

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.01.024

CSTR:32310.14.stbxb.2025.01.024

胥蕊,朱大明,王琳,等.云南省土地利用生态风险与碳储量时空关联分析与预测[J].水土保持学报,2025,39(1):217-228.

XU Rui, ZHU Daming, WANG Lin, et al. Spatial and temporal correlation analysis and prediction of land use ecological risk and carbon stock in Yunnan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 217-228.

云南省土地利用生态风险与碳储量时空关联分析与预测

胥蕊,朱大明,王琳,彭秋志

(昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093)

摘要:[目的] 探究土地利用生态风险与碳储量的关联性,以提高区域生态风险防范和固碳能力,从而有效指导环境管理政策的制定。[方法] 利用景观格局指数、PLUS 和 InVEST 模型,对自然发展、经济发展和生态保护情景下云南省土地利用生态风险和碳储量时空变化进行分析和预测。利用 Spearman 相关性分析和空间自相关分析探讨二者的关联特征。[结果] 1) 云南省土地利用以林地为主,超过总面积的 57%。2) 2000—2020 年云南省生态风险缓慢下降,较低和中风险面积超过 50%,空间分布相对稳定,风险变化主要发生在相邻等级之间,高等级风险区向低等级风险区转移 39 675.06 km²。3) 云南省碳储量先增后减,2000—2020 年共减少 2.257×10⁷ t,林地的碳储量贡献最大,耕地、草地和林地大面积转变为建设用地是造成碳储量减少的主要原因。4) 2030 年,3 种情景下云南省生态风险和碳储量均下降。生态保护情景下,林地面积较 2020 年增加 895.83 km²,较高和高生态风险面积显著减少,碳储量的减少得到抑制,说明该情景是云南省今后发展的最优情景。5) 研究区生态风险与碳储量呈负相关,空间分布主要以低-高和高-低聚集为主。[结论] 研究结果根据云南省生态风险和碳储量空间聚集特征提出不同建议,可为云南省生态风险防范和提升碳储量提供科学依据。

关键词: 土地利用; 生态风险评价; 碳储量; 空间自相关; 云南省

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0217-12

Spatial and Temporal Correlation Analysis and Prediction of Land Use Ecological Risk and Carbon Stock in Yunnan Province

XU Rui, ZHU Daming, WANG Lin, PENG Qiuzhi

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: [Objective] To explore the correlation between land use ecological risk and carbon storage, in order to improve the regional ecological risk prevention and carbon sequestration capabilities, so as to effectively guide the formulation of environmental management policies. [Methods] The landscape pattern index, PLUS and InVEST models were used to analyze and predict the spatial and temporal changes of land use ecological risk and carbon storage in Yunnan Province under the scenarios of natural development, economic development, and ecological protection. Spearman correlation analysis and spatial autocorrelation analysis were used to explore the correlation characteristics. [Results] 1) Land use in Yunnan Province is dominated by forest land, which exceeded 57% of the total area. 2) From 2000 to 2020, the ecological risk in Yunnan Province decreased slowly, with lower and medium-risk areas exceeding 50%, the spatial distribution remained relatively stable, the change of risk mainly occurred between adjacent levels, and the high-level risk area transferred to the low-level risk area by 39 675.06 km². 3) Carbon storage in Yunnan Province initially increased and then decreased, with a total reduction of 2.257×10⁷ t from 2000 to 2020. Forest land contributed the most to carbon storage, while large-scale conversion of cropland, grassland, and forest land into construction land was the main reason for the reduction in carbon storage. 4) The ecological risk and

收稿日期: 2024-08-01

修回日期: 2024-09-22

录用日期: 2024-10-10

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-26

资助项目: 国家自然科学基金地区资助项目 (41961039)

第一作者: 胥蕊 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地利用变化及生态效应分析研究。E-mail: 1564766628@qq.com

通信作者: 朱大明 (1970—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事 3S 集成、融合及应用研究。E-mail: 634617255@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

carbon storage of Yunnan Province would decrease under all three scenarios in 2030. Under the ecological protection scenario, forest land area would increase by 895.83 km² compared to 2020, high and higher ecological risks would significantly decrease, and the reduction in carbon storage would be suppressed, indicating that this is the optimal scenario for the future development of Yunnan Province. 5) Ecological risk and carbon storage in the study area were negatively correlated, with spatial distribution mainly characterized by low-high and high-low aggregations. [Conclusion] The study provides various recommendations based on the spatial aggregation characteristics of ecological risk and carbon storage in Yunnan Province, offering a scientific basis for preventing ecological risks and enhancing carbon storage in the region.

Keywords: land use; ecological risk assessment; carbon storage; spatial autocorrelation; Yunnan Province

Received: 2024-08-01

Revised: 2024-09-22

Accepted: 2024-10-10

Online(www.cnki.net): 2024-12-26

近年来,全球气候变化和人类活动的加剧,使得生态系统面临前所未有的挑战。土地利用变化不仅改变区域生态系统的结构和功能,还对生态系统的稳定性和恢复力产生深远影响^[1]。生态系统通过吸收和固定大气中的二氧化碳来维持生态平衡,是缓解气候变暖和碳气候反馈的核心^[2]。土地利用生态风险评价则是评价生态系统在土地利用直接或间接作用下可能产生的不利影响,其结果可揭示人类活动对生态系统的影响^[3]。

碳储量是衡量生态系统服务功能的重要指标,与生态系统的健康状态密切相关。生态风险评价可判断生态系统的健康状态,从而为碳储量服务提供基础^[4]。因此,土地利用生态风险评价与碳储量的关联性研究对于维持生态系统健康状态尤为重要。InVEST 模型结合生态系统服务和环境因素,采用空间分析和定量评价的方法,被广泛应用于碳储量研究中,并在不同研究区域中证明其适用性^[5]。土地利用变化是决定区域碳储量和影响碳循环的重要因素,许多学者利用 InVEST 模型耦合土地利用模拟模型,探究不同情景下的碳储量变化。将 InVEST 模型与 CA-Markov、FLUS、CLUE-S 和 PLUS 等模型相结合^[6],进行不同情景下土地利用变化预测、碳储量空间格局分析、碳储量空间异质性影响因素评估等。PLUS 模型利用随机森林算法对地类转移概率进行挖掘,在预测位置、数量、细尺度元胞变化和景观格局相似性上展现出明显的优越性^[7]。在生态风险评估领域,构建指标体系法应用广泛,如构建潜在-连通性-恢复力三维框架体系^[8],从生态系统的内在特性出发,评估其对外部干扰的响应能力;压力-状态-响应评价体系(PSR)^[9],通过选取和计算代表压力、状态和响应的指标,对生态风险进行定量描述;压力-资本-脆弱性-响应评价体系^[10],则从社会经济活动的角度出发,探究人类活动对生态系统的影响及其潜在的脆弱性。为此提供更精细的风险量化方法,进一步得出

一系列评估模型与方法。如相对风险模型(RRM)^[11],通过量化不同因素对生态系统的相对影响,为风险评估提供一种比较基准;风险源汇法^[3],通过识别生态系统中的风险“源”和“汇”,为风险管理和缓解指明方向;景观格局指数法^[12],则从景观生态学的角度,通过量化景观结构和功能变化,评估土地利用变化等对生态系统的影响,直接反映土地利用变化的生态效应,对于评估土地利用变化引起的生态风险更加适用^[13]。已有研究^[5,12]分别对土地利用生态风险评价和碳储量进行深入探讨。然而,对于二者的关联性机理仍缺乏细致的研究。因此,难以全面把握土地利用变化对生态系统碳循环的深层次影响,以及对碳储量和生态风险变化的作用。

本研究拟以云南省为研究对象,评价 2000—2020 年云南省土地利用时空变化,并基于 PLUS 模型预测 2030 年多情景下的土地利用变化;基于景观格局指数法评价 2000—2030 年云南省生态风险时空变化。同时,基于 InVEST 模型分析碳储量的时空变化;通过分析生态风险与碳储量的关联性,结合二者的空间分布特征,提出土地利用与生态保护的建議。探究土地利用生态风险与碳储量间的关联性,不仅能提高对生态风险和碳储量的管理水平,还能为制定更有效的环境保护政策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省(97°31′~106°11′E, 21°08′~29°15′N)位于中国西南部,东部与贵州省、广西壮族自治区相邻,北部与四川省、西藏自治区相接,国土面积约 3.94×10^5 km²。下辖包括 8 个地级市和 8 个自治州。土地利用类型以林地为主,耕地、草地次之,森林覆盖率达 65.04%。隶属云贵高原,其地形复杂,地势险要,地貌多样(图 1)。气候涉及亚热带季风、热带季风、高原山地气候,立体气候特征显著。年温差较小,日温差较大,干湿季明显。

