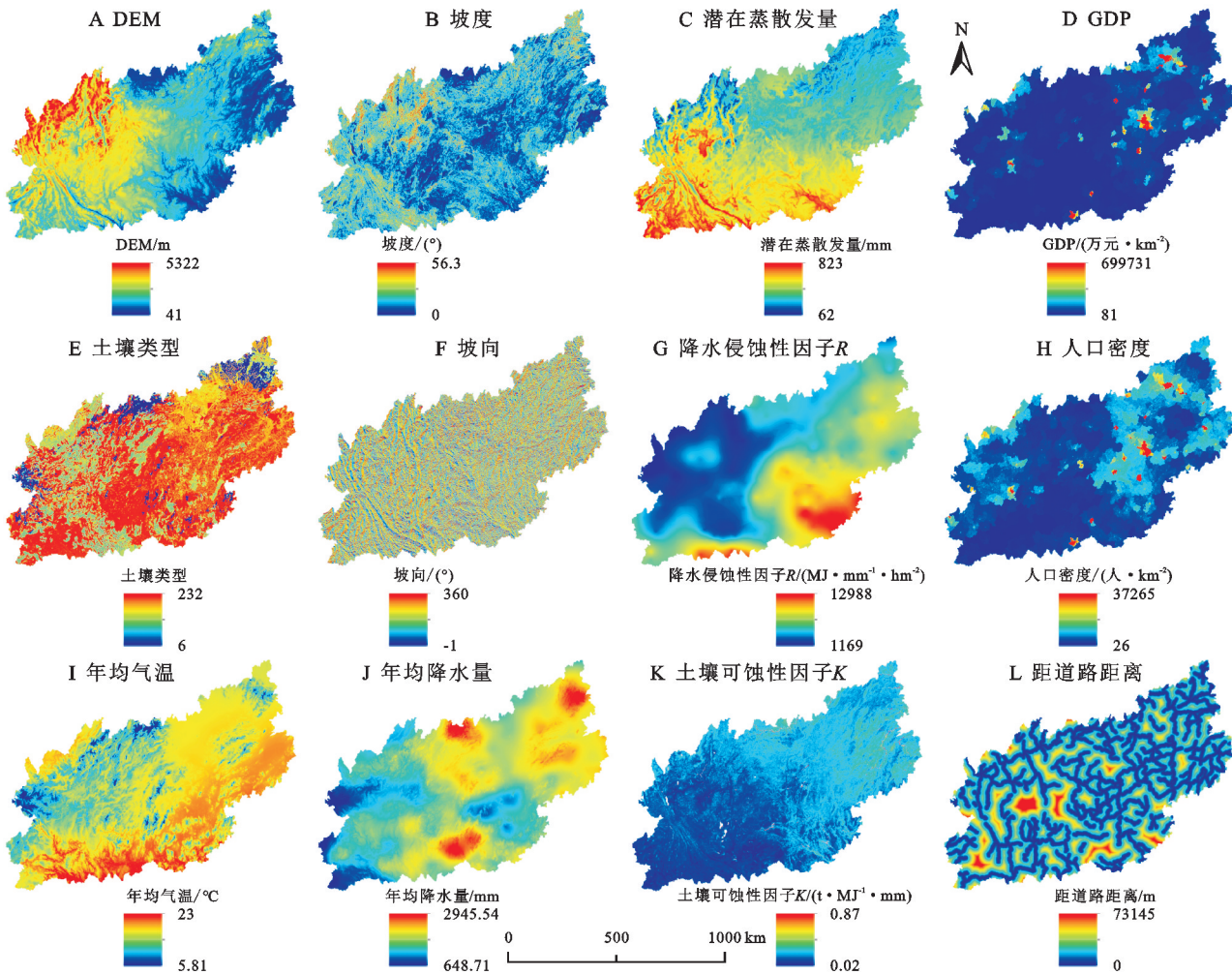


图 1 自然及社会因子空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of natural and social factors

表 1 数据信息

Table 1 Date information

数据类型	数据名称	数据来源
土地利用数据	MCD12Q1 产品	<a href="https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov">https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov</a>
	DEM	
	坡度	<a href="https://www.gscloud.cn">https://www.gscloud.cn</a>
	坡向	
土地利用变化 驱动因子数据	年均气温	<a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a>
	年均降水量	
	人口密度	
	GDP	
生态系统服务 功能评估数据	土壤类型	<a href="http://clicia.bnu.edu.cn">http://clicia.bnu.edu.cn</a>
	距公路距离	
	降水侵蚀因子 R	<a href="https://data.tpdc.ac.cn">https://data.tpdc.ac.cn</a>
	土壤可蚀性因子 K	
	潜在蒸散发量	<a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a>
	土壤数据(沙含量、淤泥含量、黏土含量、有机物含量)	



表 2 FLUS 模型邻域作用权重  
Table 2 Neighborhood weights of FLUS model

土地利用类型	林地	草地	湿地	耕地	裸地	水域	建设用地
邻域作用权重	1.000	0.567	0.007	0.336	0.001	0.001	0.024

(2) 多情景设置。情景分析是权衡国土空间布局的重要方法<sup>[27]</sup>,通过限制土地利用转移成本矩阵<sup>[12]</sup>,设置云贵高原 2020—2050 年 3 种发展情景:耕地保护情景(FPS)、生态保护情景(EPS)和自然发展情景(NDS)。自然发展情景中,保持 2001—2020 年云贵高原土地利用变化特征,不对转移成本矩阵进行任何限制;生态保护情景中,将 7 类地类按照生态贡献从高到低排序为林地>草地>水域>湿地>耕地>裸地>建设用地<sup>[10]</sup>,在自然发展的基础上限制高生态贡献用地向低生态贡献用地转化;耕地保护情景中,除建设用地外其他地类均可向耕地转换,并在生态保护情景的基础上限制耕地向其他用地转换<sup>[10]</sup>。各情景中土地利用转移成本矩阵如表 3 所示。

