

三江源地区多情景土地利用变化对碳储量与生境质量的影响

郑世妍¹, 刘小明², 雷浩川¹, 马靖²

(1. 青海大学地质工程学院, 青海西宁810000; 2. 青海理工学院工学院, 青海西宁810000)

摘要: [目的] 探究三江源地区土地利用变化背景下碳储量与生境质量的演变趋势, 并结合二者的综合重要性等级开展生态评价, 为该区优化土地利用结构、提升生态系统功能提供科学依据。[方法] 采用PLUS模型对2030年多情景土地利用格局进行预测, 并结合InVEST模型评估2000—2020年及2030年碳储量与生境质量的时空变化。[结果] ①2000、2010和2020年碳储量分别为 2.41×10^9 t, 2.47×10^9 t和 2.47×10^9 t, 生境质量平均指数分别为0.625 1, 0.660 6, 0.662 2。②各土地利用类型对碳储量的影响依次为: 林地>耕地>草地>未利用地>建设用地>水域; 对生境质量的影响依次为: 水域>林地>草地>耕地>未利用地≈建设用地。综合重要性等级方面, 林地属极高等级, 草地属较高等级, 水域与耕地属中等等级, 未利用地与建设用地属较低等级。③2030年多情景预测结果表明, 在提升碳储量和生境质量方面, 野生动物保护情景优于草地保护情景, 草地保护情景优于自然发展情景。[结论] 建议优先实施野生动物保护策略, 严格控制过度放牧等人为干扰, 遏制草地退化趋势, 加强林地和水域的生态修复, 并统筹生态保护与经济发展, 促进区域生态系统的稳定与提升。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; 生境质量; PLUS模型; InVEST模型; 三江源地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0330-14

中图分类号: X171.3, F301.2

文献参数: 郑世妍, 刘小明, 雷浩川, 等. 三江源地区多情景土地利用变化对碳储量与生境质量的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 330-343. Zheng Shiyan, Liu Xiaoming, Lei Haochuan, et al. Impacts of multi-scenario land use changes on carbon storage and habitat quality in Sanjiangyuan region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 330-343.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.036

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.036

Impacts of multi-scenario land use changes on carbon storage and habitat quality in Sanjiangyuan region

Zheng Shiyan¹, Liu Xiaoming², Lei Haochuan¹, Ma Jing²

(1. School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810000,

China; 2. School of Engineer, Qinghai Institute of Technology, Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: [Objective] The evolutionary trends of carbon storage and habitat quality under the background of land use change in the Sanjiangyuan region were investigated, and an ecological assessment was conducted based on their comprehensive importance levels, in order to provide a scientific basis for optimizing land use structure and enhancing ecosystem functions in this region. [Methods] The PLUS model was used to predict the land use patterns under multiple scenarios in 2030, and the InVEST model was used to evaluate the spatiotemporal variations of carbon storage and habitat quality from 2000 to 2020 and in 2030. [Results] ① Carbon storage in 2000, 2010, and 2020 was 2.41×10^9 t, 2.47×10^9 t, and 2.47×10^9 t, respectively. The mean habitat quality indices were 0.625 1, 0.660 6, and 0.662 2, respectively. ② The influence of different land use types on carbon storage followed the order: forest land > cultivated land > grassland > unused land > construction land >

收稿日期: 2025-05-26

修回日期: 2025-10-28

采用日期: 2025-10-29

资助项目: 青海理工学院“昆仑英才”人才引进科研项目“基于人工智能的地表覆盖遥感信息提取方法研究”(W2023-QLGKLYCZX-034)

第一作者: 郑世妍(1999—), 女(汉族), 四川省资阳市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与土地利用覆被变化。Email: cheyanzheng@163.com。

通信作者: 刘小明(1986—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士, 副教授, 主要从事遥感与土地利用覆被变化、自然资源和生态环境评价研究。Email: xmliu@qhut.edu.cn。

water area. Their influence on habitat quality followed the order: water area > forest land > grassland > cultivated land > unused land ≈ construction land. In terms of comprehensive importance level, forest land was classified as extremely high, grassland as high, water area and cultivated land as medium, and unused land and construction land as low. ③ The multi-scenario prediction results for 2030 showed that the wildlife protection scenario outperformed the grassland protection scenario, and the grassland protection scenario outperformed the natural development scenario. [Conclusion] It is recommended to give priority to the implementation of wildlife protection strategies, strictly control human disturbance such as overgrazing, curb the trend of grassland degradation, strengthen the ecological restoration of forest land and water area, and coordinate ecological protection with economic development to promote the stability and enhancement of the regional ecosystem.

Keywords: land use change; carbon storage; habitat quality; PLUS model; InVEST model; Sanjiangyuan region

当前,全球气温变暖问题日益严峻,大气中二氧化碳(CO₂)等温室气体浓度持续上升,生物多样性减少和生态系统服务功能退化已成为全球面临的重大生态环境危机之一^[1]。在此背景下,碳储量和生境质量成为评价生态系统服务功能的两大核心指标^[2]。碳储量反映生态系统的固碳能力,其提升有助于降低CO₂浓度,增强碳汇功能。生境质量反映生态系统为物种提供适宜环境的能力,是衡量生物多样性与生态系统服务水平的核心指标^[2]。同时,二者之间也存在着显著的协同关系^[3]。一方面,生态系统碳储量的增加通常意味着生境质量的提升。例如,森林生态系统的碳储量丰富,往往伴随着良好的土壤肥力、丰富的植被覆盖和完整的食物链结构,为众多生物提供了优质的栖息地。另一方面,生境质量的改善也有助于碳储量的增加,通过保护和恢复受损生态系统,如退化湿地的修复,森林生态系统的重建等,不仅可以提高其生境质量,还能增强其碳吸收和储存能力。陆地生态系统碳储量的波动和生境质量退化均与土地利用变化密切相关。土地利用变化会引起碳汇与碳源转化,是影响碳储量变化的关键因素^[4]。同时不合理的土地利用转变是导致生境破碎与生物多样性丧失的主要因素^[5]。因此,探讨碳储量与生境质量对土地利用变化的响应已成为研究热点。

目前,研究土地利用变化应用较为广泛的预测模型有PLUS(patch-level land use simulation model, PLUS)^[6], CLUE-S^[7], CA-Markov^[8], FIUS^[9]模型等。PLUS模型是一种新兴的斑块生成土地利用预测模型,可以较精确地模拟不同年份,不同环境下的土地利用斑块级的变化,具有精度高,操作简便等优点^[10]。国内外常用的生态服务模型有评估碳储量的InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)^[11]和BIOME-BGC等^[12]模型,评估生境质量的InVEST, maxEnt^[13], HIS等^[14]模型。

