

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.036.

王丹, 兰安军, 范泽孟, 等. 典型喀斯特区域土地利用变化对生态系统服务价值的响应情景模拟[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 308-315, 325.

Wang Dan, Lan Anjun, Fan Zemeng, et al. Scenario Modeling of Response of Land Use Change to Ecosystem Service Values in A Typical Karst Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 308-315, 325.

典型喀斯特区域土地利用变化对生态系统服务价值的响应情景模拟

王 丹¹, 兰安军¹, 范泽孟^{2,3}, 邹永偲¹, 李文艳¹, 王仁儒¹

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所
资源与环境信息系统国家重点实验室 北京 100101; 3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100039)

摘 要: [目的] 模拟喀斯特地区土地利用变化引起的生态系统服务价值变化, 分析土地利用变化对生态系统服务价值的响应关系, 为区域可持续发展和生态安全保护提供科学依据。 [方法] 以生态环境脆弱的喀斯特地区贵州省为例, 基于 2000 年、2010 年及 2020 年 3 期土地利用数据, 通过 PLUS 模型预测了不同情景下土地利用情况, 并进一步从空间分布上分析了多情景下 ESV 的变化特征。 [结果] (1) 4 种预设情景中, 自然发展情景耕地面积与林地面积呈现大量减少的趋势, 分别减少了 101 676, 208 481 hm²; (2) 在 4 种预设情景下, 研究区 2030 年 ESV 耕地与生态双保护情景(488.694 亿元) > 生态保护情景(488.524 亿元) > 自然发展情景(486.435 亿元) > 耕地保护情景(479.087 亿元)。 (3) 在 4 种预设情景下, 研究区 2020 年及多情景模拟下单位面积 ESV 的空间分布特征较为相似。但自然发展情景下其 ESV 在空间分布上高值区域明显减少。 [结论] ESV 与土地利用变化息息相关, 对未来土地利用进行合理规划是保证良好的生态环境质量最直接的原因, 从可持续发展角度来看, 耕地与生态保护情景下的经济发展才是土地利用的最佳模式。

关键词: 生态系统服务; 情景模拟; 土地利用; PLUS 模型; 贵州省

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0308-08

Scenario Modeling of Response of Land Use Change to Ecosystem Service Values in A Typical Karst Region

Wang Dan¹, Lan Anjun¹, Fan Zemeng^{2,3}, Zou Yongcai¹, Li Wenyan¹, Wang Renru¹

(1. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Resource and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to simulate the change of ecosystem service value caused by land use change in karst region, to analyze the response relationship of land use change to ecosystem service value, and to provide scientific basis for regional sustainable development and ecological security protection. [Methods] Guizhou Province, a karst region with fragile ecological environment, was taken as an example. The PLUS model was used to predict land use under different scenarios based on three periods of land use data in 2000, 2010 and 2020, and to further analyze the characteristics of the changes in ESV under multiple scenarios in terms of spatial distribution. [Results] (1) Among the four preset scenarios, the cultivated land area and forestland area of the natural development scenario showed a large reduction trend, with a reduction

收稿日期: 2023-09-01

修回日期: 2023-10-04

资助项目: 国家自然科学基金“生态过渡带土地覆盖变化情景模拟及归因研究”(41971358)

第一作者: 王丹(1998—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息系统与遥感。E-mail: 2804300965@qq.com

通信作者: 兰安军(1974—), 男, 贵州黔南人, 硕士, 副教授, 主要从事喀斯特环境遥感研究。E-mail: 493486980@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

of 101 676 hm² and 208 481 hm², respectively. (2) Under the four preset scenarios, the 2030 ESV followed the order: dual cropland and ecological protection scenario for the study area (48 869.4 million RMB) > ecological protection scenario (48 852.4 million RMB) > natural development scenario (48 643.5 million RMB) > cropland protection scenario (47 908.7 million RMB). (3) Under the four preset scenarios, the spatial distribution characteristics of ESV per unit area in the study area in 2020 and under multi-scenario simulation were relatively similar. However, the spatial distribution of its ESV under the natural development scenario significantly reduced in the area of high values. [Conclusion] ESV is closely related to land use change, and rational planning for future land use is the most direct reason for ensuring good ecological quality, and from the perspective of sustainable development, economic development under the scenario of arable land and ecological protection is the best mode of land use.

Keywords: ecosystem services; multi-scenario modeling; land use; PLUS model; Guizhou Province