表 3 土地利用转移成本矩阵  
Table 3 Land use transfer cost matrix

项目	自然发展情景							生态保护情景							耕地保护情景						
	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	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0
G	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1

注:A,B,C,D,E,F,G 分别代表林地、草地、湿地、耕地、裸地、水域和建设用地;1 表示可以转换,0 表示不可以转换。

(3) 精度验证。采用 Kappa 系数和 FOM 系数对模型精度进行验证。经过计算,模拟结果的 Kappa 系数为 0.69(0.6<Kappa≤0.8 时表示模拟结果较好<sup>[23]</sup>),FOM 系数为 0.300 9(0.1~0.2 为标准水平),表明 FLUS 模型在云贵高原有较好的模拟能力,可以用于云贵高原 2020—2050 年的土地利用变化预测。

1.3.2 生态系统服务功能评估 InVEST 模型即生态系统服务综合评估与权衡模型。本研究选取云贵高原典型的碳储量、产水量和土壤保持量 3 种生态系统服务功能,基于 InVEST 模型进行评估。

(1) 碳储量。碳储量模块是以地表景观格局和覆被类型为评估单元,参考相关研究<sup>[28-29]</sup>确定研究区各地类的碳密度(表 4)。模型计算公式为:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \tag{4}$$

式中: $C_{\text{tot}}$  为总碳储量; $C_{\text{above}}$  为地上部分的碳储量; $C_{\text{below}}$  为地下部分的碳储量; $C_{\text{soil}}$  为土壤碳储量; $C_{\text{dead}}$  为死亡有机碳储量。

(2) 产水量。产水量模块是一种以栅格为单元的水量平衡估算模块<sup>[30]</sup>。模型计算公式为:

$$Y(x) = (1 - \frac{AET(x)}{P(x)}) \times P(x) \tag{5}$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[ 1 + (\frac{PET(x)}{P(x)})^w \right]^{\frac{1}{w}} \tag{6}$$

$$PET(x) = K_c(l_x) \times ET_0(x) \tag{7}$$

$$w(x) = Z \times \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \tag{8}$$

式中: $Y(x)$  为栅格单元  $x$  的产水量; $AET(x)$  为云贵高原每个栅格单元的实际蒸散发量; $P(x)$  为栅格单元  $x$  的降水量; $PET(x)$  为潜在蒸散发量; $w$  为自然气候—土壤性质的非物理参数; $K_c(l_x)$  表示栅格单元  $x$  中特定土地利用的植物(植被)蒸散系数; $ET_0(x)$  表示栅格单元  $x$  的参考作物蒸散; $AWC(x)$  表示植物可利用水含量; $Z$  为经验常数,本研究取值为 9.433<sup>[29]</sup>。

(3) 土壤保持量。土壤保持模块通过通用土壤流失方程(USLE)方程对研究区潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量进行定量估算,潜在侵蚀量与实际侵蚀量的差值即为土壤保持量<sup>[31]</sup>。公式如下:

$$RKLS = R \times K \times LS \tag{9}$$

$$USLE = RKLS \times C \times P \tag{10}$$

式中: $RKLS$  为栅格单元潜在土壤流失量; $R$  为降雨侵蚀力; $K$  为土壤可蚀性; $LS$  为坡度坡长因子; $USLE$  为栅格单元每年土壤侵蚀量; $P$  为水土保持措施因子; $C$  为植被覆盖因子。

1.3.3 相关性分析 为进一步探究不同地类变化对生态系统服务的影响,采用斯皮尔曼相关性系数对 2020—2050 年 3 种情景下不同地类面积和生态系统服务功能

变化量进行相关性检验。基于 ArcGIS 10.8 平台,使用 10 km×10 km 的格网提取研究区土地利用及生态系统服务变化量,采用 IBM SPSS 软件进行相关性分析。

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

式中: $d_i$ 表示每对观察值( $x, y$ )的秩之差; $n$ 为样本容量。

表 4 各土地利用类型碳密度

Table 4 Carbon density of each land use type

类型	t/hm <sup>2</sup>			
	$C_{above}$	$C_{below}$	$C_{soil}$	$C_{dead}$
林地	46.20	8.62	136.98	13.00
草地	2.33	7.30	43.72	0.10
湿地	4.23	0.00	152.65	0.00
耕地	4.60	0.30	21.60	0.00
裸地	1.00	1.82	34.08	0.00
水域	2.75	0.00	144.13	0.00
建设用地	0.40	6.90	28.80	0.00

## 2 结果与分析

### 2.1 云贵高原 2020—2050 年土地利用结构时空变化特征

由图 2 可知,自然发展情景下,云贵高原 2020—2050 年的土地利用变化主要表现为林地持续增加,草地持续减少,耕地和建设用地少量扩张;其中,2050 年林地面积增加至 275 565.50 km<sup>2</sup>,面积占比由 2020 年 24% 上升至 36%,而草地则下降至 410 393.25 km<sup>2</sup>,面积占比为 53%,较 2020 年降幅为 12%。在耕地保护情景下,耕地面积从 2030—2050 年逐步提高,不同模拟年份中耕地面积占比均在 10% 以上,从 2020—2050 年每十年分别增长了 1 914.75 km<sup>2</sup>,141.25 km<sup>2</sup>,141.25 km<sup>2</sup>,2020—2030 年耕地面积增幅最大,2050 年耕地面积达到了最高值 80 502.75 km<sup>2</sup>,占比为 10.38%。在生态保护情景下,林地和草地两类主要生态用地面积总和最高,在 2050 年达到了 696 527.00 km<sup>2</sup>,面积占比为 90%。

云贵高原 2030—2050 年 3 种情景下的土地利用均较好地维持了 2020 年的空间分布格局,具体表现为林地主要集中于云贵高原西南部和西北与青藏高原接壤区域,建设用地主要分布在各市州的建成区及其周边,耕地环绕建设用地分布,云贵高原土地利用结构从中心向外围呈建设用地→耕地→草地→林地辐射状分布格局(图 3)。