InVEST模型综合性强,操作简单,结果可视化,适用于大尺度多种生态服务评估,既能评估碳储量也能评估生境质量,也能用于数据有限的情况。

近年来,相关研究多聚焦于土地利用对单一指标的影响,碳储量与生境质量常被单独研究,难以全面揭示土地利用变化对其复合效应。为弥补这一局限,本文尝试将二者协同评估,构建碳储量与生境质量复合评价体系,开展综合重要性研究。在情景设置上,以往研究多采用经济发展、耕地保护、生态保护等笼统的情景模式。本文结合三江源地区独特的生态环境特征(以草地为生态基底,且为全球生物多样性保护的关键区域之一),创新性地构建草地保护和野生动物保护情景,以提升情景设定的区域针对性与科学性。

本文研究思路如下:①以三江源地区2000,2010和2020年土地利用数据为基础,采用PLUS模型模拟2020年土地利用数据,并与2020年实际数据校验,kappa系数达标后进一步开展2030年多情景土地利用预测;②利用InVEST模型的碳储量和生境质量模块,估算三江源地区的碳储量和生境质量;③分析2000—2020年及2030年不同情景下的碳储量和生境质量的时空变化特征,探讨土地利用变化对碳储量和生境质量的影响,并综合碳储量和生境质量重要性等级高低进行生态评价。研究结果能够展现三江源地区碳储量和生境质量的变化状况,有助于区域内合理调整土地利用结构,进而提高碳储量和生境质量,实现区域可持续发展和生态环境保护目标。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江源地区(31°39′—36°16′N, 89°24′—102°23′E)位于中国西部青藏高原的核心地带,地处青海省南部,总面积超过 3.80×10^5 km²,是中国长江、黄河、澜

沧江的发源地,被誉为“中华水塔”。该地区地势西高东低,土地利用类型以草地为主,属于高原大陆性气候,气温随海拔升高而降低,降水量表现出空间差异,大致呈由东南向西北递减趋势,东南部的久治县降水量最大,达到 760.00 mm,而西北部的可可西里降水量只有 250.00 mm。三江源是全球最敏感和最脆弱的地区之一,也是中国重要的生态屏障和全球生物多样性保护的关键区域之一,在维持国家生态安全和水资源平衡方面发挥着关键作用^[15-16]。

1.2 数据来源

用于模拟未来土地利用的数据情况详见表 1。根据驱动因子可获取性、时效性和显著性原则,选取数字高程数据(DEM)、距高速公路距离、年均降水等 12 个驱动因子数据用于模拟未来土地利用。基于 PLUS 模型的数据输入需求,将空间分辨率统一为 30 m 的栅格数据,设置地理坐标系为 GCS_WGS_1984,投影坐标系为 Asia_North_Albers_Equal_Area_Conic。

表 1 用于模拟未来土地利用的数据来源

Table 1 Data sources for simulating future land use

数据类型	数据描述	分辨率/m	数据来源
土地利用	三期土地利用数据	30	中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)(https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54)
	人口数量	100	WorldPop 人口数据集(100 m)(https://www.worldpop.org/)
	距一二级道路距离		全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W)
	距三级道路距离	1 000	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W)
	距四级道路距离		全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W)
	距高速公路距离	1 000	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W)
PLUS 模型	距居民点距离	1 000	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W)
驱动因子	距水域距离	1 000	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W)
	DEM	30	NASADEM: NASA 30 m Digital Elevation Model 数据(https://earthengine.google.com)
	坡度	30	根据数字高程模型(DEM)提取
	年均气温	1 000	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)
	年均降水	1 000	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)
	年均蒸散量	1 000	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)

1.3 研究方法

1.3.1 多情景设置

本研究情景设置参考《三江源生态保护和建设二期工程规划(2014年)》及《三江源国家公园总体规划(2023—2030年)》进行。后者提出到 2030 年,三江源国家公园草地综合植被盖度提升到 69%,保障藏羚羊、雪豹等重点保护野生动物种群稳定健康。则在 PLUS 模型中设置自然发展、草地保护和野生动物保护情景模拟三江源 2030 年的土地利用数据,参考了学者对其他情景的设置方法^[9,17]。本研究的设定为:①自然发展情景(Q₁)。该情景基于 2010—2020 年土地利用类型变化规律,在不考虑区域规划的影响下,保持原有土地利用转移概率预测 2030 年土地利用变化。②草地保护情景(Q₂)。该情景考虑三江源草地综合植被盖度提高政策,则设置草地向建设用地转移减少 50%,草地向未利用地转移减少 50%。③野生动物保护情景(Q₃)。该情景考虑藏羚羊、雪豹等重点保护野生动物种群稳定健康政策,则设置林地和草地分别向建设用地转移减少

50%,水域和耕地分别向建设用地转移减少 30%,未利用地分别向林地和草地转移增加 35%,未利用地向水域转移增加 30%。

1.3.2 PLUS 模型

PLUS 模型主要包括土地扩张分析策略模块(LEAS)和基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CARS)两大模块,LEAS 模块采用随机森林算法计算各驱动因子对两期土地利用类型扩张的影响,获取各土地利用类型的发展概率,在 CA 模块输入转移概率矩阵和领域权重(表 2)等参数,动态地模拟斑块生成^[18]。转移矩阵设置参数为 0 或 1,1 表示地类之间可以转换,0 表示地类之间禁止转换。领域权重取值介于 [0,1] 之间,值越大表明扩张能力越强,邻域权重参数由表 2 知,领域权重设置计算公式为

$$W_i = \frac{TA_i - TA_{\min}}{TA_{\max} - TA_{\min}} \quad (1)$$

式中:W_i 是第 i 类土地类型领域权重;TA_i 为第 i 类土地利用扩张面积;TA_{min} 为各类土地利用最小扩张面积;TA_{max} 为各类土地利用最大扩张面积。

表 2 研究区 2030 年不同发展情景下各土地利用类型邻域权重

Table 2 Neighborhood weights of land use types under different development scenarios in study area in 2030

发展情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展(Q ₁)	0.004 8	0.000 0	0.423 9	1.000 0	0.190 8	0.762 1
草地保护(Q ₂)	0.002 9	0.000 0	0.119 6	0.807 7	0.072 9	1.000 0
野生动物保护(Q ₃)	0.000 0	0.002 9	0.011 6	0.923 4	0.060 2	1.000 0