生态系统服务是指人类从生态环境中获得的所有利益,而对生态系统服务进行量化的生态系统服务价值则反映了生态环境质量的高低^[1]。生态系统服务是指人类从生态系统中直接或间接获得的所有利益和福祉^[2],包含了供给服务^[3]、调节服务、文化服务及支持服务。生态系统服务是人类活动与生态环境链接的重要桥梁^[4],对可持续发展及区域生态安全保护是重要的科学支持^[2,5]。生态系统服务价值(ESV)则是将人类从生态系统中获得的利益用数值来表示^[6],以便于直观地反映生态环境质量的优劣,ESV值越大则生态环境质量越好。于1997年,Costanza等^[7]计算出全球ESV,其估算的方法和原理为今后ESV评估奠定了基础,生态系统服务引起了研究者的关注。国内学者谢高地等^[8]在Costanza^[7]的研究基础上针对研究区特点对ESV评价方法进行了修改,在国内得到了广泛的认可和关注。从研究范围尺度上来看,研究者们所研究区域范围有全国、城市群、流域、省、市、县。从研究内容来看,主要是探究区域生态系统评估、生态系统服务价值时空变化、区域生态系统服务变化的驱动因素等。近年来,土地利用/覆被对ESV的影响广泛受到国内外学者的关注^[9],刘志涛等^[10]分析了2000—2015年粤港澳大湾区ESV的时空演变特征;谭昭昭等^[11]以浙江东部沿海城市为对象,对研究区2030年LUCC进行了多情景模拟分析;并计算不同情景下ESV值;El-Hamid等^[12]研究了埃及达米埃塔省LUCC及其对ESV的影响;DeLoyde等^[13]以加拿大安大略省南部为研究对象,分析了不同土地覆盖类型的生态系统服务价值。但现有研究中,鲜有文章对未来生态系统服务价值进行模拟,而选取生态环境脆弱的喀斯特地区更是寥寥无几。因此模拟预测贵州省这一典型喀斯特区域土地利用变化引起的ESV变化具有重要的现实意义。

在全球环境变化研究中,土地利用/覆被是学者

们非常关注的研究课题,土地利用/覆被变化在全球环境变化过程中扮演着非常重要的角色^[14],土地利用变化直接影响生态系统服务价值^[15]。对未来土地利用进行预测能很好地帮助我们测算未来发展情景下的生态环境质量,帮助我们及时规避可能造成生态环境恶化的因素,对于可持续发展具有一定的参考价值。目前,研究领域用于对土地利用变化的模拟模型主要有模拟城市用地变化的CA模型、系统动力学模型(SD模型)、GeoSoS模型、CA-MarKov模型、模拟土地利用转换的CLUES-S模型、集成CA与SD模型的FLUS模型和PLUS模型等,以及主要运用大尺度土地覆被变化情景模拟的土地覆被情景曲面建模(SSMLC)方法^[16-17]。从现有研究内容来看,主要将该类模型应用于土地利用变化时空动态变化分析、多情景模拟下土地利用预测分析、预测未来土地利用变化分析碳排放/吸收变化、不同情景预测下土地利用变化引起的ESV变化等。本文用于土地利用多情景模拟的是PLUS模型,该模型是一个基于土地扩张分析策略(LEAS)的规则挖掘框架和基于多类型随机种子(CARS)的CA模型,该模型不仅可以挖掘出土地扩张还能探究景观变化的驱动因子。相比其他模型,PLUS模型可以获得更高的模拟精度以及更为相似的土地利用覆被景观。LEAS可以帮助研究人员调查潜在的土地利用转换规则。

贵州省地理位置特殊,在长江和珠江的中上游,是筑牢长江、珠江上游的重要生态屏障^[18]。喀斯特地貌分布十分广泛,喀斯特地区因其独特的地球化学表层构造,土层薄,基岩裸露,生态环境十分脆弱,喀斯特区域的生态环境保护,需要采取有效的保护措施,包括合理规划土地利用、加强生态功能区的划定和保护、合理利用水资源、建设生态补偿机制等,以促进喀斯特地区的可持续发展和生态安全。因此本文对贵州省2030年土地利用进行多情景模拟分析,并根据模拟

出来的土地利用变化情况计算研究区生态系统服务价值,判断在不同情景下生态环境质量的变化,以期可为可持续发展以及合理规划土地利用提供参考。

1 数据资料与模型方法

1.1 研究区概况

贵州省地处中国西南腹地(103°36′—109°35′E, 24°37′—29°13′N),与重庆、四川、湖南、云南、广西接壤。全省共有 89 个行政区(县),总面积约为 17.6 万 km²。土地利用类型主要为耕地与林地,两者占据贵州省总用地面积的 80% 左右。森林覆盖率达到 52%,植被资源较为丰富^[19]。属于亚热带湿润季风气候,四季分明,雨热同期。地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜。研究表明,省内的喀斯特区域分布广泛,喀斯特地貌占贵州省国土总面积的 61.9%,在我国西南地区内,贵州省是喀斯特生态脆弱区分布最广且最典型的一个地区。随着经济的快速发展,人类作用于地表上的活动更加频繁,生态环境恶化,贵州省石漠化、水土流失等生态环境问题不断出现,区域生态系统服务功能下降、供给与调节服务冲突不断,制约着地区经济社会发展和生态协调^[20]。

1.2 数据来源

研究中采用 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据,是基于美国陆地资源卫星 Landsat TM 影像通过人机交互解译而得到,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),数据的空间分辨率为 30 m。年均气温与年均降水量数据来源于中国

气象网,道路数据来源于 OSM(OpenStreetMap)官网。DEM 数据来自于贵州省山地资源与环境遥感应重点实验室;其他社会经济数据来源于《贵州省统计年鉴》,以及《全国农产品成本收益资料汇编》。研究所用数据均统一为 30 m×30 m 的像元。