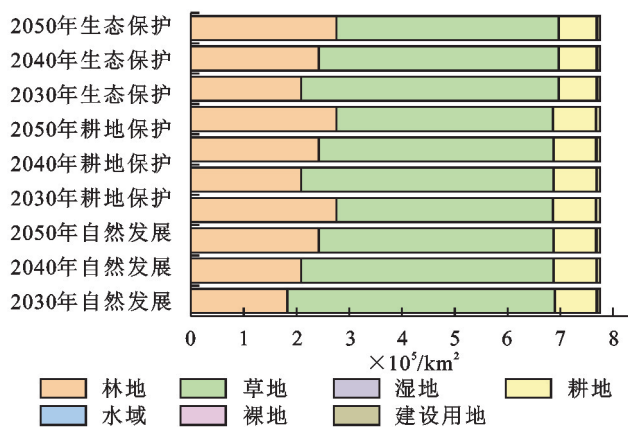


图 2 2020—2050 年不同情景中土地利用类型面积堆积

Fig. 2 Plot of area accumulation in different scenarios from 2020 to 2050

### 2.2 云贵高原 2020—2050 年不同情景下生态系统服务时空变化

不同情景下,云贵高原 2020—2050 年碳储量和土壤保持量呈增加趋势,而产水量呈下降趋势(表 5)。具体而言:2020—2050 年生态保护情景、耕地保护情景和自然发展情景下,总碳储量分别增加  $1.426 \times 10^9$  t,  $1.399 \times 10^9$  t 和  $1.399 \times 10^9$  t,增幅分别为 21.27%, 20.87% 和 20.87%;土壤保持总量分别增加  $8.1 \times 10^9$  t,  $8.5 \times 10^9$  t 和  $8.5 \times 10^9$  t,增幅分别为 1.92%, 2% 和 2%;生态保护情景下的总产水量下降至  $4.767 \times 10^9$  mm,降幅为 0.46%,耕地保护情景和自然发展情景下的总产水量均下降至  $4.766 \times 10^9$  mm,降幅为 0.48%。生态保护情景下与耕地保护情景和自然发展情景下的土地利用变化与生态系统服务功能模拟结果差异显著,在生态保护情景下,各年碳储量预测值均显著高于另外两种情景,这是因为该情景下林地和草地得到了良好的保护,林草面积持续增加,储存了更多的生物量;虽然生态保护情景下产水量减少趋势并未得到有效遏制,但减少速率显著低于另外两种情景,这主要是由于生态保护情景下对草地的保护使其转出为其他地类的速率低于其他两种情景,因此具有更高的产水服务。在耕地保护情景下,2050 年耕地面积显著大于其他两种情景,这体现出耕地保护情景中采取的耕地保护措施对维持耕地面积具有显著正向作用。

空间分布和变化方面,2020—2050 年不同情景下 3 项生态系统服务功能的格局呈现出相似的空间分布特征,而不同生态系统服务的空间分布与变化具有明显的异质性。具体而言:

3 种情景下碳储量高值区均主要集中在研究区西部的普洱市、丽江市和临沧市以及东北部的宜昌市等地区,低值区集中在中部地区的安顺市、毕节市和

贵阳市以及东部的娄底市等地区。不同情景下云贵高原各市州的单位面积碳储量均呈增加趋势;且西部地区增加较为明显,如丽江市、普洱市和凉山州等市州增加 30 t/hm<sup>2</sup> 以上;而中部和东部大部分市州增加相对较少,如安顺市、河池市和宜宾市等市州增加均不足 7 t/hm<sup>2</sup> (图 4)。