1.3.3 InVEST 模型

InVEST 模型是用于评估和量化生态系统服务的生态模型,由美国斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)与世界自然基金会(WWF)联合开发。本研究采用模型中碳储量与生境质量模块。

(1) 碳储量。碳储量(carbon storage and sequestration)模块,选取地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳为基本碳库。由于研究区死亡有机物碳密度实测数据极难获取,且其碳储量在总碳库中比例较小,将其设置为零^[19]。计算公式为

$$C_i = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (2)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n A_i C_i \quad (3)$$

式中:*i*的代表土地利用类型;*C_i*为土地利用类型的碳密度;*C_{above}*,*C_{below}*,*C_{soil}*,*C_{dead}*分别代表该地类的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度、死亡有机物碳密度;*C_{total}*为陆地生态系统碳存储总量;*A_i*为土地利用类型*i*的面积;*n*为土地利用类型数量,本文为6。

陈光水等^[20]、Alam 等^[21]和 Giardina 等^[22]通过研究发现生物量碳密度和土壤碳密度与降水存在正相关关系,而与年平均气温的相关性较弱。现有研究

缺乏年均气温与土壤碳密度关系的定量表达,因此将降水量作为修正因子^[23]。由于三江源地区降水空间差异,由东南向西北递减,因此将降水量根据自然间断点法分为低(154.97~356.68 mm)、中(356.68~558.39 mm)和高(558.39~760.09 mm)3个区域(图1)。本文根据中国陆地生态系统碳密度数据集及其他学者的相关研究^[23-26],获得全国水平各土地利用类型的地上、地下生物量和土壤碳密度数据(表3),并根据降水量采用下列修正公式分别获得三江源分区后碳密度(表4)。查询获得全国的年降水为628.00 mm。

表 3 中国不同土地利用类型碳密度
Table 3 Carbon density of different land use types in China

土地利用类型	碳密度/(t·hm ⁻²)		
	地上	地下	土壤
耕地	5.70 ^[23]	7.95 ^[26]	108.40 ^[23]
林地	41.35 ^[24]	10.07 ^[24]	102.73 ^[24]
草地	0.68 ^[24]	6.54 ^[24]	82.34 ^[24]
水域	0.00 ^[23]	0.00 ^[26]	0.00 ^[23]
建设用地	1.07 ^[25]	0.00 ^[26]	0.00 ^[26]
未利用地	3.00 ^[25]	0.00 ^[26]	31.3 ^[26]

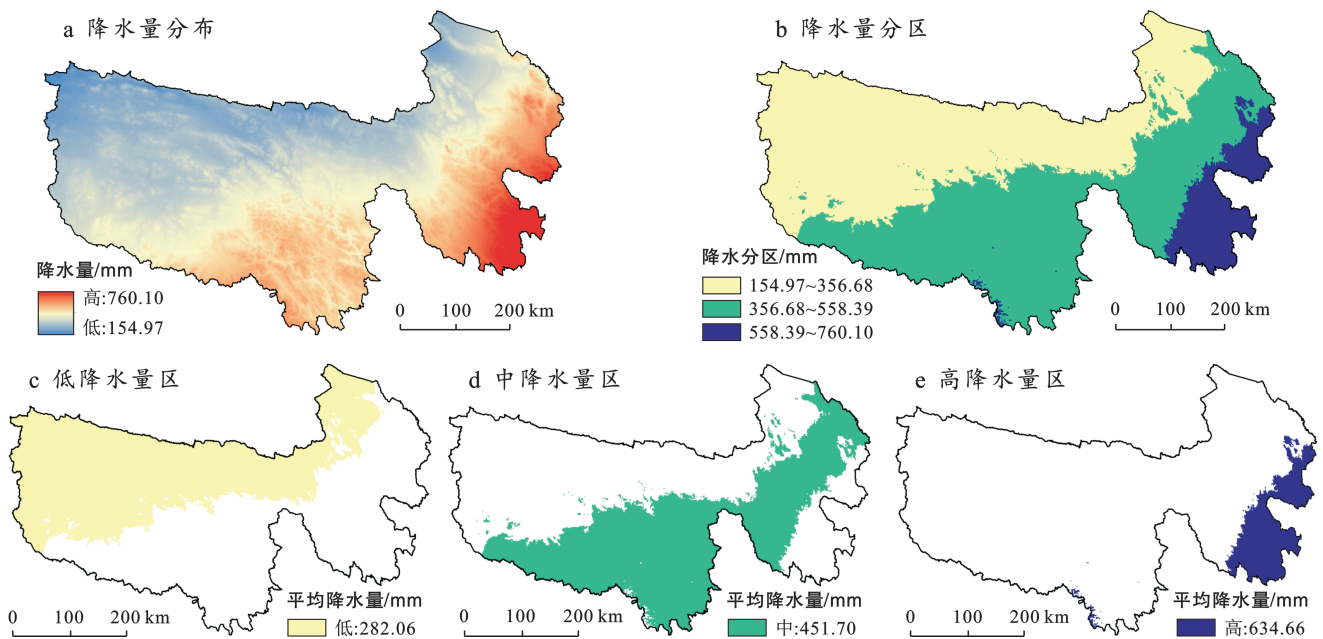


图 1 三江源地区降水量分布
Fig.1 Precipitation distribution in Sanjiangyuan region

$$K_{BP} = C'_{BP}/C''_{BP} = 6.789e^{0.0054P_A}/6.789e^{0.0054P_B} \quad (4)$$

$$K_{SP} = C'_{SP}/C''_{SP} = (3.3968 \times P_A + 3996.1)/(3.3968 \times P_B + 3996.1) \quad (5)$$

式中： K_{BP}, K_{SP} 为植被生物量碳密度和土壤碳密度的

降水校正因子； C'_{BP}, C''_{BP} 为根据三江源地区和全国年降水量校正后的植被生物量碳密度数据； C'_{SP}, C''_{SP} 别是根据三江源地区和全国年降水量校正后的土壤碳密度数据； P_A, P_B 别表示三江源地区和全国的年平均降水量。

表 4 三江源分区后不同土地利用类型碳密度

Table 4 Carbon density of different land use types in partitioned Sanjiangyuan region