1.3 喀斯特区域生态系统服务价值的空间计算模型

研究以谢高地等学者修改的单位面积 ESV 当量为基础,考虑到各区域情况有所不同,通过查找研究区近 5 年统计年鉴得到了贵州省主要农作物(稻谷、小麦、玉米)的单产(kg/hm²)及播种面积(hm²)的平均值,以及通过《全国农产品成本收益资料汇编》得到了研究区近年的农产品价格(元/kg)稻谷、小麦及玉米的单位价格分别为 2.793、2.76、2.373 元/kg。根据贵州省实际情况进行修正,得到了贵州省生态系统服务价值当量因子经济价值约为 1 926 元/hm²,并制定了贵州省各地类单位面积的单项 ESV 系数表(表 1)。本研究采用 Costanza 等^[7]提出的生态服务价值计算模型。

ESV 当量因子的价值量计算公式如下:

$$VC_a = \frac{1}{7}P \cdot \frac{1}{n}R_1 \quad (1)$$

式中:VC_a为 ESV 当量因子的价值量[元/(hm²·a)];P 为全国平均粮食价格(元/kg);R 为研究区平均粮食产量(kg/hm²);n 为年份。

生态系统服务价值计算公式如下:

$$ESV = \sum S_a VC_a \quad (2)$$

式中:ESV 为生态系统价值;S_a 为 a 类土地利用类型的面积;VC_a 为 ESV 当量因子的价值量(kg/hm²)。

表 1 贵州省生态系统服务价值系数表

Table 1 Table of ecosystem service value coefficients in Guizhou Province

元/(hm²·a)

一级分类	二级分类	生态系统服务价值系数						合计
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
供给服务	食物生产	2129	486	449	1262	0	0	4326
	原料生产	472	1117	661	703	0	0	2954
	水资源供给	-2514	578	366	10479	0	0	8909
	气体调节	1714	3674	2324	2572	0	39	10324
调节服务	气候调节	896	10995	6145	5673	0	0	23708
	净化环境	260	3222	2029	8813	0	193	14516
	水文调节	2880	7195	4501	121811	0	58	136445
	土壤保持	1002	4474	2832	3121	0	39	11466
支持服务	维持养分循环	299	342	218	241	0	0	1100
	生物多样性	327	4074	2575	10036	0	39	17051
文化服务	美学景观	144	1787	1137	6376	0	19	9463
合计		7609	37943	23237	171086	0	385	240263

1.4 喀斯特地区土地利用情景模拟模型

1.4.1 模型及驱动因子选取 PLUS 模型是由中国地质大学(武汉)高性能空间计算智能实验室研发^[21],由土地扩张分析策略(LEAS)的规则挖掘框架

和基于多类型随机种子(CARS)的元胞自动机模型^[22],PLUS 模型基于系统动力学原理,它模拟了地理空间中的土地利用变化过程,并考虑了多个因素的相互作用,如经济、社会、环境和政策等。

参考前人的研究,考虑数据的可获得性和可用性。研究选取了 DEM、坡度、坡向、年平均降水量、年平均气温、OSM 数据等 12 个驱动因子来进行 2030 年土地利用多情景模拟预测。

1.4.2 土地利用情景设计 研究总共设定对 2030 年土地利用进行 4 种发展情景的模拟预测包括按照惯性的自然发展情景、侧重耕地保护的耕地保护发展情景、侧重林地、草地和水域保护的生态保护发展情景以及耕地生态两者兼顾的耕地生态双保护发展情景,参考前人的研究^[23],结合研究区实际情况设计如下的转换概率。

(1) 自然发展情景。按照 PLUS 模型自带的 MarKov 模型对未来土地利用数量进行预测,并根据土地类型之间的转换概率进行预测。

(2) 耕地保护情景。按照 PLUS 模型自带的 MarKov 模型对未来土地利用数量进行预测,基于自然发展趋势,把耕地向其他地类面积转换概率降低 50%,将水域、草地和未利用地向耕地转换概率分别调高 10%,20%,50%,其他地类保持自然发展的概率。

(3) 生态保护情景。按照 PLUS 模型自带的 MarKov 模型对未来土地利用数量进行预测,基于自然发展趋势,将林地、耕地、水域和草地地类向建设用地转化的概率分别降低 50%,30%,20%,30%,林地向草地的转移概率降低 50%,水域和草地向林地转移概率调高 20%,建设用地向林地转移概率调高 10%。

(4) 耕地与生态双保护情景。按照 PLUS 模型自带的 MarKov 模型对未来土地利用数量进行预测,基于自然发展趋势,降低 50%耕地向其他地类(除了林地)的转化概率,草地、林地、水域向建设用地转化分别降低 20%,50%,20%,林地向其他用地转移的概率降低 50%,水域和草地向林地转移的概率调高 30%,建设用地向林地转移概率调高 10%。