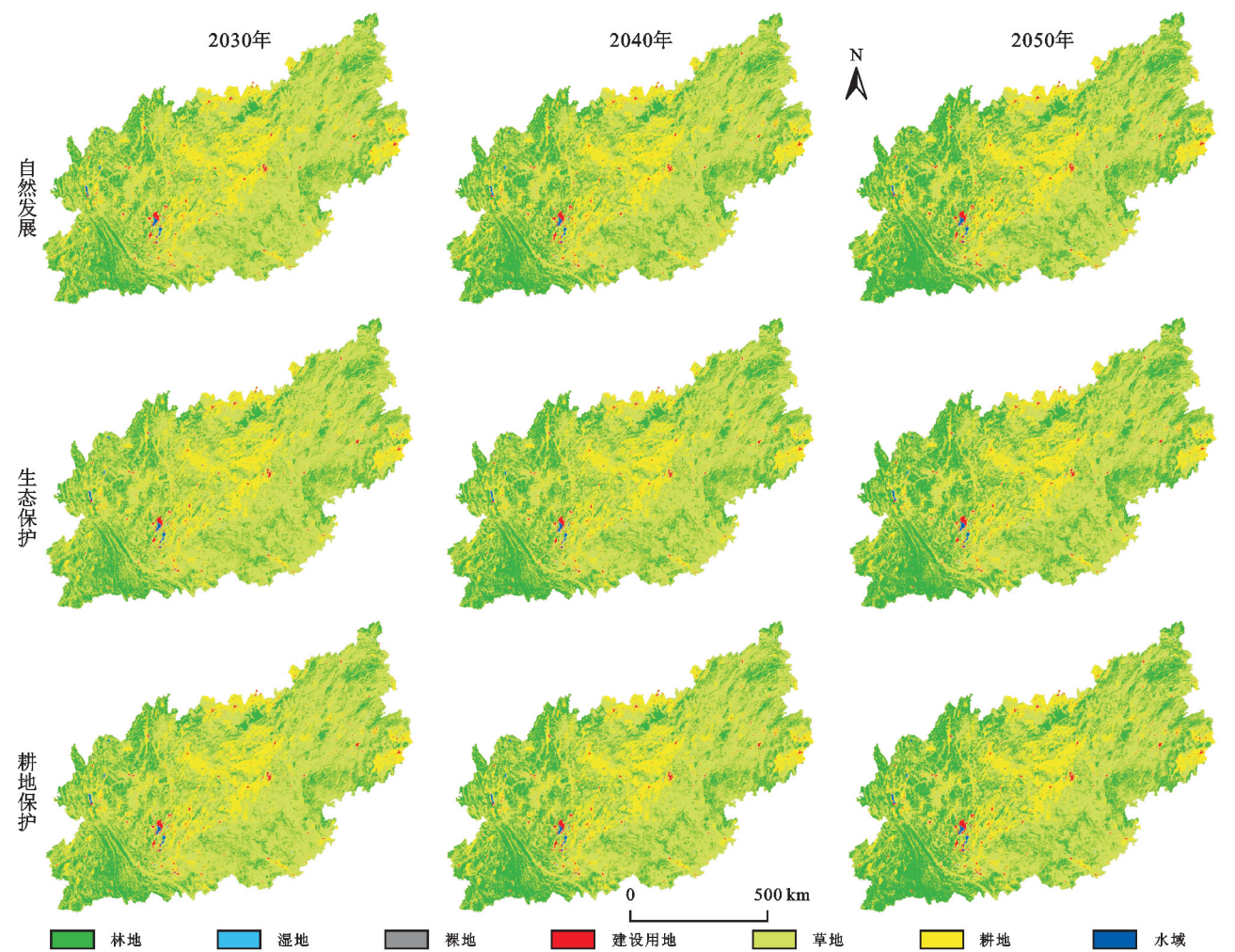


图 3 2030—2050 年云贵高原土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use in Yunnan-Guizhou Plateau during 2030—2050

表 5 2020—2050 年不同发展情景的三项生态系统服务功能变化

Table 5 Changes of three ecosystem service functions in different development scenarios from 2020 to 2050

发展情景	基准年份	自然发展情景			生态保护情景			耕地保护情景		
年份	2020	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
碳储量( $\times 10^9$ /t)	6.704	7.096	7.599	8.103	7.120	7.625	8.130	7.096	7.600	8.103
产水量( $\times 10^9$ /mm)	4.789	4.783	4.775	4.766	4.784	4.775	4.767	4.783	4.775	4.766
土壤保持量( $\times 10^{11}$ /t)	4.226	4.254	4.281	4.311	4.250	4.280	4.307	4.255	4.282	4.311

3 种情景下产水量高值区主要分布在云贵高原东部(常德市、宜昌市和张家界市)、北部(泸州市和宜宾市)和南部(文山州)等区域;低值区主要分布在西部(普洱市、大理州和临沧市)和东南部(河池市和黔南州)。不同情景下各市州单位面积产水量均呈下降趋势,且西部地区下降较为明显,如普洱市、丽江市和玉溪市等市州下降 0.5 mm/hm<sup>2</sup> 以上,而中部及东南部地区下降相对较少,如安顺市、河池市和黔南州等市州下降不足 0.1 mm/hm<sup>2</sup> (图 5)。

3 种情景下土壤保持量高值区主要分布在云贵高原东北部(宜昌市、张家界市和恩施州)、西北部(攀枝花市和凉山州)和西南部(红河州和普洱市)地区;低值区主要分布在中部(贵阳市、毕节市和黔南州)和中西部(曲靖市、昆明市和楚雄州)地区。不同情景下各市州的单位面积土壤保持量均呈增加趋势;且西南、西北和东北地区增加较为明显,如攀枝花市、宜昌市和丽江市等市州增加 200 t/hm<sup>2</sup> 以上;而中部和东南部地区增加相对较少,如安顺市、贵阳市和河池市等市州增加均不足 40 t/hm<sup>2</sup> (图 6)。