云南省作为我国西南地区重要的生态安全屏障,在维护国家生态安全、履行保护全球生物多样性及实现碳中和任务中具有十分重要的作用。

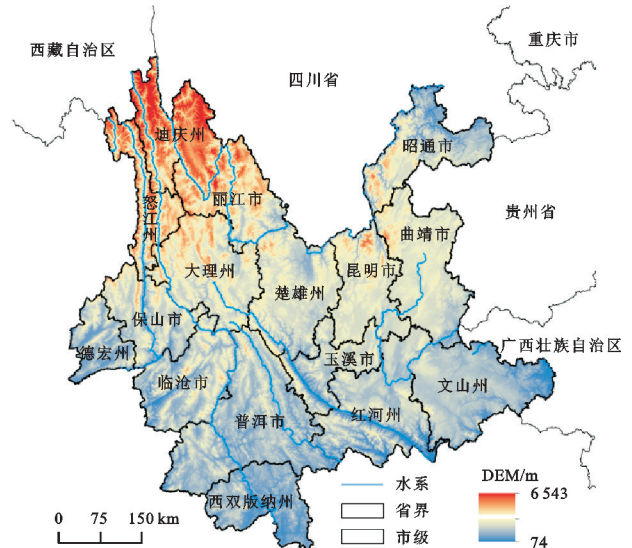


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源与处理

本文所使用数据均来自国内外公开数据库。土地利用数据涉及 2000 年、2010 年、2020 年 3 期,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心([https:// www. resdc. cn](https://www.resdc.cn)),空间分辨率为 30 m;土地利用变化驱动因子数据共 17 个。自然因素数据包括土壤类型、蒸散量、年平均气温、年降雨量,来源于国家青藏高原科学数据中心([http:// data. tpcd. ac. cn/](http://data.tpcd.ac.cn/)),空间分辨率为 1 000 m;高程、坡度、坡向来源于地理空间数据云([http:// www. gscloud. cn](http://www.gscloud.cn)),空间分辨率为 30 m;归一化植被指数(NDVI)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心([https:// www. resdc. cn](https://www.resdc.cn)),空间分辨率为 1 000 m。社会经济数据中夜间灯光指数来源于 HARVARD Data-verse([https:// dataverse. harvard. edu](https://dataverse.harvard.edu));人口来源于 Open Spatial Demographic Data and Research([https://](https://www.worldpop.org/)

www.worldpop.org/);GDP 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心([https:// www. resdc. cn](https://www.resdc.cn)),空间分辨率均为 1 000 m。可达性数据包括铁路、公路和水系数据,来源于 OpenStreetMap([https:// www. openstreetmap. org](https://www.openstreetmap.org)),用于计算距铁路距离、距高速路距离、距主干道距离、距次干道距离、距城市中心距离和距水域距离。限制区数据为划定自然保护区作为限制性转换区域,来源于中国自然保护区标本资源共享平台的地理信息库([http:// www. papc. cn/html/folder/946 895 ~ 1. htm](http://www.papc.cn/html/folder/946895~1.htm))。将所有栅格像元分辨率统一为 300 m×300 m,投影坐标设置为 WGS1 984_UTM_Zone_48 N。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 PLUS 模型的未来土地利用预测

PLUS 作为一种斑块生成的土地利用变化模拟模型,能够有效地识别和挖掘出地类变化的诱因,并能模拟出多种土地利用斑块级变化^[14]。考虑云南发展规划需求,本文设置自然发展、经济发展、生态保护 3 种未来情景(表 1)。依据云南省土地利用特点并参考已有研究^[5,7],通过多次试验对比结果精度,确定各地类转移矩阵和领域因子。

1)自然发展情景。是其他情景模拟的基础,该情景将 2010—2020 年的变化速率作为参考依据。耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地的邻域因子分别为 0.62、0.48、0.43、0.55、0.98、0.10。

2)经济发展情景。该情景将耕地、林地、草地分别向建设用地转移概率增加 20%,建设用地向其他地类转移概率下降 30%。耕地到未利用地邻域因子分别为 0.85、0.58、0.43、0.55、1.00、0.10。

3)生态保护情景。该情景下将水体和自然保护区作为限制发展区域,禁止转换。将耕地、草地向林地的转移概率提高 30%,耕地、林地和草地向建设用地的转移率分别降低 30%、50%、50%。耕地到未利用地邻域因子分别为 0.32、1.00、0.73、0.65、0.90、0.10。

表 1 多情景转移矩阵设置

Table 1 Multi scenario transfer matrix settings

土地利用 类型	自然发展情景						经济发展情景						生态保护情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a、b、c、d、e、f 分别为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地;1 表示地类可以发生转换,0 表示地类不可以发生转换。

1.3.2 景观格局指数 本文利用 Fragstats 4.2 软件 扰动指数和景观脆弱度指数构建各地类的景观损失度指数^[15],计算公式为:

$$R_i = E_i \times V_i \tag{1}$$

式中： R_i 为景观损失度指数； E_i 为景观干扰度指数； V_i 为景观脆弱度指数；根据以往研究^[16]，并结合本研究区土地利用类型特点，采用专家打分法，将景

观类型的脆弱性按土地利用类型分别进行分类赋值，共分为 6 级，未利用地、水体、耕地、草地、林地、建设用地分别赋值为 6、5、4、3、2、1，并采用极差法进行归一化处理。

表 2 景观格局指数计算公式

Table 2 Calculation formula of landscape pattern index

景观格局指数	计算公式	参数意义
景观破碎度指数(C_i)	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	n_i 为景观 i 的斑块数量； A_i 为景观类型 i 的面积(km^2)
景观分离度指数(N_i)	$N_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A_i}}$	A_i 为景观 i 的总面积； A 为景观总面积
景观分维数指数(F_i)	$F_i = 2\ln(p_i/4) \ln A_i$	p_i 为景观类型 i 的周长
景观干扰度指数(E_i)	$E_i = aC_i + bN_i + cF_i$	a 、 b 、 c 为景观指数权重，根据相关研究 ^[17] ，分别赋值为 0.5、0.3、0.2。

1.3.3 生态风险指数的构建 土地利用生态风险水平是由生态系统内部恢复力(以景观脆弱度指数衡量)和外部干扰强度(以景观干扰度指数衡量)共同作用的结果。本文基于上述建立的景观损失度指数构建生态风险评价模型。生态风险评价结果的相对值用生态风险指数(ERI)表示。景观生态学研究指出，为全面捕捉采样点周边景观格局特征，风险小区面积必须为平均斑块面积的 2~5 倍。考虑到计算工作量，采用等间距系统采样法，将研究区域划分为 11 291 个面积为 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 的评价单元。生态风险指数计算公式为：

$$\text{ERI}_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \tag{2}$$

式中： ERI_k 为第 k 个小区的区域生态风险指数； n 为景观类型的总个数； A_{ki} 为第 k 个小区中景观类型 i 的面积； A_k 为第 k 个小区的总面积； R_i 为景观损失度指数。

1.3.4 基于 InVEST 模型的碳储量估算 InVEST 模型的 Carbon 模块将生态系统碳储量细分为 4 个部分，以全面评估碳储量的变化，包括地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库及死亡有机碳库。

1)碳储量估算。计算公式为：

$$C_i = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \tag{3}$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n A_i C_i \tag{4}$$

式中： C_i 为第 i 类土地利用类型碳密度； C_{above} 为地上生物量碳储量， t/hm^2 ； C_{below} 为地下生物量碳储量， t/hm^2 ； C_{soil} 为土壤碳储量， t/hm^2 ； C_{dead} 为死亡有机碳储量， t/hm^2 ； C_{total} 为区域总碳储量， t/hm^2 ； n 为土地利用类型数量； A_i 为第 i 类土地利用类型面积， hm^2 。

2)各地类碳密度。碳密度数据通过整理总结相关学者^[18-19]研究成果，依据前人^[6]的方法对碳密度数据进行修正。ZHU 等^[20]指出，水体的碳密度可以忽略，因此，将水体的碳密度设定为 0(表 3)。