单位:t/hm²

土地利用类型	降水量低区域			降水量中区域			降水量高区域		
	地上	地下	土壤	地上	地下	土壤	地上	地下	土壤
耕地	0.88	1.23	87.62	2.20	3.07	97.81	5.91	8.24	108.80
林地	6.39	1.55	83.03	15.96	3.89	92.69	42.86	10.44	103.11
草地	0.11	1.01	66.55	0.26	2.52	74.30	0.70	6.78	82.64
水域	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地	0.17	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00
未利用地	0.46	0.00	25.30	1.16	0.00	28.24	3.11	0.00	31.42

(2) 生境质量。生境质量(habitat quality)模块主要以土地利用数据、威胁因子参数和敏感性参数来测算相应栅格内的生境质量。本文参考相关研究^[27-28], 设定威胁因子与敏感性参数(表 5—6)。

表 5 威胁源的权重和最大影响距离
Table 5 Weights and maximum influence distances of threat sources

胁迫因子	影响距离/km	权重	衰减函数
耕地	4 ^[27]	0.7 ^[27]	线性 ^[27]
未利用地	3 ^[28]	0.2 ^[28]	指数 ^[28]
建设用地	8 ^[28]	0.8 ^[28]	指数 ^[28]

表 6 土地利用对威胁因子的敏感性
Table 6 Sensitivity of land use to threat factors

土地利用类型	生境适应性	耕地	未利用地	建设用地
耕地	0.7 ^[27]	0.5 ^[27]	0.1 ^[27]	1.0 ^[27]
林地	1.0 ^[28]	0.6 ^[28]	0.3 ^[28]	0.7 ^[28]
草地	0.8 ^[28]	0.4 ^[28]	0.3 ^[28]	0.7 ^[28]
水域	1.0 ^[28]	0.5 ^[28]	0.2 ^[28]	0.6 ^[28]
建设用地	0.0 ^[28]	0.0 ^[28]	0.0 ^[28]	0.0 ^[28]
未利用地	0.0 ^[28]	0.0 ^[28]	0.0 ^[28]	0.2 ^[28]

$$Q_{xj} = H_j \left\{ 1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right\} \quad (6)$$

式中： Q_{xj} 为 j 类土地利用中 x 栅格的生境质量指数，数值范围 0~1； H_j 为 j 类土地利用的生境适宜度； D_{xj}^z 为 j 类土地利用中 x 栅格的生境退化度； z 为归一化常量，通常设置为 2.5； k 为半饱和常数，不影响生境质量栅格的原有次序，默认值为 0.5。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (7)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰退}) \quad (8)$$

$$i_{rxy} = \exp \left(-2.99 \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{指数衰退}) \quad (9)$$

式中： D_{xj} 为 j 类土地利用中 x 栅格的生境退化度； R 为威胁因子总数； Y_r 为威胁因子 r 的栅格数； ω_r 为威胁因子 r 的权重； r_y 为 y 栅格中威胁因子的强度； β_x 为 x 栅格的可达性水平； S_{jr} 为不同生境对不同威胁因子 r 的敏感性； i_{rxy} 为 y 栅格中威胁因子 r 对 x 栅格的干扰程度； d_{xy} 是栅格 x 和 y 的线性距离； d_{rmax} 是威胁因子 r 的最大影响距离。

1.3.4 双变量空间自相关模型

莫兰指数(Moran' I)是用于度量空间自相关的指标，能够揭示某一属性在空间分布上的聚集或离散特征。双变量空间自相关可探究两个不同属性变量在空间上的相关性^[29]。本研究使用 GeoDa 软件，采用全局 Moran' I 的莫兰散点图，结合局部空间自相关指标(LISA)的聚类图，对碳储量与生境质量两个变量进行空间相关性分析，以揭示二者在空间格局中的关联特征。

1.3.5 基于碳储量和生境质量综合重要性等级评价

将碳储量和生境质量数据分别根据自然断点法进行重分类，均划分为 4 个自然等级，并对二者进行统一赋值，从低到高依次赋值为 1—4(表 7)。

表 7 碳储量与生境质量重要性分级标准

Table 7 Classification criteria for importance of carbon storage and habitat quality

重要性等级	较低	中等	较高	极高
2000—2030年碳储量	[0,1.17]	(1.17,3.49]	(3.49,5.73]	(5.73,14.08]
2000—2030年生境质量	[0,0.28]	(0.28,0.68]	(0.68,0.89]	(0.89,1]
赋值	1	2	3	4

使用 ArcGIS 软件,运用栅格计算器功能将重分类后的碳储量和生境质量进行叠加运算,计算得出每个栅格的重要性总和,加和后重要性评估值范围为[2,8],数值越大则代表该栅格碳储量和生境质量的综合重要性越高。将叠加分析后的碳储量与生境质量综合重要性再根据自然断点法重分类(表 8),并将综合重要性划分为 4 个等级:较低、中等、较高和极高,来反映三江源地区碳储量和生境质量的综合重要性等级分布情况^[2]。

2 结果与分析

2.1 模型精度验证

本研究使用 PLUS 模型,以 2010 年为初始土地

利用数据,基于 2010—2020 年的土地利用类型的发展概率生成模拟预测的 2020 年土地利用数据,将其与 2020 年实际土地利用数据进行对比(图 2)。检验出 PLUS 模型的 kappa 系数为 0.85,该精度较高,能够真实反映三江源地区土地利用变化。因此,PLUS 模型可以用于未来多情景土地利用变化预测。

表 8 碳储量与生境质量综合重要性分级标准

Table 8 Classification criteria for comprehensive importance of carbon storage and habitat quality

等级	较低	中等	较高	极高
分类标准	[2,3]	(3,5]	(5,6]	(6,8]