1.5 喀斯特地区土地利用变化冷热点分析模型

热点分析(Getis-Ord G_i^*)用于识别具有显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类^[24],该方法能反映出研究区 ESV 是否存在高值集聚和低值集聚现象,以及确定热点区域、次热点区域、过渡区域、次冷点区域、冷点区域发生聚类空间的位置^[24],反映研究区 ESV 空间分布特征。计算公式如下^[25]:

$$G_i^* = (\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j) / \sum_{j=1}^n x_j \quad (3)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{s \sqrt{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2] / (n-1)}} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{(\sum_{j=1}^n x_j^2) / (n-1) - (\bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: G_i^* 为斑块的聚集指数; n 为斑块总数; x_i 与 x_j 为斑块 i, j 的属性值; w_{ij} 为 i 与 j 的空间权重矩阵。 \bar{x} 和 S 分别为样本均值和标准差。当统计显著时,高值 $Z(Z>0)$ 表示热点(高值)集聚。低值 $Z(Z<0)$ 表示冷点(低值)集群,非显著点在统计上不显著。

2 结果与分析

2.1 模拟精度检验

模型验证用于判断模型参数设置在研究区的合理性,是检验模型在研究区适用性的标准,Kappa 系数能很好反映出模拟结果的精准性。该模型可以直观反映模拟效果,也可以用于评估两幅图的一致性。计算公式如下^[24]:

$$Kappa = (P_o - P_e) / (1 - P_e) \quad (6)$$

式中: P_o 为模拟土地利用现状与实际状况之间的相对一致性; P_e 为偶然一致性的假设概率。Kappa 系数的取值范围为 $[0,1]$,其值越接近于 1 表明模拟精度越好,模拟土地利用的结果与实际土地利用分布越相似。

以 2010 年贵州省的土地利用数据为基础,模拟贵州省 2020 年土地利用情况,然后,将模拟结果与 2020 年实际状况进行精度检验,该研究 Kappa 系数为 0.84,模拟总体精度为 91%,由此得出模拟预测的结果比较精准,综上,PLUS 模型适用于研究区未来土地利用的模拟预测。

2.2 土地利用变化情景分析

从表 2 和图 1 可以看出,2020 年贵州省土地利用面积以林地为主,占据全省总面积的 52.89%,其次占比较大的是耕地和草地,分别占贵州省总面积的 27.42%,17.63%,在设定的 4 种情景中占比与 2020 年总体上较为相似。而在不同情景预测下,我们所设定保护地类有所侧重,相比 2020 年实际土地利用情况,2030 年自然发展情景下耕地数量与林地数量有所减少,分别减少了 101 676,208 481 hm^2 ,自然发展趋势下城镇化快速扩张;2030 年耕地保护情景下,耕地数量得到了有效的保护,耕地数量比 2020 年增加了 12 465 hm^2 ,林地数量有所减少,减少了 203 058 hm^2 ;2030 年生态保护情景下,林地、草地及水域的面积得到保护,并分别增加了 21 284,77 807,14 053 hm^2 ,同时耕地数量减少了 109 213 hm^2 ;2030 年耕地与生态保护情景下,对耕地与林地进行保护设定下,耕地的数量没有变化,林地数量增加了 62 096 hm^2 。在 4 种预设情景中,耕地保护情景下的耕地面积最大,耕地与生态双保护情景下林地面积最大。不同种情景中的各土地利用类型均发生了不同程度的转化,导致不同情景下不同地类面积均不相同。

表 2 贵州省多情景模拟土地利用面积

Table 2 Multi-scenario modeling of land use area in Guizhou Province

hm²

土地利用类型	2020 年土地利用面积	2030 年自然发展情景面积	2030 年耕地保护情景面积	2030 年生态保护情景面积	2030 年耕地与生态双保护情景面积
耕地	4845147	4743470	4969798	4735934	4845147
林地	9348183	9139703	9145126	9369468	9410280
草地	3115844	3237286	3184073	3193652	3030521
水域	118977.8	165513.7	118521.9	133030.4	142267.9
建设用地	242152.7	384264.6	252782.8	238635.9	242163.3
未利用地	3024.63	3094.02	3029.13	2610.27	2951.46
总计	17673330	17673330	17673330	17673330	17673330