表 3 云南省各土地利用类型碳密度

Table 3 Carbon densities of various land use types in Yunnan Province

土地利用类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地	14.33	11.38	67.49	1.98
林地	26.54	14.20	92.85	2.47
草地	12.59	13.76	79.56	2.13
水体	0	0	0	0
建设用地	7.42	0	26.47	0
未利用地	10.36	2.13	26.51	0

1.3.5 双变量空间自相关分析 双变量空间自相关反映 2 个变量在给定时期内是否具有异质性和集聚性，包括全局空间自相关和局部空间自相关 2 个部分^[21]。本文用 Morans' I 系数表示生态风险值与碳储量值的空间相关性和空间差异程度。

计算公式为：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \left(\frac{y_{i,s} - \overline{y_s}}{a_s} \right) \left(\frac{y_{i,r} - \overline{y_r}}{a_r} \right)}{(n-1) \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right)} \tag{5}$$

式中： I 为双变量全局空间自相关系数； n 为样本数，本文样本数为 11 291； W_{ij} 为空间权重矩阵； $y_{i,s}$ 和 $y_{i,r}$ 为生态风险评价 i 单元的生态风险值和碳储量值； a_s 和 a_r 为生态风险值和碳储量值的方差； $\overline{y_s}$ 和 $\overline{y_r}$ 为二者的平均值。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空演变特征分析

2020 年云南省土地利用类型以林地为主，占整个研究区的 57.34%，主要分布于普洱市、西双版纳州和迪庆州(图 2)。其次是草地和耕地，分别占整个研究区的 22.41%和 17.61%，草地多分布于曲靖市、红河州和大理州，耕地则多分布于普洱市、曲靖市和文山州。2000—2020 年云南省耕地、草地、未利用地面积持续减少，林地面积呈先增后减趋势，到 2020 年增

加 978.66 km², 水体和建设用地面积显著增加, 分别增加 989.55、2 727.54 km²。

2000—2020 年研究区地类转换中草地转出面积最多, 共转出 14 099.22 km²。其中, 62.16% 转化为林地, 29.81% 转化为耕地。林地转入面积最多, 共转入 13 522.77 km²。其中, 64.81% 来源于草地, 33.74% 来源

于耕地。建设用地共转入 3 063.33 km²。其中, 62.61% 来源于耕地, 20.75% 来源于草地, 15.15% 来源于林地 (图 3)。云南省在发展经济的同时, 也注重林地和水体的保护, 与云南省近年来积极推进退耕还林还湖、生态修复、营造水源涵养林等政策相吻合。同时, 反映城镇化对耕地、草地和未利用地的侵占。

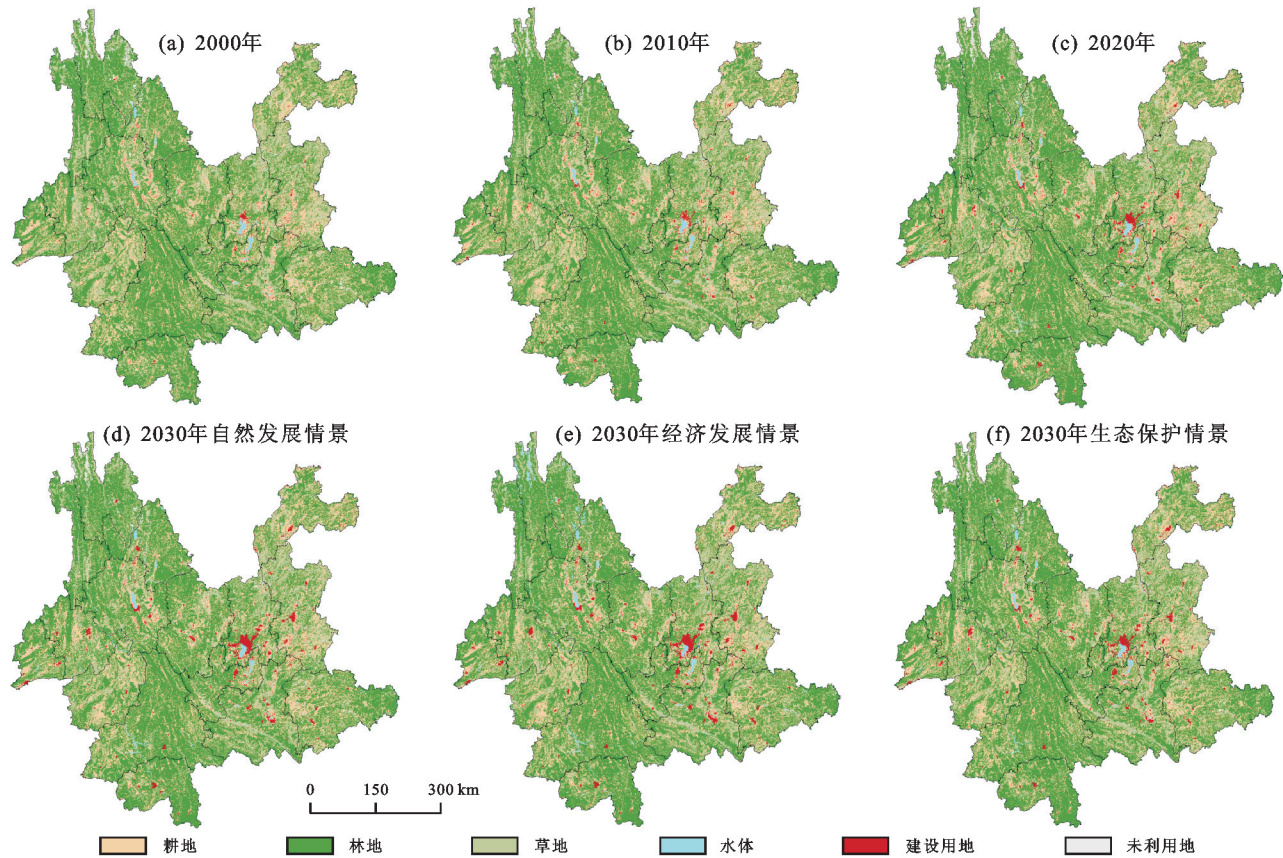


图 2 2000—2030 年不同情景下云南省土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Yunnan Province under different scenarios from 2000 to 2030

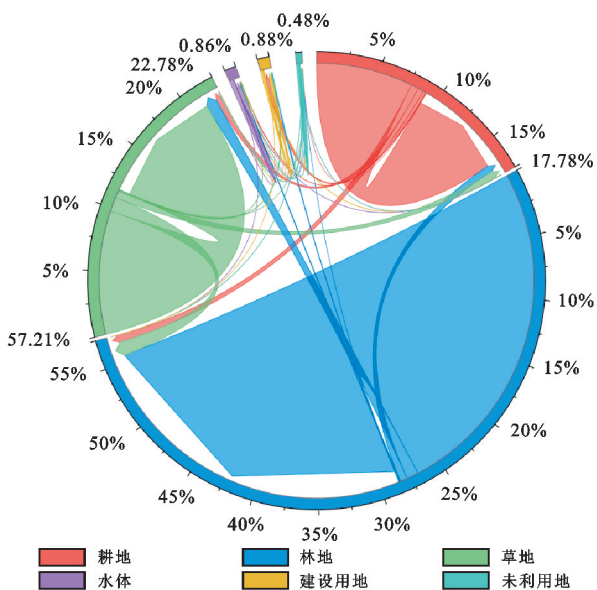


图 3 2000—2020 年云南省土地利用转移矩阵

Fig.3 Land use transfer matrix of Yunnan Province from 2000 to 2020

2.2 2030 年土地利用模拟分析

利用云南省 2010 年土地利用数据作为训练集, 预测 2020 年土地利用格局。通过 Kappa 系数和整体精度对预测结果的精度进行检验。本文 Kappa 系数为 0.90, 整体精度达到 0.94, 具有较高的精度, 可用于模拟研究区 2030 年土地利用变化情况。研究结果显示, 云南省 3 种情景下的土地利用空间分布格局具有相似性, 但不同情景下各类用地的具体变化存在显著差异 (表 4)。

自然发展情景下, 各地类的整体变化趋势与 2010—2020 年基本一致。耕地、林地、草地及未利用地的面积均有所缩减, 水体和建设用地则呈增长趋势。经济发展情景下, 由于提升其他地类向建设用地转移概率, 使得该情景下建设用地面积较 2020 年增加 2 017.80 km², 占比上升 0.52%, 在 3 种情景下扩张最为明显。林地较 2020 年减少 899.91 km², 占比下降 0.23%, 在 3 种情景下减少最多。生态保护情景