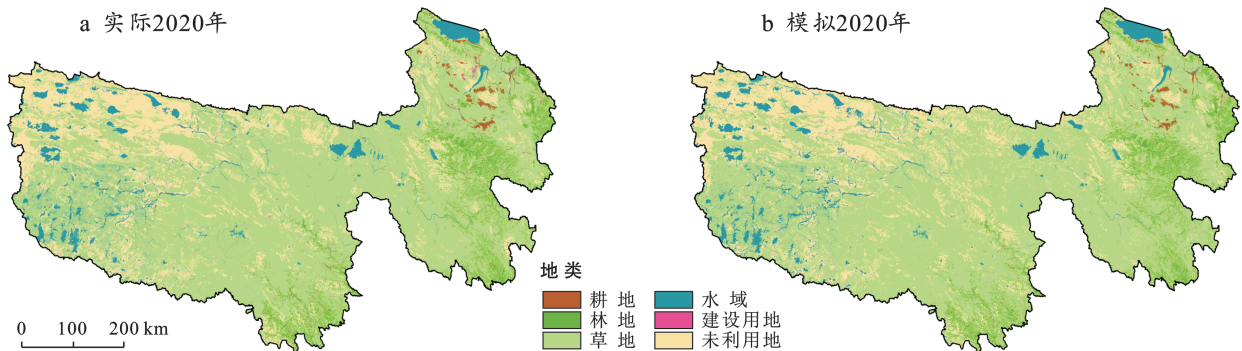


图 2 三江源地区 2020 年实际与模拟预测的土地利用对比

Fig.2 Comparison of actual and simulated land use in Sanjiangyuan region in 2020

2.2 2000—2020 年碳储量变化

利用 InVEST 模型的碳储量模块估算 2000, 2010 和 2020 年三江源地区碳储量变化(图 3)。东南地区碳储量较高,西北地区碳储量较低,与降水量空间分布一致。3 个时期的碳储量分别为 2.41×10^9 t, 2.47×10^9 t 和 2.47×10^9 t,呈波动变化。2000—2020 年碳储量总体呈上升趋势,2000—2010 年碳储量增加 6.87×10^7 t,2010—2020 年碳储量小幅下降 4.73×10^6 t。由图 5 可以看出,2000—2020 年三江源地区各地类每平方 km 面积内碳储量的大小顺序均为:林地 > 耕地 > 草地 > 未利用地 > 建设用地 > 水域。从各土地利用类型的碳储量和面积变化来看(图 4),2000—2010 年草地、耕地、建设用地的碳储量和面积在增加,而未利用地、林地的碳储量和面积在减少(水域固

碳能力甚微,则碳储量为零)。其中,草地碳储量增加最为显著,达 1.14×10^8 t,面积增加 16 141.08 km²,其增量远高于耕地和建设用地,同时也远超过林地和未利用地的减少量。因此,2000—2010 年草地扩张是碳储量上升的主因。从土地利用转移的角度来看(图 5),碳汇能力较高的草地,增加的面积主要由未利用地转移而来,转移面积高达 20 678.48 km²,远大于其余类型之间的转移面积,显著促进草地面积增加。草地面积的大幅增加不仅弥补了林地减少的负影响,而且推动了总碳储量的提升。这表明,2000—2010 年三江源地区实施的草地生态治理政策取得了显著成效,有效提高了区域碳储量。未来应继续加强草地生态治理,优先治理草地向未利用地的转移现象,同时加强林地的保护。

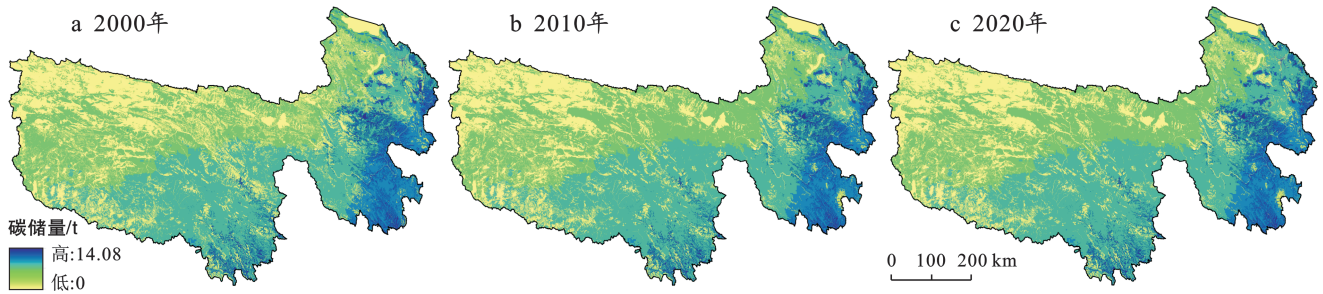


图 3 三江源地区 2000—2020 年碳储量变化分布

Fig.3 Distribution of carbon storage changes in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

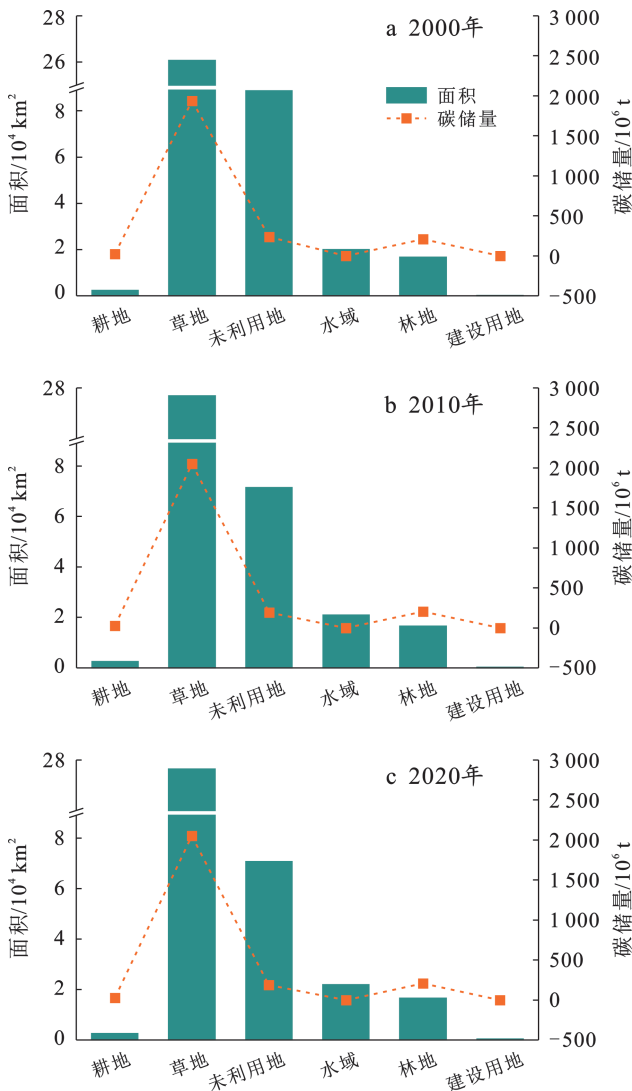


图 4 三江源地区 2000—2020 年各地类面积与碳储量变化
Fig.4 Changes in area and carbon storage of different land types in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

2010—2020 年林地、建设用地的碳储量和面积在增加,而草地、未利用地和耕地的碳储量和面积在减少。尽管碳汇能力最高的林地面积有所增加,但涨幅太小,仅增加 0.37 km²,贡献了 1.00×10⁴ t 的碳储量增量。与此同时,而碳汇能力较高的草地和耕地面积有所减少,尤其是草地面积减少较多,达