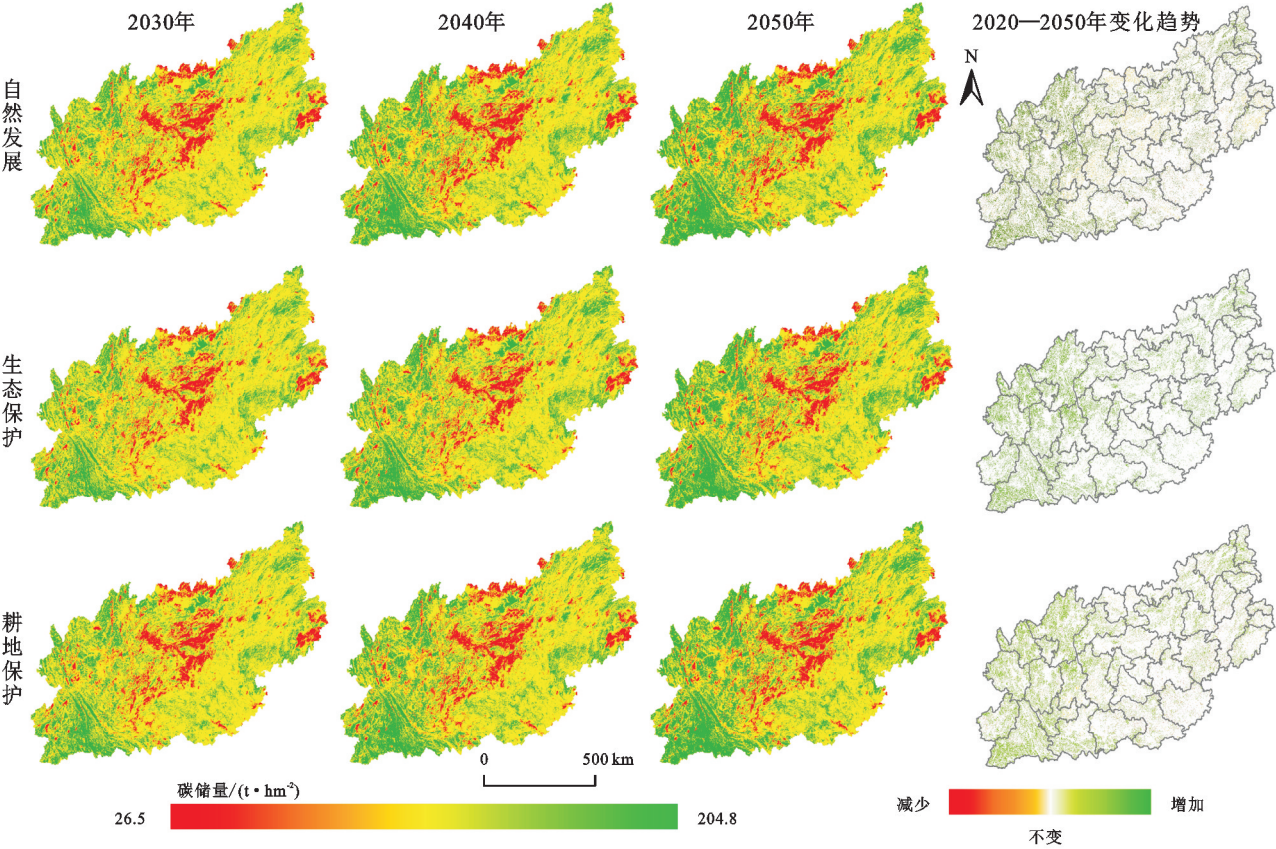


图 4 云贵高原碳储量空间分布及其变化

Fig. 4 Spatial distribution and change of carbon storage in Yunnan-Guizhou Plateau

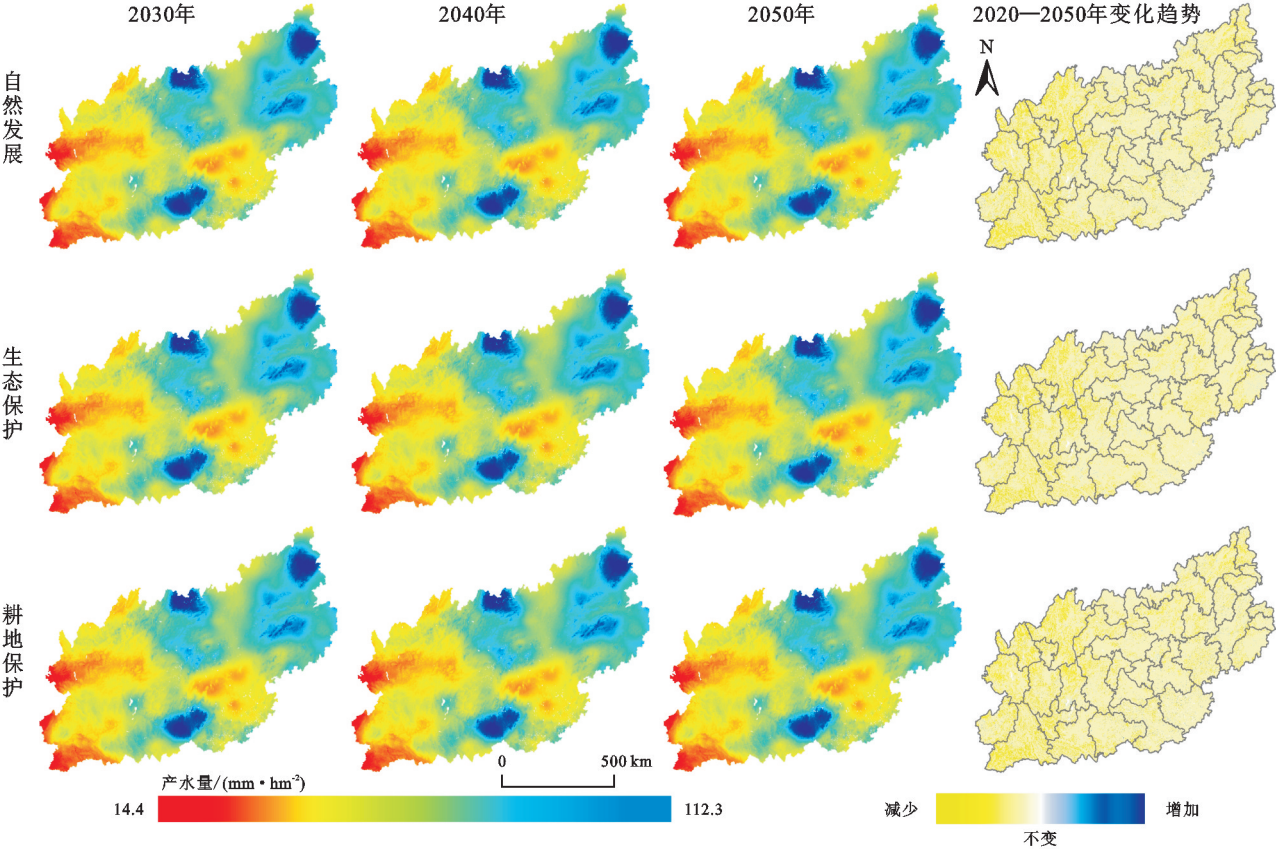


图 5 云贵高原产水量空间分布及其变化

Fig. 5 Spatial distribution and variation of water yield in Yunnan-Guizhou Plateau