下,建设用地的扩张得到明显的限制,在 3 种情景下增幅最小。此外,只有在生态保护情景下,林地面积是增加的,较 2020 年增加 895.83 km²。草地较 2020 年减少 479.07 km²,在 3 种情景下减幅最小。综上,实施生态保护情景策略,能够在一定程度上促进区域生态环境质量的积极改善。

在空间分布上,3 种情景下昆明市、曲靖市和红河州地区耕地面积减少。同时,建设用地显著扩张。草地面积主要在迪庆州、文山州和大理州地区减少,水体面积主要在普洱市、大理州和丽江市地区增加。生态保护情景下林地面积主要在文山州、大理州和普洱市有所增加。

表 4 2030 年云南省 3 种情景下不同土地利用类型面积

Table 4 Areas of different land use types under three scenarios in Yunnan Province in 2030

不同情景	年份	土地利用面积/km ²						面积占比/%					
		耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
自然发展情景	2030	66 902.04	219 628.98	85 474.98	4 624.56	6 232.59	1 550.43	17.4	57.14	22.24	1.20	1.62	0.40
	2020—2030	-805.32	-798.93	-679.23	823.95	1 468.80	-9.27	-0.21	-0.20	-0.17	0.21	0.38	-0.01
经济发展情景	2030	66 568.23	219 528.00	85 370.13	4 615.74	6 781.59	1 549.89	17.32	57.11	22.21	1.20	1.76	0.40
	2020—2030	-1 139.13	-899.91	-784.08	815.13	2 017.80	-9.81	-0.29	-0.23	-0.20	0.21	0.52	-0.01
生态保护情景	2030	66 439.98	221 323.77	85 675.14	3 932.37	5 492.34	1 549.98	17.28	57.58	22.29	1.02	1.43	0.40
	2020—2030	-1 267.38	895.86	-479.07	131.76	728.55	-9.72	-0.33	0.24	-0.12	0.03	0.19	-0.01

2.3 生态风险时空演化分析

根据自然断点法,将 2000 年的 ERI 分为低风险区($ERI \leq 0.024\ 7$)、较低风险区($0.024\ 7 < ERI \leq 0.027\ 7$)、中风险区($0.027\ 7 < ERI \leq 0.030\ 7$)、较高风险区($0.030\ 7 < ERI \leq 0.034\ 0$)、高风险区($ERI > 0.034\ 0$)5 类^[15]。其他年份采用 2000 年的分级区间,以便于数据的比较分析。2000—2020 年,平均 ERI 分别为 0.028 5、0.028 3、0.028 3。2030 年自然发展、经济发展和生态保护情景下平均 ERI 分别为 0.028 3、0.028 2、0.028 2。总体来看,研究时期内区域 ERI 呈下降趋势。云南省以较低和中风险区为主,二者总面积占比超过 50%(图 4)。2000—2020 年,低、较低风险区和中风险区域面积持续增加,较高、高风险区域面积持续减少。2030 年 3 种情景下,生态风险均降低。其中,生态保护情景下较高、高风险区域面积减少最为明显。

从空间分布(图 5)来看,低风险区、较低风险区主要分布在普洱市、西双版纳州大部、迪庆州中部等地。其中,低风险区分布于自然保护地或与其毗邻区域,主要以林地为主,植被覆盖度高且人为干扰较少,多年来该区域已经构筑起相对稳固的景观体系,展现出较低的景观破碎程度和敏感度。较低风险区集中分布在低生态风险区周围。中风险区主要分布在文山州中部、红河州西部、昆明市北部、保山市等地。该地区林地、草地和耕地分布广泛,但由于零散分布着建设用地,受人类活动干扰,景观破碎度和分离度明显升高,使得生态风险有所上升。较高和高风险区主要分布于曲靖市、临沧市、昭通市等地。区域内土地利用类型相对复杂,人口和经济活动多聚集在此,斑块连通性降低,景观破碎度、分离度较高,生态风险程度高。

2000—2030 年生态风险主要在相邻等级间转移(图 6)。2000—2020 年高等级风险区向低等级风险区转移 39 675.06 km²,低等级风险区向高等级风险区转移 27 571.23 km²。2020—2030 年自然发展、经济发展和生态保护情景下,低等级风险区向高等级风险区分别转移 7 739.46、7 470.45、355.77 km²。生态保护情景下,低等级向高等级风险区转移的面积明显少于其他情景,主要归因于该情景对建设用地无序扩张的有效遏制,从而减缓城镇边缘地带景观破碎化与分离度加剧趋势。此外,通过限制水体转换为其他地类,保障水体的稳定性。以上举措强化整体景观结构的稳固性,显著降低高生态风险区域的面积。

2.4 碳储量时空变化分析

从时间变化来看,2000—2020 年云南省总碳储量先增后减(表 5),总碳储量减少 2.257×10^7 t。2030 年 3 种情景下碳储量均减少,其中,经济发展情景下,总碳储量较 2020 年减少 2.475×10^7 t,而生态保护情景下仅减少 0.262×10^7 t,表明该情景下以生态环境为第一目标能够有效抑制碳储量减少。

从空间分布(图 7)来看,2000—2020 年云南省碳储量总体较高,空间分布无较大差异。在西北高海拔山区表现出较高的碳储量,其次是中部和南部地区,城市地区和水体的碳储量较低。为更清楚地反映研究区碳储量变化,借助 ArcGIS 10.7 对 2000—2020 年、2020—2030 年 2 个时间段的碳储量空间分布图进行差值计算。云南省大部分地区碳储量基本稳定,在整个研究区碳储量均有零星的增减。其中,在西双版纳州南部、玉溪市中部、临沧市东南部和迪庆州东北部碳储量显著上升,而昆明市西南部、保山市中部和曲靖市中部碳储量呈明显下降趋势。

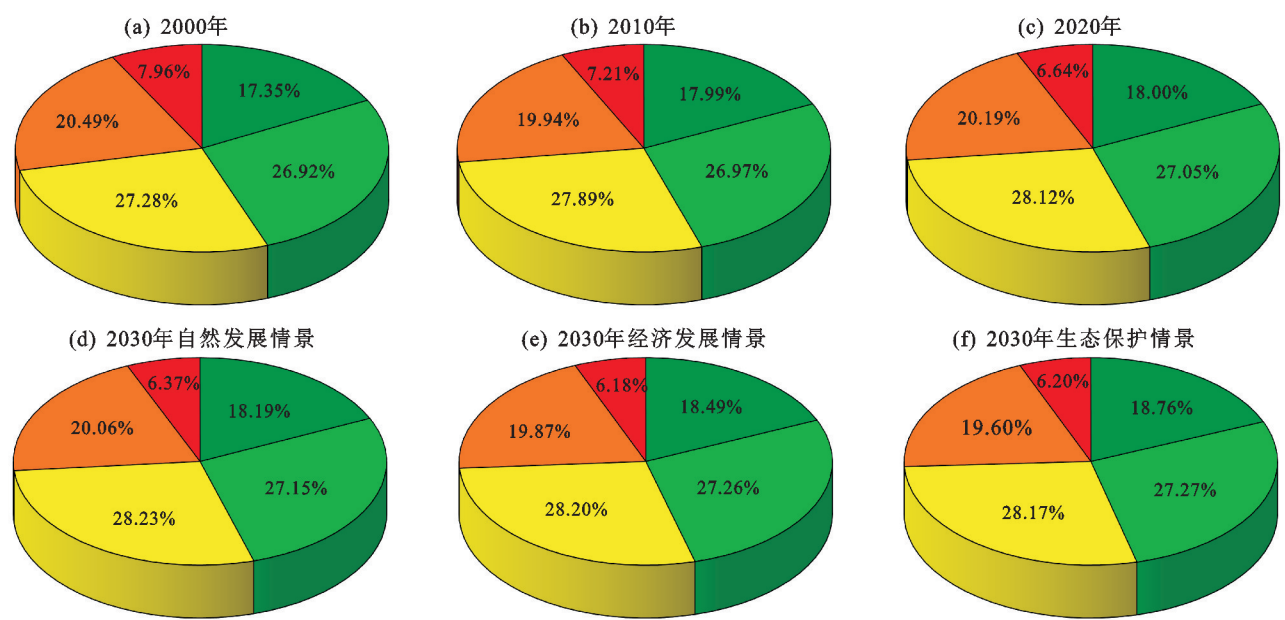


图 4 2000—2030 年不同情景下云南省生态风险等级占比

Fig.4 Proportion of ecological risk grades in Yunnan Province under different scenarios from 2000 to 2030