406.36 km²,导致碳储量减少 2.80×10⁶ t,因此总碳储量下降。从土地利用转移角度分析(图 5),尽管未利用地向草地转移面积最大,为 890.10 km²,但未利用地向水域、草地向未利用地以及草地向水域的转移面积也较大,分别为 879.25, 859.34 和 666.68 km²。在转移面积比例较大的前 4 类中,仅未利用地向草地转移对碳储量有促进作用,其余转移对碳储量产生抑制作用,因此导致碳储量略微减少。由于草地与水域之间的互转比为 1.68(即草地向水域的转移面积 666.68 km²与水域向草地转移的面积 397.88 km²之比),反映出部分草地净转为水域。同时,草地与建设用地之间的互转比高达 13.94(178.67 km²由草地转为建设用地,仅 12.82 km²由建设用地恢复为草地),表明建设用地扩张主要占用草地资源。因此,退化的草地面积主要转向了水域和建设用地。草地退化主要源于两方面因素:①近年来三江源地区降水量增加促使水域扩张,部分草地和未利用地转化为水域;②由于建设用地扩张主要由草地转入,反映出城镇化与基础设施建设的增长,导致草地被占用。未来应统筹生态保护与经济发展,巩固草地生态恢复成效,实现区域可持续发展。

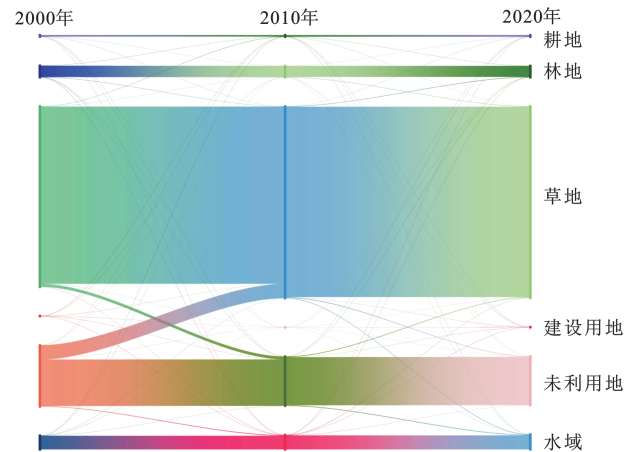


图 5 三江源地区 2000—2020 年土地利用转移桑基图
Fig.5 Sankey diagram of land use transition in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

2.3 2000—2020 年生境质量变化

利用 InVEST 模型的生境质量模块估算 2000, 2010 和 2020 年三江源地区生境质量变化, 结果如图 6 所示。

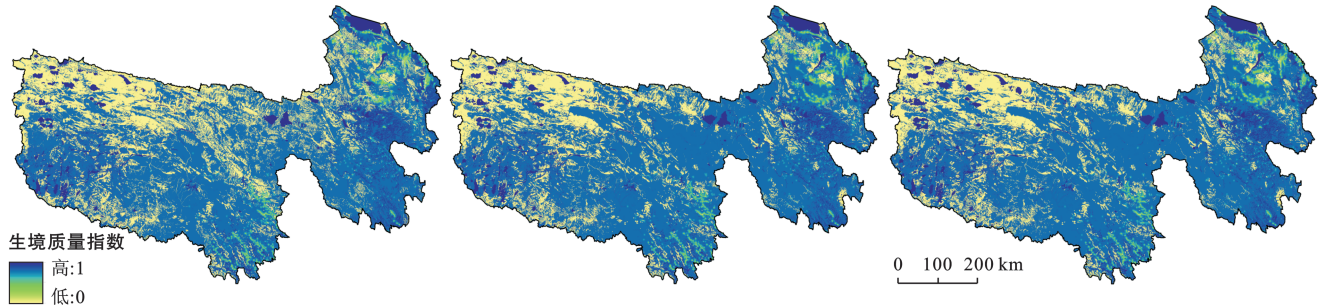


图 6 三江源地区 2000—2020 年生境质量变化分布

Fig.6 Distribution of habitat quality changes in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

由图 7 可以看出, 2000—2020 年三江源地区各地类的生境质量指数均值排序均为: 水域 > 林地 > 草地 > 耕地 > 未利用地 ≈ 建设用地。2000—2010 年草地、水域和耕地面积在增加, 而林地面积在减少 (图 4) (未利用地和建设用地生境水平太低不计算)。该时期里, 区域生境水平整体上升 0.035 5。这一显著提升得益于生境水平最高的水域面积大幅增加了 1 009.14 km², 其增加量远大于林地面积的减少量 108.14 km², 水域主要由生境水平低的未利用地转移而来 (图 5)。同时, 生境水平较高的草地面积也大幅增加, 主要由未利用地转移而来。因此, 2000—2010 年三江源地区不仅在草地治理方面取得显著成效, 水域治理政策也发挥了重要作用, 区域生境水平得到有效提升。未来应继续加强草地和水域的生态治理, 同时需要加强对林地的保护。2010—2020 年水域和林地面积在增加, 而草地和耕地面积在减少 (图 4)。该时期, 生境水平仅上升 0.001 7, 这一微小变化主要是因为仅有水域面积增加较多, 增加了 935.58 km², 主要由未利用地转移而来, 林地面积微增, 而草地萎缩了 406.36 km², 主要转化为未利用地。因此, 2010—2020 年在保持水域治理成效的基础上, 应进一步推进林地治理, 并着重加大对草地的治理力度。

2.4 碳储量和生境质量相关性分析

使用 ArcGIS 软件建立 15 km × 15 km 的渔网, 并分别提取每个网格对应的平均生境质量和碳储量, 再基于 GeoDa 软件的双变量空间自相关模型, 分析碳储量与生境质量的空间关联特征。根据散点图显示 (图 8), 2000, 2010 和 2020 年的全局 Moran' I 指数分别为 0.419, 0.407 和 0.402, 均为正值且通过显著性检验, 表明生境质量与碳储量之间存在一定的正向