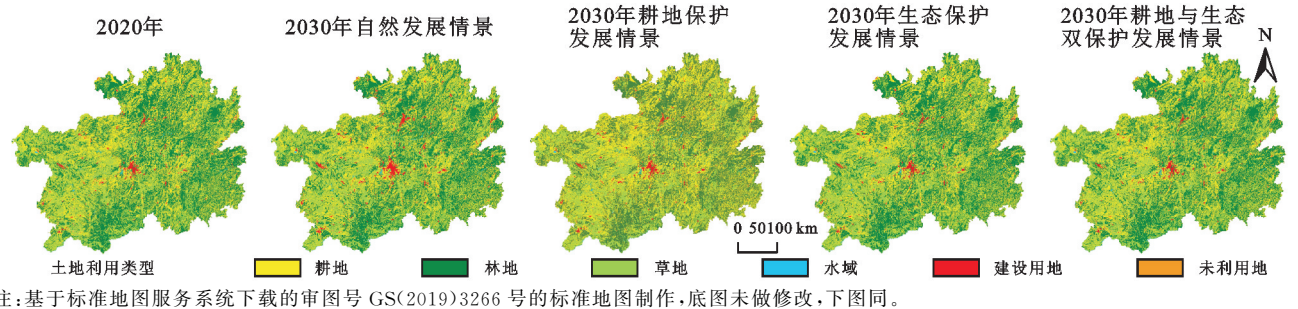


图 1 贵州省多情景模拟土地利用情况

Fig. 1 Multi-scenario simulation of land use in Guizhou Province

2.3 生态系统服务价值变化情景分析

2.3.1 ESV 时间变化分析 由表 3 可知,在 4 种发展情景下林地对 ESV 总值贡献率都是最大的,贡献率都达到了研究区 ESV 总值的 71% 以上,是因为林地面积在不同情景下均占据研究区地类面积的 50% 以上,且林地在调节服务方面贡献值较大,林地调节服务系数为 25 086 元/(hm² · a)。研究区 ESV 值 2030 年耕地与生态双保护情景(488.694 亿元) > 生态保护情景(488.524 亿元) > 自然发展情景(486.435 亿元) > 耕地保护情景(479.087 亿元),究其原因,在耕地与生态保护优先发展的情景下,耕地、林地及水域的面积高于其他 3 种模拟情景,林地与水域对生态系统服务价值贡献较大。耕地保护优先发展的情景下,其 ESV 值为 479.087 亿元,相比 2020 年减少 5.249 亿元,是因为在耕地保护情景下,林地、水域面积减少,建设用地面积增加,过度耕种对生态环境的破坏极大,只注重耕地的保护而忽略林地草地等用途是不可取的。自然发展情景的 ESV 值为 486.435 亿元,相比 2020 年上升了 2.099 亿元,在自然发展情景下耕地与林地的面积在减少,而水域的面积增加了 46 535.85 hm²,水域面积的增加为研究区贡献了较大的生态系统服务价值基数。生态保护情景下林地、草地及水域的 ESV 值都有较大幅度的上升,耕地 ESV 值呈现下降趋势。耕地生态保护情景下 ESV 值为 488.694 亿元,比 2020 年高 4.358 亿元,显然该情景下研究区 ESV 值

上升最快,证明该情景下生态质量最好。

2.3.2 ESV 空间变化分析 基于单元格网在空间上统计研究区 2020 年及多情景模拟下 2030 年单位面积的 ESV,各情景模拟中,不同类型与不同等级的 ESV 在空间上相互转化。如图 2 所示,2020 年及多情景模拟下的空间分布特征较为相似:高值区多集中于西南部、东南部及中部偏北的区域,低值多集中于西部地区。相比于 2020 年的 ESV,2030 年耕地保护情景模拟下各区域高值分布区域均有减少,而贵州省内西南区域的减少表现较为明显。研究区 2030 年自然发展情景下的高值区域大量减少,中部及西部低值区域增加。而导致以上变化的直接因素是土地利用类型的变化,ESV 高低值分布特征与研究区土地利用特征呈现出——对应的特点,ESV 高值区域分布的土地利用类型多为林地、草地及水域分布;相反,低值区域则多为建设用地,其他地类分布较少。

2.3.3 生态系统服务价值变化情景的冷热点分析 建立 10 km × 10 km 的网格单元,基于热点分析模型,分析计算得出 2020 年与 2030 年不同情景模拟下的贵州省的生态系统服务价值的冷热点分布特征图,最后,采用自然断点的方法根据贵州省生态系统服务价值在空间上的聚集程度由低到高进行划分 5 个等级:冷点区、次冷点区、过渡区、次热点区及热点区^[24]。

如图 3 所示,2020 年及 2030 年多情景模拟下冷

热点分布极为相似,热点区域集中分布在西南部、东部及中部偏北的区域。研究区冷点及热点区域较为分散,主要为次热点及过渡区域,分布较为集中且广泛。热点区域多为林地、草地及水域大量分布区域,相反建设用地大量分布区域则显示为冷点聚集区域,显然土地利用变化与 ESV 具有最直接的相关性。

表 3 贵州省多情景模拟下生态系统服务价值

Table 3 Value of ecosystem services under multi-scenario modeling in Guizhou Province

亿元

土地利用类型	生态系统服务价值				
	2020 年土地利用	2030 自然发展情景	2030 耕地保护情景	2030 生态保护情景	2030 耕地与生态保护情景
耕地	36.867	36.093	37.815	36.036	36.867
林地	354.706	346.796	347.002	355.514	357.063
草地	72.406	75.228	73.991	74.214	70.423
水域	20.356	28.317	20.278	22.760	24.340
建设用地	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
未利用地	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
总计	484.336	486.435	479.087	488.524	488.694

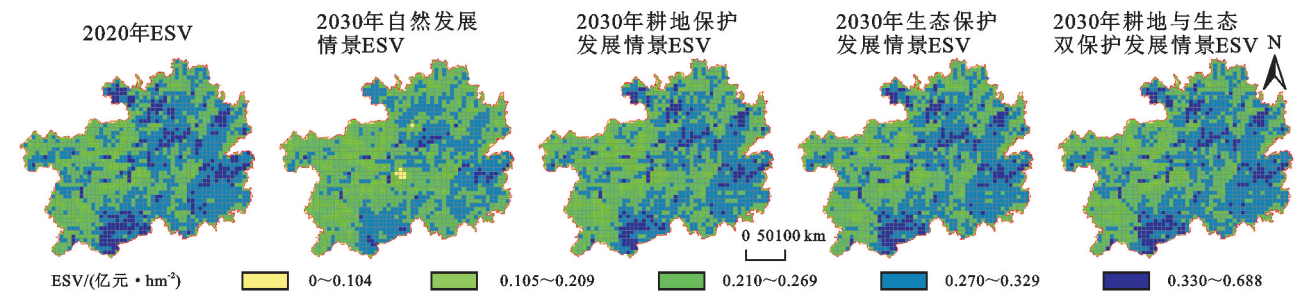


图 2 多情景模拟下 ESV 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ESVs under multi-scenario simulation