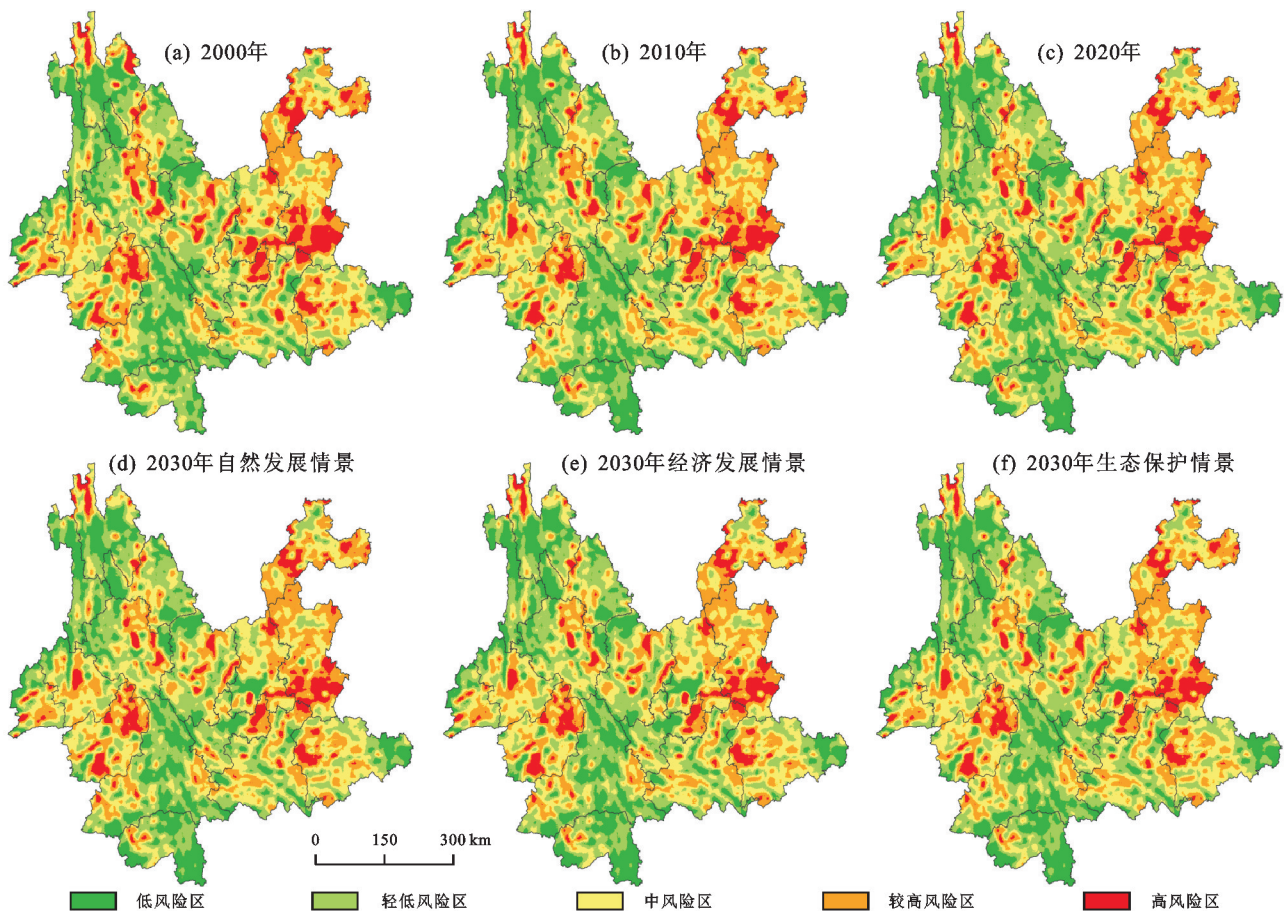


Fig.5 Spatial distribution of ecological risk in Yunnan Province under different scenarios from 2000 to 2030

从各类土地利用的碳储量贡献来看,林地表现尤为突出,其平均贡献率达到 65.01%,是碳储量的主要来源。其次是草地和耕地,平均贡献率分别为 20.46%和 14.14%。林地的碳储量呈先增后减趋势,2000—2020 年共减少 1.331×10^7 t,占碳储量总减少值的 58.97%。草地碳储量持续减少,到 2020 年减少 3.035×10^7 t。建设用地碳储量微增,却显著侵占高碳储量的林地、草地及耕地,导致其面积大幅减少,是总碳储量下降的主因。2030 年 3 种情景下耕地、草地、未利用地的碳储量较 2020 年均减少。其中,在生态保护情景下,生态保护修复力

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

度加大,减少林地和草地的流失,从而保护植被碳库。因此,该情景下碳储量高于其他情景。可见,碳储量与土地利用变化息息相关,尤其是林地、草地等生态用地对碳储量变化的作用更加明显。

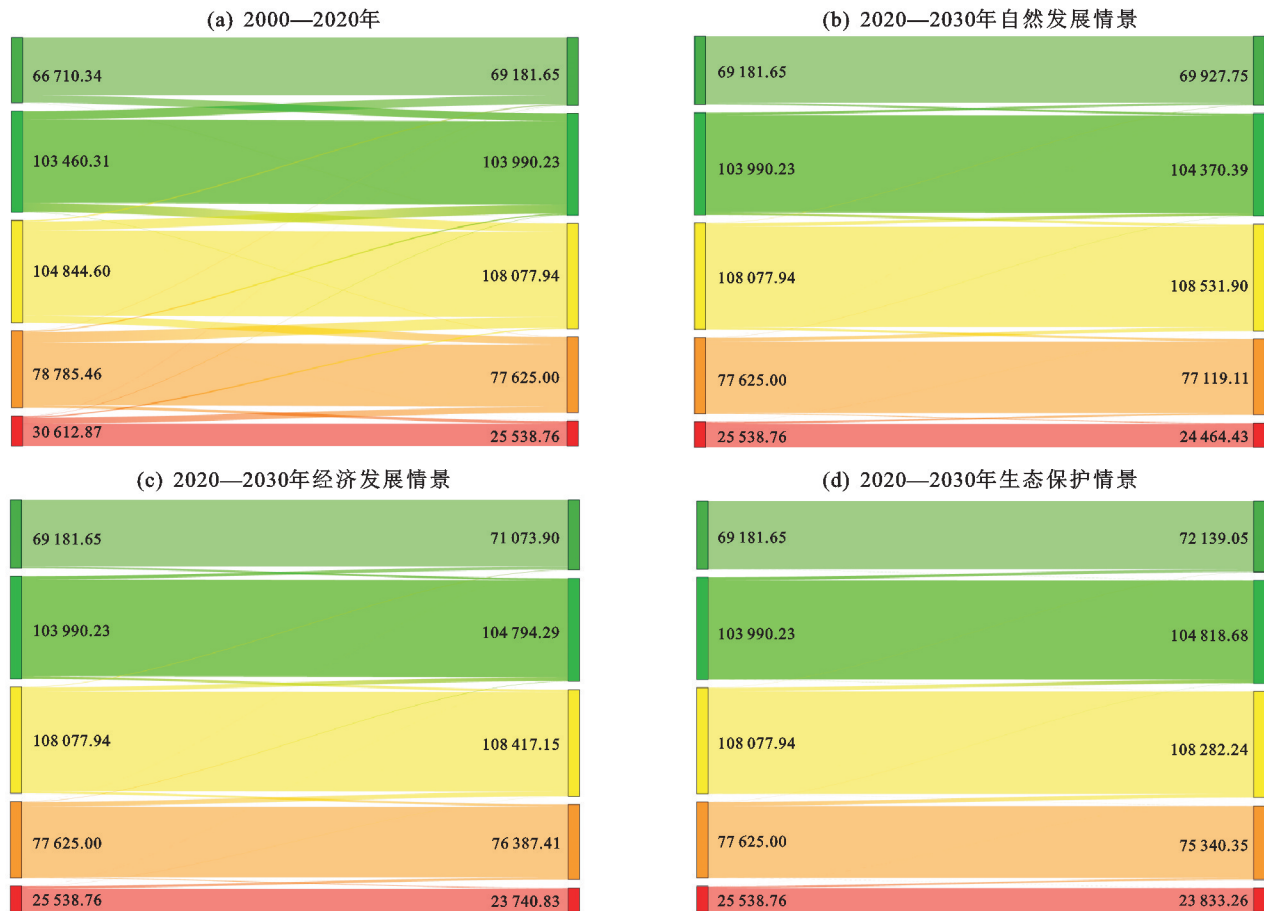


图 6 2000—2030 年不同情景下生态风险转移矩阵

Fig.6 Ecological risk transfer matrix under different scenarios from 2000 to 2030