空间关联性, 即生境质量高 (低) 的区域, 碳储量也倾向与高 (低)。从局部空间聚类特征来看 (图 9), 高生境质量-高碳储量区域 (高高聚集) 主要分布在东部和南部地区的林地集中区域以及林地与草地交错处, 具有良好功能协同性。高生境质量-低碳储量区域 (高低聚集) 主要分布在部分西部和东北部地区的水域集中区, 反映出水域生境水平高但碳汇能力相对低。低生境质量-高碳储量区域 (低高聚集) 分布较少主要集中在部分南部和东部地区的耕地区。低生境质量-低碳储量区域 (低低聚集) 显著集中在西北部的未利用地区域, 展现出恶劣条件下生态功能整体较弱。此外, 不显著区域主要位于未利用地与草地交错的中部地区, 可能存在干扰影响的复杂特征导致空间关联性较弱。

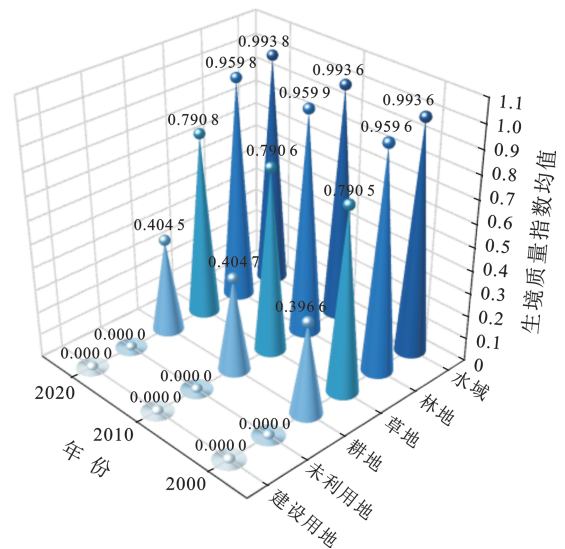


图 7 三江源地区 2000—2020 年各地类生境质量均值变化
Fig.7 Changes in mean habitat quality of different land types in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

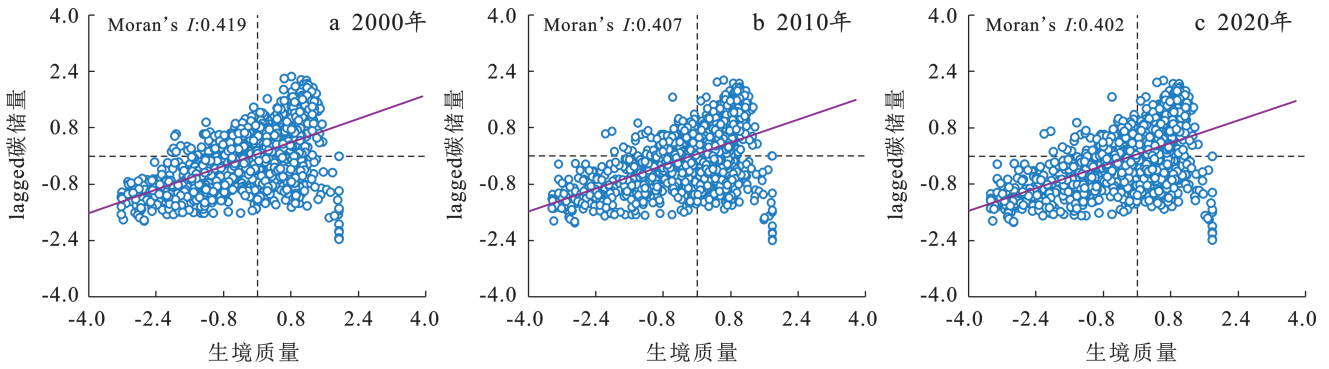


图 8 三江源地区 2000—2020 年生境质量与碳储量莫兰指数散点图

Fig.8 Moran's I scatter plot of habitat quality and carbon storage in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

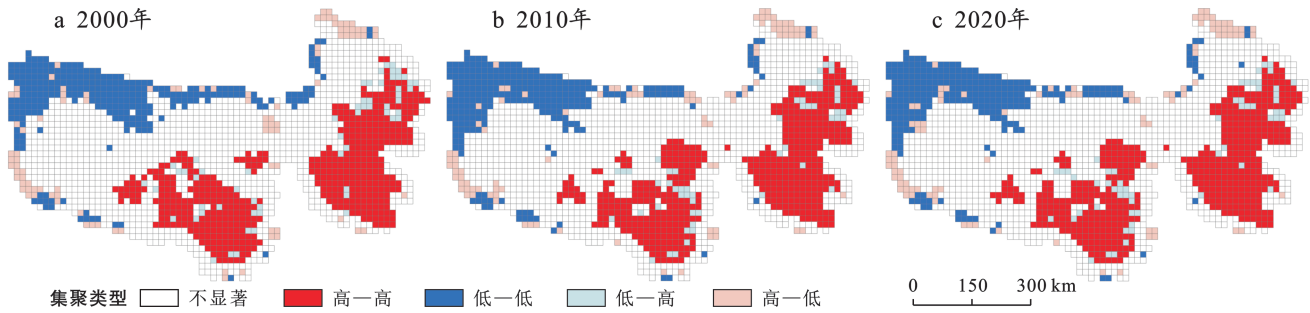


图 9 三江源地区 2000—2020 年生境质量与碳储量集聚类型

Fig.9 Cluster types of habitat quality and carbon storage in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

2.5 碳储量和生境质量综合重要性等级变化

三江源地区 2000—2020 年碳储量与生境质量的阶段变化趋势并非完全一致。考虑到仅关注碳储量或生境质量单一指标来评价生态保护效果具有局限性,因此本研究接下来基于碳储量和生境质量进行综合重要性等级评价,以期能够提供更全面、可靠的结论。

从空间分布来看(图 10),三江源地区重要性等

级空间分布与土地利用类型分布一致性较高。具体来看,重要性较低的区域主要分布在共和、治多、格尔木、曲麻莱县等地,以未利用地和建设用地为主;重要性中等的区域主要分布在治多、格尔木、共和、贵南县等地区,以水域和耕地为主;除西北部的重要性较低地区外,主要是重要性较高的区域,以草地为主;重要性极高的区域主要分布在囊谦、班玛、玛沁、同德县等地区,以林地为主。