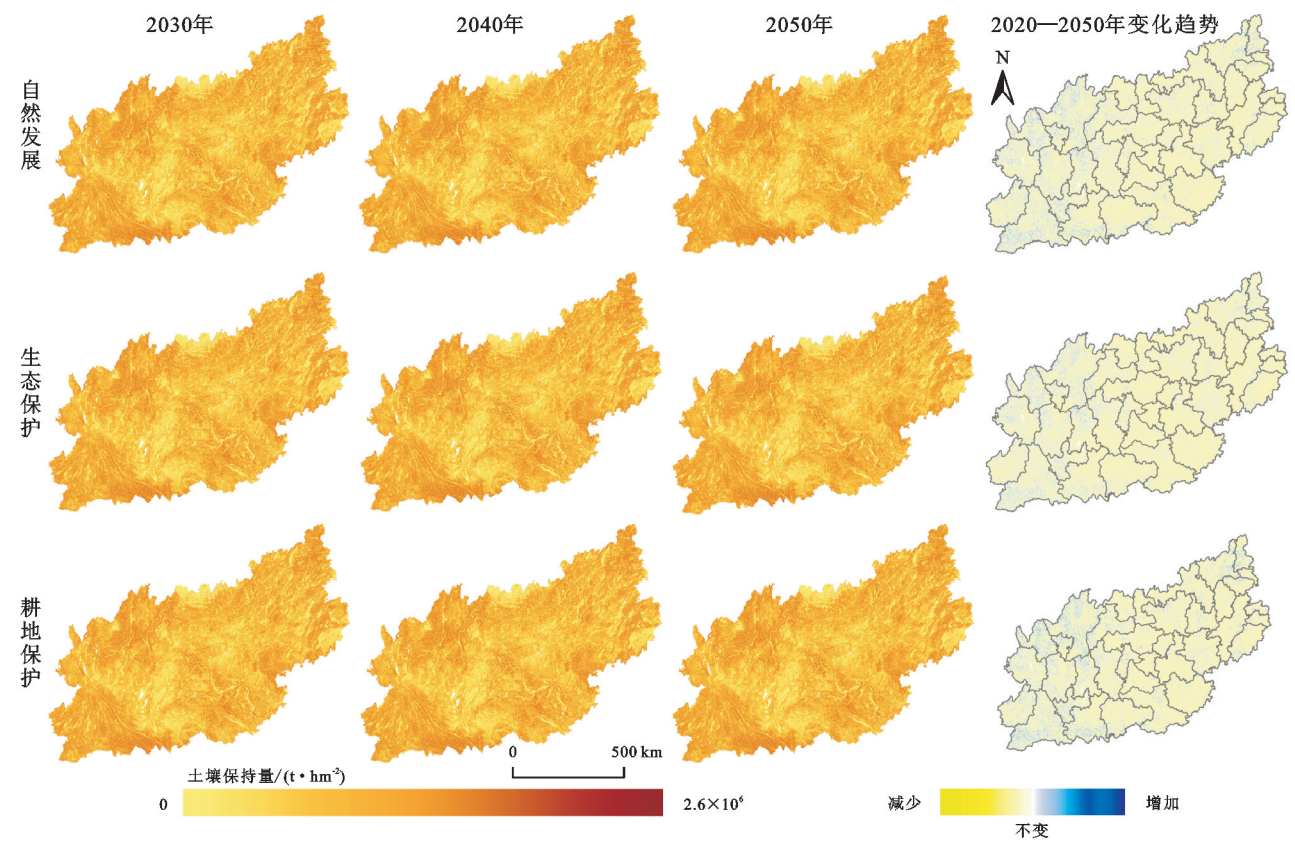


图 6 云贵高原土壤保持量空间分布及其变化

Fig. 6 Spatial distribution and variation of soil conservation on Yunnan-Guizhou Plateau

2.3 不同土地利用类型与生态系统服务功能的相关性

不同情景下,各地类与生态系统服务功能的相关性具有明显差异(表 6)。碳储量和土壤保持量在不同情景下均与林地呈极显著正相关关系( $p<0.01$ ),与草地呈极显著负相关关系( $p<0.01$ ),在自然发展情景和耕地保护情景下与耕地呈弱负相关关系( $p<$

$0.01$ ),在生态保护情景下与耕地呈弱正相关关系( $p<0.01$ )。产水量在 3 种情景下均与林地呈极显著负相关关系( $p<0.01$ ),与草地呈极显著正相关关系( $p<0.01$ ),在自然发展情景和耕地保护情景下与耕地呈弱正相关关系( $p<0.01$ ),在生态保护情景下与耕地呈弱负相关关系( $p<0.01$ )。

表 6 不同土地利用类型与生态系统服务功能变化之间的斯皮尔曼相关性

Table 6 Spearman correlation between different land use types and changes in ecosystem service functions

类型	FoL	GL	WL	FaL	BL	WB	CL
NDS-WY	-0.961**	0.912**	-0.091**	0.222**	0.012	-0.038**	0.184**
NDS-SC	0.871**	-0.821**	0.056**	-0.195**	-0.027*	0.017	-0.133**
NDS-CS	0.974**	-0.902**	0.093**	-0.282**	-0.006	0.034**	-0.157**
EPS-WY	-0.960**	0.956**	-0.112**	-0.269**	0.005	-0.035**	—
EPS-SC	0.867**	-0.872**	0.085**	0.347**	-0.024*	0.019	—
EPS-CS	0.972**	-0.955**	0.113**	0.221**	-0.003	0.036**	—
FPS-WY	-0.964**	0.937**	-0.088**	0.315**	-0.009	0.036**	0.214**
FPS-SC	0.87**	-0.846**	0.051**	-0.358**	-0.022*	-0.028*	-0.16**
FPS-CS	0.977**	-0.95**	0.088**	-0.343**	0.013	-0.034**	-0.182**

注:\*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著;\* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著;林地(FoL);草地(GL);湿地(WL);耕地(FaL);裸地(BL);水域(WB);建设用地(CL);产水量(WY);土壤保持量(SC);碳储量(CS)。

3 讨论

本研究利用 FLUS-InVEST 模型模拟云贵高原未来土地利用与生态系统服务功能的时空分布格

局,发现云贵高原 2020—2050 年土地利用结构发生显著变化,林地和草地之间相互转移,林地持续增加,草地持续减少,与 Wang 等<sup>[18]</sup>的研究结论一致,这与中国实施的一系列生态保护与修复工程有关;此外,