表 5 云南省 2000—2030 年不同情景下土地利用类型的碳储量

Table 5 Carbon storages of various land use types in Yunnan Province under different scenarios from 2000 to 2030 10^7 t

土地利用类型	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年自然 发展情景	2030 年经济 发展情景	2030 年生态 保护情景
耕地	65.700	65.437	64.444	63.677	63.360	63.238
林地	298.583	301.006	299.914	298.827	298.690	301.133
草地	96.116	93.883	93.081	92.347	92.234	92.563
水体	0	0	0	0	0	0
建设用地	0.690	1.050	1.614	2.112	2.298	1.861
未利用地	0.829	0.613	0.608	0.605	0.604	0.604
总储量	461.918	461.989	459.661	457.568	457.186	459.399

2.5 生态风险与碳储量的关联性分析

基于 Spearman 相关性分析,检验云南省土地利用生态风险和碳储量间的相关关系。2000 年、2010 年、2020 年、2030 年自然发展、经济发展、生态保护情景下的相关系数分别为 -0.951、-0.939、-0.913、-0.882、-0.872、-0.897,且均在 0.01 级别显著。说明研究区生态风险和碳储量呈显著负相关(图 8),

随着生态风险的增加,碳储量有降低趋势。

利用 GeoDa 软件进一步阐明二者的空间关系。2000 年、2010 年、2020 年、2030 年自然发展、经济发展、生态保护情景下全局 Moran' I 分别为 -0.394、-0.391、-0.356、-0.311、-0.297、-0.337,表明二者存在显著的空间负相关性。Moran' I 逐年降低,表明二者空间集聚现象有所减弱,空间负相关程度降低。

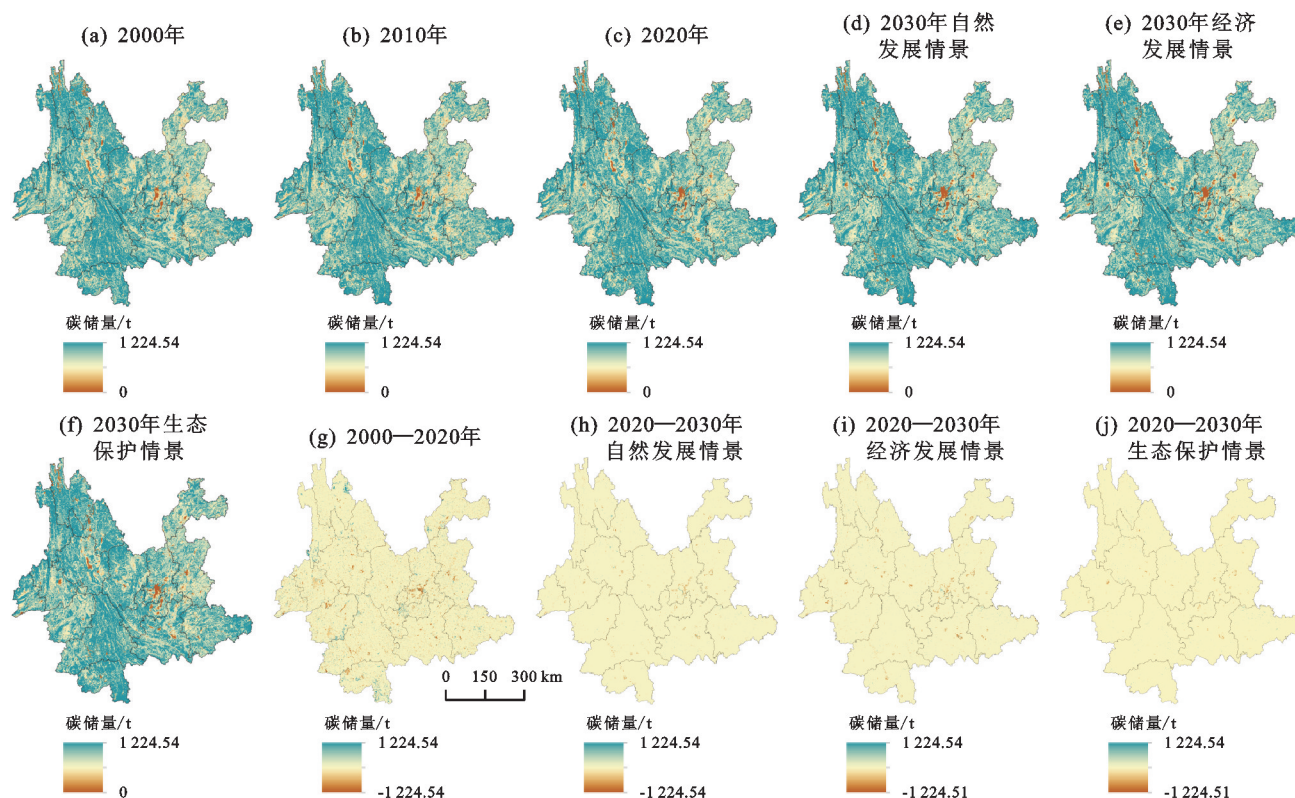


图 7 2000—2030 年不同情景下云南省碳储量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of carbon storage in Yunnan Province under different scenarios from 2000 to 2030

局部自相关分析显示,高-高聚集(高风险-高碳储量)、低-低聚集(低风险-低碳储量)、高-低聚集(高风险-低碳储量)、低-高聚集(低风险-高碳储量)和不显著 5 种空间分布特征(图 9)。云南省聚集区在空间分布和数量分布上均有差异。各时期在数量上主要以低-高和高-低聚集为主,占显著变化区域总面积 88% 以上。高-高聚集主要呈零散状分布于普洱市、西双版纳州、楚雄州、丽江市和大理州,该地区耕地、林地、草地覆盖率高,生态系统具有较高的碳汇能力,但斑块连通性较低,景观破碎度较高,生态风险相对较高。低-低聚集数量最少,主要分布在建设用地和耕地周围,该地区长期受到人类活动的影响,形成稳固的生态结构,并提供少量的碳储量服务价值。低-高聚集呈片状主要分布在西双版纳州、普洱市、丽江市东部、迪庆州中部、怒江州东部、大理州西部和文山州东部。该区域主要以林地和草地为主,相较于其他地类,其碳储量值更高,并且由于人口密度低及相关生态保护政策的实施,不易受到人为干扰。高-低聚集主要分布在曲靖市南部、昆明市南部、玉溪市东北部、大理州东北部和昭通市西部。该地区以耕地、水体和建设用地为主,其碳储存能力相对较弱。同时,由于人类活动的强烈干扰,导致生态风险较高。2000—2030 年高-高聚集和低-低聚集逐年增多,尤其在经济发展情景下增长最为明显。2030 年 3 种情景

下,高-低聚集显著下降,下降的区域主要集中在昆明市和曲靖市。相较于其他情景,在生态保护情景下,云南省低-高聚集区在迪庆州、丽江市和文山州地区显著增加。

3 讨论

3.1 与以往的研究比较

云南省生态风险以较低风险和中风险为主,与施馨雨等^[22]的研究存在一定程度的吻合。2000—2030 年,整体生态风险呈下降趋势,其中,昭通市、曲靖市、文山州和红河州地区改善明显。该 2 市 2 州属于云南省石漠化严重地区,2000—2020 年一方面低脆弱度建设用地增加和高脆弱度耕地面积减少,降低整体的生态风险水平;另一方面,一系列的生态治理规划和治理工程的实施,如生态保护红线划定、岩溶地区石漠化综合治理、“山水林田湖草沙”系统治理的正面效应抵消建设用地扩张引起的负面影响,在降低生态风险中取得显著成效。2000—2020 年云南省碳储量先增后减,与 WANG 等^[23]研究结果一致。2010—2020 年碳储量减少,一方面建设用地迅速扩张侵占林地、草地和耕地,如相继出台的《滇中城市群规划(2009—2030 年)》《滇中城市群规划(2016—2049 年)》促使地区需要大量的建设用地来支持基础设施建设、产业发展和人口聚集;另一方面,2010 年云南省大范围遭受极为严重的旱灾,导致林地和草地面积减少。