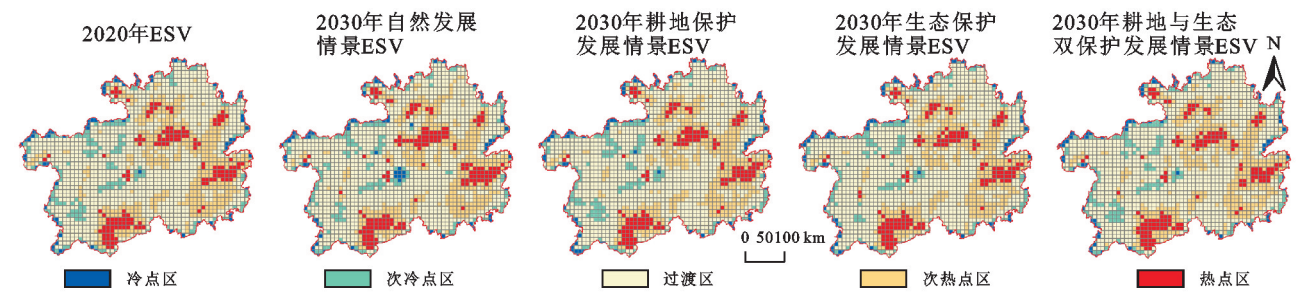


图 3 ESV 热冷点分析 under multi-scenario simulation

Fig. 3 ESV thermal land analysis under multi-scenario simulation

3 讨论与结论

3.1 讨论

土地利用类型的变化是导致研究区 ESV 变化最直接的原因,谈旭等^[26]分析了伊犁河谷 ESV 变化及其驱动因素,在王颖慧等^[27]的基础上进一步证实土地利用变化与 ESV 呈正相关关系。现有研究内容中学者研究了区域 ESV 时空演变及驱动因子^[28],模拟分析区域在多情景模拟预设下 ESV 变化特征^[10],而对典型喀斯特地区的 ESV 多情景模拟的分析较少。文中采用 PLUS 模型,以贵州省 2020 年的土地利用数据为基础,对贵州省 2030 年的土地利用情况分为多个情景模拟,根据模拟的土地利用结果进一步计算出贵州省不同情景下的生态系统服务价值变化。对

研究区 2020 年及多情景模拟下土地利用变化进行分析,进一步计算 2020 年及多情景模拟下研究区 ESV 的变化,并对不同情景下 ESV 进行比较。在预设的 4 种情景当中,耕地与生态双保护情景下的研究区 ESV 达到最高,充分说明,在该情景模拟下的生态环境质量最优,能够保证耕地满足人类基础的生产生活需求,同时更好地保护生态环境,更好地践行可持续发展的道路。研究区 ESV 高值区与土地利用类型息息相关,高值区域分布土地利用类型多为林地、草地及水域,而低值区域多分布为建设用地,极少分布林地、草地及水域等土地利用类型,这与解文艳^[29]、王金凤^[30]等研究结果一致,土地利用的变化会对生态环境质量产生较大的影响。进一步证实,只是单方面的生态保护、耕地保护、城镇发展,这对于区域发展来

而言,是不利于高质量发展及生态文明建设,因此要调节好开发与保护两者的关系。优化土地利用格局,注重国土空间开发保护。根据《贵州省国土空间生态修复(2021—2035)规划》文件,贵州省开展了相关的生态保护工作,并取得了一定的成效。但生态问题仍然是一个需要长期关注的问题,始终要把生态保护放在首位,习近平总书记多次强调“贵州这样一个自然生态比较脆弱的省份,尤其要把生态建设摆在突出位置,对此绝不能掉以轻心”。保护生态安全,一是要坚持“山水林田湖草是生命共同体的理念”;二是要坚持保护优先,自然恢复为主;三是要持续推进生态保护工程,践行退耕还林、封山育林等生态保护政策。

研究在模型设定转化规则方面存在一定的主观性;对于在土地利用驱动因子的选取上,由于数据的可用性与可获得性,不能全面地将未来土地利用驱动因子加入模型预测中。本文采用ESV当量因子法对不同情景下生态系统服务价值进行测算,虽然根据研究区情况进行了修订,但本研究分析是基于2020年的粮食产量经济价值进行预测评价,存在高估或者低估未来生态系统服务价值变化幅度的可能性。在后续的研究中,可以提高数据精度,在可获取的情况下尽量多选取可能影响未来土地利用变化的驱动因子。

3.2 结论

(1) 在4种预设情景下,自然发展情景下耕地与林地面积大量减少,而在其他3种条件约束情景下则会得到较好保护,因此对土地利用合理规划能有效保护生态环境,前瞻性的规划具有较大的现实意义。