云贵高原边缘山脉林立,如横断山脉、哀牢山和大娄山等大型山脉山势陡峭、海拔较高,人迹罕至,保持着良好的原生林草生态系统,也为云贵高原多样的生态系统服务功能奠定了基础。云贵高原不同生态系统服务功能在空间分布上有明显的差异性,碳储量和土壤保持量高值区主要分布在西部地区,该地区地表植被覆盖率高,森林茂密,而碳储量和土壤保持量与林地呈极显著正相关性,2020—2050 年云贵高原林地面积不断增加,可以储存更多的生物量、拦截降雨和提高坡地稳定性<sup>[32]</sup>,因而具有较好的固碳和土壤保持作用;低值区是云贵高原的经济中心,植被覆盖度低且受人类活动影响较大,主要用地类型为耕地和建设用地,导致该地区的碳储量和土壤保持量相对较低<sup>[33]</sup>。产水量高值区主要集中在东部地区,低值区主要集中在西部地区,这主要是因为云贵高原地势由西到东逐渐变缓,西部靠近青藏高原山势陡峭、植被覆盖度高不易存水,且林地蒸散发能力较强<sup>[34]</sup>,对地表径流具有拦截作用延迟了降水汇流时间,产水量较低;而东部区域地势较缓,草地面积广阔,是云贵高原的主要集水区,汇水面积较大且大量人造地表和耕地改变了水量平衡,使洪峰流量增加<sup>[35]</sup>,产水量较高;陈田田等<sup>[36]</sup>的研究结果表明中国西南地区产水服务的空间格局呈东高西低分布态势,与本文的研究结果相似。

本文选择 FLUS 模型对云贵高原未来土地利用变化进行多情景预测,精度验证表明模型模拟结果较为可靠,但研究过程中仍然存在许多有待进一步考虑的问题。首先,研究区不同栅格尺度下的土地利用数据对 FLUS 模型模拟结果有一定影响,根据研究文献<sup>[11]</sup>和经验表明,当栅格尺度在  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  时,FLUS 模型的模拟精度最高,多数学者均选择该尺度进行研究,本文鉴于研究区范围较大和数据可获取性的限制采用了  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$  的栅格尺度,在未来的研究中可以考虑提高数据的分辨率以验证该栅格尺度是否为云贵高原的最佳研究尺度。其次,InVEST 模型存在一定的局限性,在计算碳储量时忽略了相同地类中 4 个碳库的差异<sup>[37]</sup>,在计算产水量时仅考虑了降水量和蒸发量,但径流、冰川和冻土等其他因素在水文循环中也起着重要作用<sup>[38]</sup>。

## 4 结论

(1) 3 种情景下,云贵高原 2020—2050 年土地利用结构发生明显变化,其中,自然发展情景下,林地通过侵占草地持续增加;耕地保护情景下,耕地面积在 2050 年可占云贵高原总面积的 10.38%;生态保护情景下,林草面积在 2050 年可达研究区总面积的 90%。

(2) 不同情景下,云贵高原地区 2020—2050 年 3 项生态系统服务功能的变化趋势基本一致,即碳储量和土壤保持量呈上升趋势,产水量呈下降趋势。其中,在生态保护情景下,各年碳储量预测值均显著高于另外两种情景,最高为  $8.13 \times 10^9\text{ t}$ ;虽然产水量减少趋势并未得到有效遏制,但减少速率显著低于另外两种情景,降幅为 0.46%,表明生态保护情景是云贵高原可持续发展的最优情景。

(3) 各情景下不同生态系统服务功能的分布变化具有明显的异质性,宜昌市、普洱市和常德市等市州是云贵高原生态系统服务的核心供给区,贵阳市、毕节市和安顺市等市州是研究区各项生态系统服务低值区。今后在制定云贵高原生态系统服务管理和可持续发展策略时,应因地制宜,分类施策,采取有效措施保护生态系统服务核心供给区现有的大面积林地,同时应注意林地面积持续增加可能带来的水资源短缺问题;合理优化生态系统服务功能低值区的土地利用结构,平衡生态保护和经济发展的关系,以促进区域社会经济和生态环境的协调可持续发展。

## 参考文献(References):

- [1] Costanza R, Darge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387(15):253-260.
- [2] Gong Y, Cai M, Yao L, et al. Assessing Changes in the Ecosystem Services Value in Response to Land-Use/Land-Cover Dynamics in Shanghai from 2000 to 2020 [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19(19):12080.
- [3] Millennium ecosystem assessment(MA). *Ecosystems and human well-being* [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [4] Xie H, He Y, Choi Y, et al. Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,704:135427.
- [5] 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[J].*生态学报*,2023,43(11):4473-4487.  
Ren Y M, Liu X P, Xu X C, 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.
- [6] 李静芝,杨丹,荆南三口地区生态系统服务价值时空特征分析[J].*安全与环境学报*,2022,22(6):3529-3540.  
Li J Z, Yang D. Analysis of the spatial and temporal characteristics of ecological service value in the three outlets of southern Jingjiang River[J]. *Journal of Safety*