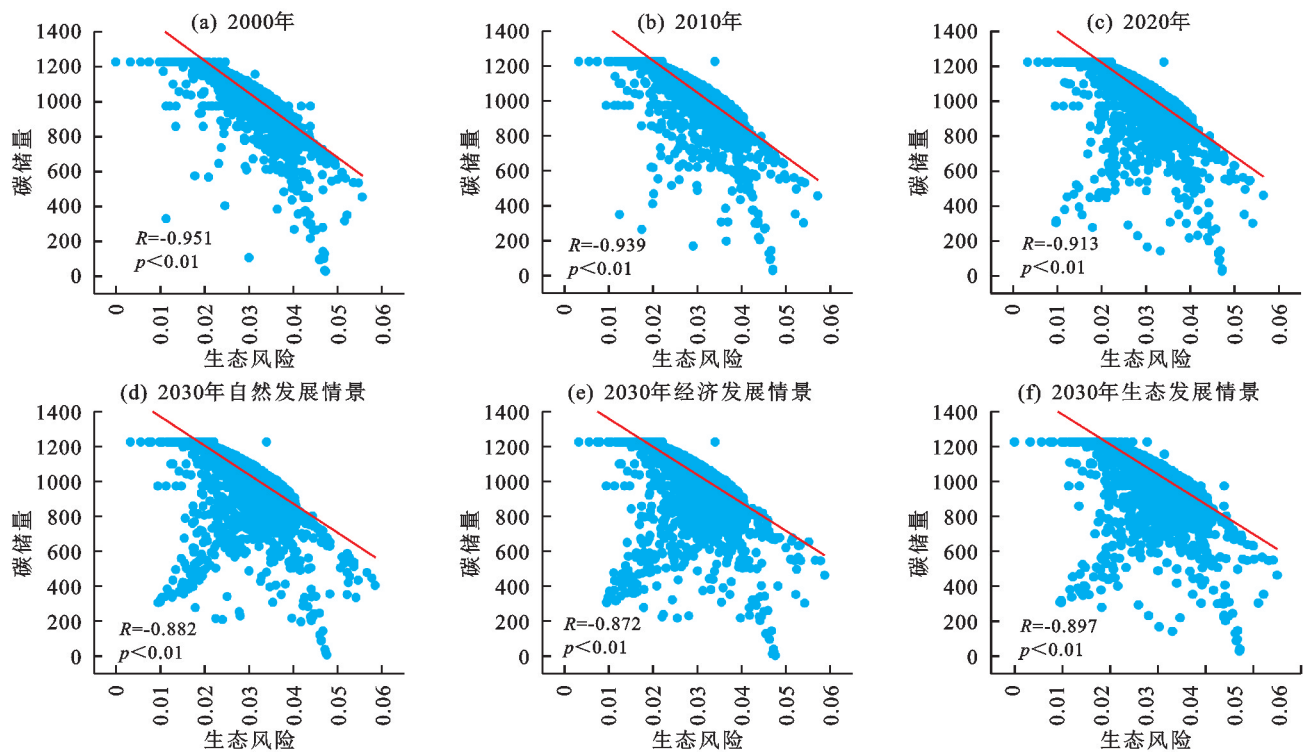


图 8 2000—2030 年不同情景下生态风险水平与碳储量关系

Fig.8 Relationship between ecological risk level and carbon storage under different scenarios from 2000 to 2030

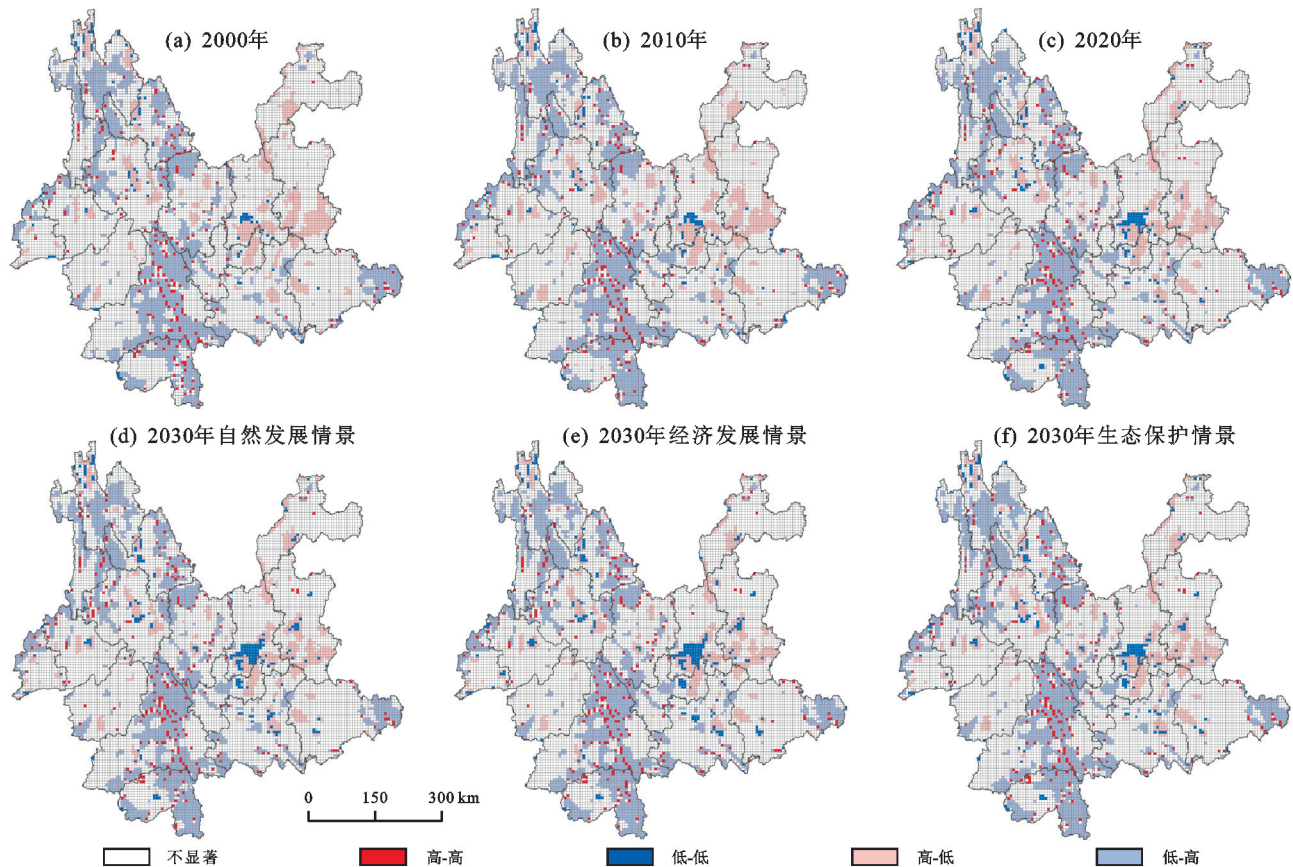


图 9 2000—2030 年不同情景下云南省生态风险与碳储量局部空间自相关

Fig.9 Local spatial autocorrelation between ecological risk and carbon storage in Yunnan Province under different scenarios from 2000 to 2030

高碳密度的林地、草地和耕地面积减少是该时期 碳储量下降的主要原因。云南省生态风险与碳储量

在时空上呈显著负相关,优化区域碳储存服务可促使生态风险降低,与WANG等^[24]的研究结果一致。未来情景模拟显示,生态保护情景下生态风险降幅最大。同时,该情景较其他情景能减少碳储量的损失。因此,生态保护情景下的土地利用布局更利于云南省实现减碳与生态保护双赢。

3.2 对环境管理政策的建议

空间自相关分析揭示区域生态风险与碳储量间的关联,使政府在制定保护规划政策时更具针对性。高-高聚集区以耕地、林地和草地为主,破碎化程度较高。应作为重点保护区,促进退耕还林、因地制宜增加林地覆盖率,从而减少破碎化,提高内部生态结构的完整性,降低生态风险。低-低聚集区以建设用地和耕地为主,应严格控制城市发展对耕地和生态用地的侵占,推动高碳排放传统产业向低污染、技术密集型新兴产业转型,提高区域固碳能力。低-高聚集区生态用地广布,生态风险和碳储量相对稳定。应采取监管为主,修复为辅的策略,维持区域内碳储存服务的稳定供给。高-低聚集区以耕地、水体和建设用地为主,区域内人类活动强度高。应对湖泊周边建设用地进行严格管控,划分湖滨生态保护红线和缓冲区域,推进建立生态补偿机制。同时,严守耕地红线,发展绿色农业,优化土地利用结构,进一步优化“三生空间”布局。