(2) 在4种预设情景下,耕地与生态双保护情景下的ESV值最高,说明该情景下生态环境质量得到了最有效保护。因此,在未来土地利用规划中,我们既要保证耕地面积数量,也要重视对林地、草地及水域的保护,这与当今生态文明建设的要求相契合。

(3) 在4种预设情景下,研究区2020年及多情景模拟下单位面积ESV值的空间分布特征较为相似。但自然发展情景下其ESV在空间分布上高值区域明显减少。对研究区域ESV进行冷热点分析,呈现热点区域集中分布在西南部、东部及中部偏北的区域,冷点及热点区域分散分布,次热点及过渡区域集中且广泛分布特征,冷热区域分布特征与其土地利用类型相对应。

参考文献(References):

- [1] Chaikaew P, Hodges A W, Grunwald S. Estimating the value of ecosystem services in a mixed-use watershed: A choice experiment approach[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 228-237.
- [2] 苏伯儒, 刘某承. 基于生态系统服务权衡的生态系统管理策略研究进展[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(7): 1848-1862.
- Su B R, Liu M C. Research progress in ecosystem management strategies based on ecosystem services trade-offs[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(7): 1848-1862.
- [3] 赵先超, 田一豆, 张潇湘. 长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 215-225.
- Zhao X C, Tian Y D, Zhang X X. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in Changzhutan urban agglomeration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 215-225.
- [4] 王浩, 赵旭, 赵菲菲, 等. 金沙江梯级库区生态系统服务供需耦合协调度及驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(1): 280-289.
- Wang H, Zhao X, Zhao F F, et al. Coupling coordination degree and driving factors of ecosystem service supply and demand in Jinsha River cascade reservoir area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1): 280-289.
- [5] Jiang W, Wu T, Fu B J. The value of ecosystem services in China: A systematic review for twenty years[J]. *Ecosystem Services*, 2021, 52: 101365.
- [6] 姜晗, 吴群. 基于LUCC的江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(11): 2712-2725.
- Jiang H, Wu Q. Ecological service value evaluation and temporal-spatial evolution characteristics in Jiangsu Province based on LUCC[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11): 2712-2725.
- [7] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [8] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 等. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. *山地学报*, 2003, (1): 50-55.
- Xie G D, Lu C X, Xiao Y, et al. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Mountain Research*, 2003(1): 50-55.
- [9] 陈万旭, 曾杰. 中国土地利用程度与生态系统服务强度脱钩分析[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(11): 2853-2864.
- Chen W X, Zeng J. Decoupling analysis of land use intensity and ecosystem services intensity in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(11): 2853-2864.
- [10] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2797-2813.
- Liu Z T, Wang S J, Fang C L. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11):

- 2797-2813.
- [11] 谭昭昭,陈毓遒,丁憬枫,等.浙江东部沿海城市土地利用模拟及生态系统服务价值评估[J].应用生态学报, 2023,34(10):2777-2787.
- Tan Z Z, Chen Y Q, Ding J F, et al. Simulation of land use and assessment of ecosystem service value in the eastern coastal cities of Zhejiang Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34 (10):2777-2787.
- [12] El-Hamid H T A, Nour-Eldin H, Rebouh N Y, et al. Past and future changes of land use/land cover and the potential impact on ecosystem services value of Damietta Governorate, Egypt[J]. Land, 2022,11(12):2169.
- [13] DeLoyde C N M, Mabey W E. Ecosystem service values as an ecological indicator for land management decisions: A case study in southern Ontario, Canada[J]. Ecological Indicators, 2023,151:110344.
- [14] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5): 789-802.
- Liu J Y, Ning J, Kuang W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73 (5):789-802.
- [15] 范泽孟.青藏高原植被生态系统垂直分布变化的情景模拟[J].生态学报,2021,41(20):8178-8191.
- Fan Z M. Scenario simulation of vertical distribution changes of vegetation ecosystem in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(20):8178-8191.
- [16] 范泽孟.基于 SSP-RCP 不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟[J].地理学报,2022,77(1):228-244.
- Fan Z M. Simulation of land cover change in Beijing-Tianjin-Hebei region under different SSP-RCP scenarios [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(1):228-244.
- [17] Fan Z M. Simulation of land-cover change in Jing-Jin-Ji region under different scenarios of SSP-RCP[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022,32(3):421-440.
- [18] 刘世梁,董玉红,孙永秀,等.基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分析:以贵州省为例[J].生态学报,2019,39(23):8957-8965.
- Liu S L, Dong Y H, Sun Y X, et al. Priority area of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on the improvement of ecosystem services: A case study of Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(23):8957-8965.
- [19] 钱方艳,兰安军,范泽孟,等.贵州省 2000—2020 年 NPP 时空变化特征及影响因素[J].水土保持研究, 2023,30(5):408-416,426.
- Qian F Y, Lan A J, Fan Z M, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of NPP in Guizhou Province from 2000 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):408-416,426.
- [20] 颜萍,熊康宁,檀迪,等.喀斯特石漠化治理不同水土保持模式的生态效应研究[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2016,34(1):1-7,21.
- Yan P, Xiong K N, Tan D, et al. Ecological effects of different soil and water conservation modes in Karst rocky desertification control[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2016, 34 (1): 1-7,21.
- [21] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
- Sun F H, Fang F M, Hong W L, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):151-158.
- [22] 杨朔,苏昊,赵国平.基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟:以汉中市为例[J].干旱区资源与环境,2022,36(10):86-95.
- Yang S, Su H, Zhao G P. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(10):86-95.
- [23] 罗丹,周忠发,陈全,等.喀斯特地区碳储量对土地利用模式的响应:以南北盘江流域为例[J].生态学报,2023, 43(9):3500-3516.
- Luo D, Zhou Z F, Chen Q, et al. Responses of carbon storage to land use pattern in Karst Area: A case study of Nanbei Panjiang River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3500-3516.
- [24] 赵霁雨,崔柳,王佳,等.基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究:以湛江市中心城区为例[J].生态学报,2023,43(15): 6307-6320.
- Zhao J Y, Cui L, Wang J, et al. Multi-scenario simulation of urban green space development and construction timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(15):6307-6320.
- [25] 赵筱青,石小倩,李取豪,等.滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J].地理学报,2022,77 (3):736-756.
- Zhao X Q, Shi X Q, Li Y H, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the Karst mountainous areas of southeastern Yunnan [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(3):736-756.