- and Environment, 2022, 22(6):3529-3540.
- [7] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
- Wang X, Ma B W, Li D, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei province based on FLUS model [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1):230-242.
- [8] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5):911-919.
- Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China model[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.
- [9] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12):3360-3367.
- Huang C H, Yang J, Zhang W J. Development of ecosystem services evaluation models: Research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12):3360-3367.
- [10] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(1):41-51.
- Sun X X, Xue J H, Dong L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(1):41-51.
- [11] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于 FLUS-InVEST 的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响: 以呼包鄂榆城市群为例[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8):1667-1679.
- Wang C Y, Guo X H, Guo L, et al. Land use change and its impact on carbon storage in northwest China based on FLUS-InVEST: A case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(8):1667-1679.
- [12] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 生态学报, 2022, 42(23):9456-9469.
- Shao Z, Chen R, Zhao J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23):9456-9469.
- [13] 高照忠, 黄雅君, 魏海霞, 等. 近 30 年云贵高原水蚀荒漠化遥感监测及影响因子时空分异规律[J]. 测绘通报, 2021(10):117-122.
- Gao Z Z, Huang Y J, Wei H X, et al. Remote sensing monitoring of water erosion desertification and spatio-temporal differentiation of its influencing factors in the Yunnan-Guizhou Plateau in recent 30 years[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(10):117-122.
- [14] 马东旭, 殷晓洁, 周斯怡, 等. 基于中国植被图的西南地区主要乔木物种丰富度格局[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2022, 51(2):249-257.
- Ma D X, Yin X J, Zhou S Y, et al. Pattern of main tree species richness in Southwest China based on Chinese vegetation map[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2022, 51(2):249-257.
- [15] 李阳兵, 谭秋, 王世杰. 喀斯特石漠化研究现状、问题分析与基本构架[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3):27-34.
- Li Y B, Tan Q, Wang S J. Current status, problems analysis and basic framework of karst rocky desertification research[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3):27-34.
- [16] 张钰莹, 孙美莹, 杨荣金, 等. 西南地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1):207-214.
- Zhang Y Y, Sun M Y, Yang R J, et al. Impact of land-use change on ecosystem service value in Southwest China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1):207-214.
- [17] Tong X, Brandt M, Yue Y, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. Nature Sustainability, 2018, 1(1):44-50.
- [18] Wang Z, Liu S, Li J, et al. Remarkable improvement of ecosystem service values promoted by land use/land cover changes on the Yungui Plateau of China during 2001—2020[J]. Ecological Indicators, 2022, 142:109303.
- [19] 许玉凤, 陈宸, 陈洪升. 2001—2013 年云贵高原土地利用动态变化分析[J]. 中国水土保持, 2018(11):44-48.
- Xu Y F, Chen C, Chen H S. Dynamic Variations of Land Use of Yunnan-Guizhou Plateau in the Period of 2001—2013[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(11):44-48.
- [20] Ge W, Han J, Zhang D, et al. Divergent impacts of droughts on vegetation phenology and productivity in the Yungui Plateau, southwest China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127:107743.
- [21] Tian Y, Wang S, Bai X, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566:1297-1308.
- [22] 付永虎, 解文艳, 刘俊青, 等. 基于 GeoSOS-FLUS 模型的江苏省生态福祉时空演变及其预测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(1):71-82.
- Fu Y H, Xie W Y, Liu J Q, et al. Spatio-temporal pattern evolution and prediction of ecological well-being in Jiangsu province based on GeoSOS-FLUS model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(1):71-82.

- [23] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 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[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298.  
Wang B S, Liao J F, Zhu W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [24] 林沛锋, 郑荣宝, 洪晓, 等. 基于 FLUS 模型的土地利用空间布局多情景模拟研究: 以广州市花都区为例[J]. 国土与自然资源研究, 2019, 179(2): 7-13.  
Lin P F, Zhen R B, Hong X, et al. Simulation of land use spatial layout based on FLUS model: A case study of Huadu District, Guangzhou [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2019, 179(2): 7-13.
- [25] 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.
- [26] 秦琦瑞, 李雪梅, 陈庆伟, 等. 基于 FLUS 模型的天山山区未来土地利用变化预估[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1270-1279.  
Qin Q R, Li X M, Chen Q W, et al. Estimation of future land use change in the Tianshan mountainous based on FLUS model [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1270-1279.
- [27] 金贵, 郭柏枢, 成金华, 等. 基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 534-546.  
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 534-546.
- [28] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据. 中英文网络版, 2019, 4(1): 90-96.  
Xu L, He N P, Yu G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [29] 伍斌. 贵阳市景观格局与生态系统服务时空变化研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.  
Wu W. Spatiotemporal changes of landscape pattern and ecosystem services in Guiyang City [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [30] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.  
Fu B, Xu P, Wang Y K, et al. Spatial pattern of water retention in Dujiangyan county [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 789-797.
- [31] 杨薇, 靳宇弯, 孙立鑫, 等. 基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2516-2528.  
Yang W, Ji Y W, Sun L X, et al. Determining the intensity of the trade-offs among ecosystem services based on production-possibility frontiers: Model development and a case study [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2516-2528.
- [32] 王荣嘉, 张建锋. 植被缓冲带在水源地面源污染治理中的作用[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 981-988.  
Wang R J, Zhang J F. Roles of vegetation buffer zones on non-point source pollution control in water source areas [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 981-988.
- [33] 朱俊俊, 高周冰, 王君楠, 等. 南京都市圈生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 383-394.  
Zhu J J, Gao Z B, Wang J X, et al. Spatiotemporal changes and trade-off/synergy relationship of ecosystem services in Nanjing metropolitan area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 383-394.
- [34] Ray D K, Duckles J M, Pijanowski B C. The impact of future land use scenarios on runoff volumes in the Muskegon River Watershed [J]. *Environmental Management*, 2010, 46: 351-366.
- [35] 郝璐, 孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 13-26.  
Hao L, Sun G. Impacts of urbanization on watershed ecohydrological processes: progresses and perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 13-26.
- [36] 陈田田, 王钰茜, 曾兴兰, 等. 西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2253-2270.  
Chen T T, Wang Y X, Zeng X L, et al. Characteristics and the constraint relationship between ecosystem services and vegetation coverage in the Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2253-2270.
- [37] Babbar D, Areendran G, Sahana M, et al. Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123333.
- [38] Wei P, Chen S, Wu M, et al. Using the InVEST model to assess the impacts of climate and land use changes on water yield in the upstream regions of the Shule River Basin [J]. *Water*, 2021, 13(9): 1250.