3.3 研究的局限性与展望

本文前瞻性预测研究区生态风险与碳储量及二者的关联特征,但仍存在不足。首先,各土地利用类型的碳密度不同,本文只考虑6种主要类型。同时,土地利用分类方法和精度在很大程度上决定生态风险时空特征的分析结果。因此,未来需要进一步细分土地利用类型,以便更准确地进行评估。其次,缺乏对各地类扩张驱动因子的分析。同时,预测时忽略政策限制,如生态保护红线、永久基本农田保护界线等对土地变化的影响,未来将深入研究驱动因素对各地类扩张的贡献度,把政策因素纳入模型预测中进行综合反映。最后,基于二元空间自相关分析,本文侧重于生态风险和碳储量研究结果的关联关系,仅得到4个聚类结果,未进一步细化聚类区域,尚未深入探讨各驱动因子对生态风险和碳储量时空分异的影响程度。因此,细化聚类区域,厘清二者的内在影响因素是今后的重点研究方向。

4 结论

1)云南省土地利用类型,林地面积最多,超过总面积的57%,其次是草地和耕地。2000—2020年,林地先增后减,耕地、草地和未利用地面积递减,水体和建设用地持续增加;林地和草地的转换面积最多,建设用地持续侵占生态用地,城镇化程度显著提高。

2)2000—2020年云南省生态风险降低,较低和中风险面积超过50%,较高和高风险面积显著减少。风险转移主要发生在相邻等级之间。空间分布上较为稳定,高风险区域主要集中在如曲靖市、临沧市等土地利用类型复杂,斑块连通性低、破碎度高的地区。

3)2000—2020年云南省碳储量先增后减,共减少 2.257×10^7 t。林地为主要碳库,贡献率超过65%。空间分布上,高碳储量地区主要分布在西北部山区,中部与南部次之,城市与水体的碳储量较低。林地、草地和耕地大面积转变为建设用地是造成碳储量减少的主因。

4)云南省2030年3种情景下生态风险和碳储量均降低。生态保护情景下,生态用地得到保护,较高和高生态风险面积显著减少,低等级风险区向高等级风险区转移面积最少。同时,碳储量的减少得到抑制,说明该情景更利于云南省实现减碳与生态保护双赢。

5)云南省生态风险与碳储量呈负相关,2000—2030年二者相关性逐步降低。显著变化区域以低-高和高-低聚集为主,占比超88%。具体而言,低-高聚集区以片状形态广泛分布于西双版纳州、普洱市等地,而高-低聚集区则主要集中在曲靖市南部、昆明市南部等区域。

参考文献:

- [1] YUAN S F, MEI Z H, ZHU C M, et al. Investigating the spatio-temporal interactive relationship between land use structure and ecosystem services in urbanizing China [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: e111315.
- [2] GEORGIU K, JACKSON R B, VINDUŠKOVÁ O, et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: e3797.
- [3] 王洁, 摆万奇, 田国行. 土地利用生态风险评价研究进展 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 576-585.
WANG J, BAI W Q, TIAN G H. A review on ecological risk assessment of land use [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 576-585.
- [4] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价: 以长株潭城市群为例 [J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5478-5489.
OUYANG X, ZHU X, HE Q Y. Incorporating ecosystem services with ecosystem health for ecological risk assessment: Case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5478-5489.
- [5] 黄韬, 刘素红. 基于PLUS-InVEST模型的福建省土地利用变化与碳储量评估 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 246-257.
HUANG T, LIU S H. Evaluation of land use change and carbon storage in Fujian Province based on PLUS-InVEST model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 246-257.

- [6] 智菲,周振宏,赵铭,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征[J].水土保持学报,2024,38(2):205-215.
ZHI F, ZHOU Z H, ZHAO M, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of carbon storage in Hefei ecosystem based on PLUS and InVEST models[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 205-215.
- [7] 胡信熹,勒先文,王卫林,等.基于 PLUS-InVEST 模型的江西省生态系统碳储量时空演变与预测[J].环境科学, 2024, 45(6): 3284-3296.
HU J X, LE X W, WANG W L, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of ecosystem carbon storage in Jiangxi Province based on PLUS-InVEST model[J]. Environmental Science, 2024, 45(6): 3284-3296.
- [8] LI X P, LI S S, ZHANG Y F, et al. Landscape ecological risk assessment under multiple indicators[J]. Land, 2021, 10(7): e739.
- [9] 吴霓,孙庆杨,黄华梅,等.基于 PSR 模型的广西北部湾海域生态风险评价及防范对策研究[J].海洋湖沼通报, 2023, 45(6): 124-132.
WU N, SUN Q Y, HUANG H M, et al. Assessment of marine ecological risk of Beibu Gulf Sea area based on pressure state response model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(6): 124-132.
- [10] WANG H. Regional assessment of ecological risk caused by human activities on wetlands in the Muleng-Xingkai Plain of China using a pressure-capital-vulnerability-response model[J]. Wetlands Ecology and Management, 2022, 30(1): 111-126.
- [11] 刘晓,苏维词,王铮,等.基于 RRM 模型的三峡库区重庆开县消落区土地利用生态风险评价[J].环境科学学报, 2012, 32(1): 248-256.
LIU X, SU W C, WANG Z, et al. Regional ecological risk assessment of land use in the flooding zone of the Three Gorges Reservoir area based on relative risk model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1): 248-256.
- [12] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报, 2021, 37(4): 265-274.
LIU X Z, LI X S, JIANG D M. Landscape pattern identification and ecological risk assessment using land-use change in the Yellow River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 265-274.
- [13] KANG L X, YANG X, GAO X, et al. Landscape ecological risk evaluation and prediction under a wetland conservation scenario in the Sanjiang Plain based on land use/cover change[J]. Ecological Indicators, 2024, 162: e112053.
- [14] LIN X F, FU H. Spatial-temporal evolution and driving forces of cultivated land based on the PLUS model: A case study of Haikou City, 1980—2020[J]. Sustainability, 2022, 14(21): e14284.
- [15] 于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学, 2022, 41(2): 99-107.
YU H, LIU X L, ZHAO T M, et al. Landscape ecological risk assessment of Qilian Mountain National Park based on landscape pattern[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 99-107.
- [16] JIN X, JIN Y X, MAO X F. Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes: Case study of Delingha City[J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 185-191.
- [17] 孙丽蓉,周冬梅,岑国璋,等.基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J].干旱区地理, 2021, 44(5): 1384-1395.
SUN L R, ZHOU D M, CEN G Z, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors of the Shule River Basin based on the geographic detector model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1384-1395.
- [18] 帕茹克·吾斯曼江,艾东,方一舒,等.基于 InVEST 与 CA-Markov 模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J].环境科学, 2024, 45(1): 287-299.
PARUKE W S M J, AI D, FANG Y S, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming city based on InVEST and CA-Markov model[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 287-299.
- [19] 彭双云,陈明潇,张老伟,等.滇中城市群碳储量时空演变及其对 LULC 变化的响应[J].水土保持学报, 2024, 38(4): 246-256.
PENG S Y, CHEN M X, ZHANG L W, et al. Spatio-temporal evolution of carbon storage in the central Yunnan urban agglomeration and its response to LULC change[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 246-256.
- [20] ZHU G F, QIU D D, ZHANG Z X, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127: e107770.
- [21] LI Q W, JIN T T, PENG Q D, et al. Identifying the extent of the spatial expression of landscape fragmentation based on scale effect analysis in Southwest China[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: e109120.
- [22] 施馨雨,赵筱青,普军伟,等.基于斑块尺度的云南省景观生态安全时空演变及归因[J].生态学报, 2021, 41(20): 8087-8098.
SHI X Y, ZHAO X Q, PU J W, et al. Spatio-temporal evolution and attribution of landscape ecological security at patch scale in Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8087-8098.
- [23] WANG L, ZHAO J S, LIN Y L, et al. Exploring ecological carbon sequestration advantage and economic responses in an ecological security pattern: A nature-based solutions perspective[J]. Ecological Modelling, 2024, 488: e110597.
- [24] WANG L, ZHAO J S, AI D, et al. Integrating risk zoning and multifactor analysis: A strategic approach to ecological carbon sink management[J]. Ecological Informatics, 2024, 82: e102671.