- [21] 石若晗,陈佳,唐红林,等.石羊河流域农户生计脆弱性测度及致脆机理[J].水土保持研究,2023,30(6):386-395,405.
- Shi R H, Chen J, Tang H L, et al. Assessment of farmers' livelihood vulnerability and its mechanism in Shiyang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):386-395,405.
- [22] Li P X, Fan J. Regional ecological vulnerability assessment of the Guangxi Xijiang River economic belt in southwest China with VSD model [J]. Journal of Resources and Ecology, 2014,5(2):163-170.
- [23] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram[J]. Global Environmental Change, 2007,17(3/4):472-485.
- [24] 薛冰,许耀天,赵冰玉.地理学视角下 POI 大数据的应用研究及反思[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2022,40(4):1-6,14,128.
- Xue B, Xu Y T, Zhao B Y. Application and reflection of POI big data from the perspective of geography[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences, 2022,40(4):1-6,14,128.
- [25] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. A framework for the development of the SERV model: A Spatially Explicit Resilience-Vulnerability model [J]. Applied Geography, 2014,51:158-172.
- [26] 阎姝伊,李嘉艺,王瑶函,等.浅山区乡镇社会-生态系统脆弱性演化与模拟:以北京平谷为例[J].生态学报,2022,42(17):6912-6921.
- Yan S Y, Li J Y, Wang Y H, et al. The vulnerability evolution and simulation of town's social ecosystem in shallow mountain area: A case study of Pinggu District in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6912-6921.
- [27] 张渝萌,李晶,曾莉,等.基于 OWA 多属性决策的生态系统服务最优保护区选择研究:以渭河流域(关天段)为例[J].中国农业科学,2019,52(12):2114-2127.
- Zhang Y M, Li J, Zeng L, et al. Optimal protected area selection: Based on multiple attribute decision making method and ecosystem service research: Illustrated by Guanzhong-Tianshui economic region section of the Weihe River Basin [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019,52(12):2114-2127.
- [28] 张洪,王安琦,宋贝扬.基于 OWA 的大理市土地生态安全评价研究[J].地理科学,2017,37(11):1778-1784.
- Zhang H, Wang A Q, Song B Y. Evaluation of land ecological security in Dali city based on OWA [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(11):1778-1784.
- [29] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988,18(1):183-190.

(上接第 315 页)

- [26] 谈旭,王承武.伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J].应用生态学报,2023,34(10):2747-2756.
- Tan X, Wang C W. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value in Ili Valley and its driving factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(10):2747-2756.
- [27] 王颖慧,丁建丽,李晓航,等.伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响:基于强度分析模型[J].生态学报,2022,42(8):3106-3118.
- Wang Y H, Ding J L, Li X H, et al. Impact of LUCC on ecosystem services values in the Yili River Basin based on an intensity analysis model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(8):3106-3118.
- [28] 高春莲,胡宝清,黄思敏,等.山江海耦合关键带生态系统服务价值时空变化及其权衡研究[J].水土保持研究,2024,31(2):264-274,286.
- Gao C L, Hu B Q, Huang S M, et al. Spatio-temporal changes and trade-offs of ecosystem service value in mountain-river-sea coupling key zone research [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2): 264-274,286.
- [29] 解文艳,付永虎,杨殿闯,等.基于土地利用变化的江苏省生态系统服务价值时空演变与模拟预测[J].地域研究与开发,2022,41(5):126-132,158.
- Xie W Y, Fu Y H, Yang D C, et al. Spatio-temporal evolution and simulation forecast of ecosystem service value in Jiangsu Province based on land use changes [J]. Areal Research and Development, 2022,41(5): 126-132,158.
- [30] 王金凤,刘方,白晓永,等.西南地区生态系统服务价值时空演变及模拟预测[J].生态学报,2019,39(19):7057-7066.
- Wang J F, Liu F, Bai X Y, et al. The spatial and temporal evolution and simulation forecast of ecosystem service values in southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(19):7057-7066.