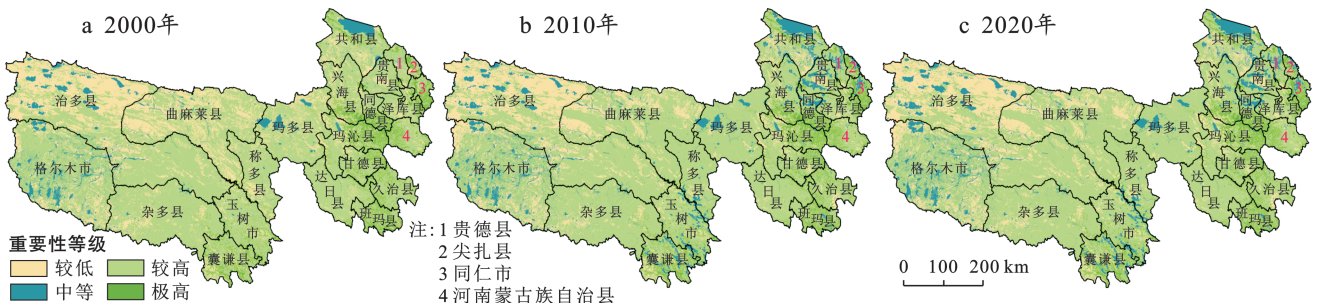


图 10 三江源地区 2000—2020 年综合重要性等级分布

Fig.10 Distribution of comprehensive importance levels in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

根据三江源地区各年份的碳储量与生境质量综合重要性等级面积变化(图 11)显示,2000—2020 年 4 个等级的区域面积比例排序均表现为:重要性较高等级>重要性较低等级>重要性中等等级>重要性极高等级的区域。2000—2010 年综合重要性等级呈“两增两减”变化,重要性较高和中等区域分别

增加 15 842.87 和 1 432.33 km²,增幅分别为 6.21% 和 5.29%,而重要性较低和极高的区域分别减少 17 175.46 和 98.79 km²,降幅分别为 19.42% 和 0.62%。虽然重要性极高的区域微减,但比例最大的重要性较高的区域大幅扩张,且重要性较低的区域大幅减小,表明 2000—2010 年生态治理效果很不

错,未来需要进一步关注林地的保护。2010—2020年则呈“一增三减”变化,重要性中等的区域增加 745.08 km²,增幅为 2.61%,而重要性较低、较高和极高的区域分别减少 515.32, 223.55 和 6.22 km²,降幅分别为 0.72%, 0.08% 和 0.04%。与 2000—2010 年比较,比例最大的重要性较高的区域从增幅 6.21% 转为降幅 0.08%,其次重要性较低的区域从大幅减少 19.42% 到略微减少 0.72%,均体现 2010—2020 年的治理效果在减弱。在 2000—2010 年和 2010—2020 年两个阶段中,重要性等级上升的面积均大于重要性等级下降的面积,表明三江源地区的整体生态保护有所成效。在 2000—2010 年里,重要性等级上升的面积相对较大,表明生态治理效果显著。2000—2010 年和 2010—2020 年两个阶段里,虽然重要性等级下降的面积在减少,从 4 995.36 km² 下降至 2 567.60 km²,降幅为 48.60%,但重要性等级上升的面积减少幅度大得多,从 21 933.03 km² 下降至 2 826.83 km²,降幅为 87.11%,表明 2010—2020 年生态治理效果有所减弱。

898.92 和 36.06 km²,水域扩张是因为降水量增加对水域的促进作用。然而,林地、草地和未利用地分别减少 114.41, 381.30 和 434.55 km²。虽然未利用地减少呈向好趋势,但自然发展模式下林地和草地面临退化压力,同时城镇化建设持续推进压力。在 Q₂ 情景下,草地保护政策效果显著,草地面积增加 134.57 km²,水域保持扩张趋势,增加 900.17 km²,同时建设用地和未利用地分别减少 3.02 和 880.39 km²,表明该情景在生态保护与建设用地管控方面取得平衡,但林地仍减少 146.68 km²,说明单一草地保护政策对林地生态系统的带动有限。在 Q₃ 情境下,生态综合治理效益最为突出,林地、草地和水域分别增加 4.84, 15.76 和 1 161.42 km²,建设用地和未利用地分别减少 3.37 和 1 177.42 km²,表明该情景下生态用地整体恢复、建设用地扩张得到有效遏制。从碳储量变化来看,3 种情景下的碳储量分别为 2.464 5 × 10⁹ t(Q₁), 2.466 5 × 10⁹ t(Q₂) 和 2.466 6 × 10⁹ t(Q₃), 排序为: Q₃ > Q₂ > Q₁。延续 2010—2020 年碳储量减少 4.73 × 10⁶ t 的下降趋势,2020—2030 年 Q₁ 情景下碳储量减少 5.11 × 10⁶ t, 下降幅度进一步扩大。主要归因于林地、草地减少以及建设用地进一步扩张。Q₂ 情景下碳储量减少 3.05 × 10⁶ t, 下降幅度明显减小。这是源于草地由减转增使得碳汇能力提升,同时建设用地扩张得到遏制。Q₃ 情景下碳储量仅减少了 2.96 × 10⁶ t, 下降幅度进一步减小,反映出林地和草地协同保护对碳汇能力的显著提升。从生境质量变化来看,3 种情景下生境质量平均指数分别为 0.663 5(Q₁), 0.664 4(Q₂) 和 0.665 3(Q₃), 大小排序为: Q₃ > Q₂ > Q₁。延续 2010—2020 年生境质量指数增加 0.001 7 的轻微上升趋势,2020—2030 年 Q₁ 情景下生境质量指数微增 0.001 3, 这主要源于生境水平高的水域显著扩张,弥补了林地、草地减少的负影响。Q₂ 情景下生境质量指数提升 0.002 2, 这是在水域进一步扩张和草地恢复的共同推动下使得生境水平提升。Q₃ 情景下生境质量指数提升 0.003 3, 提升幅度最大,这是因为水域、林地和草地这三类高生境水平用地均有所增加,实现了生态效益的最大化。

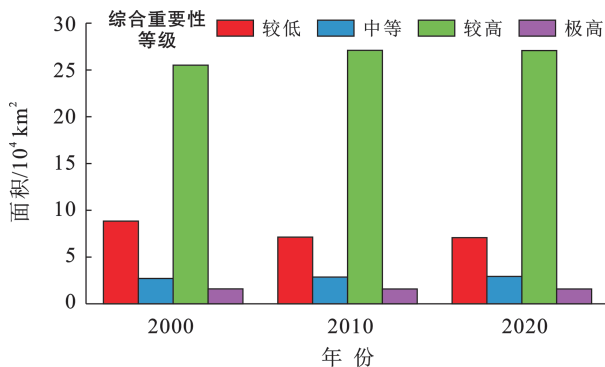


图 11 三江源地区 2000—2020 年综合重要性等级面积变化
Fig.11 Changes in area of comprehensive importance levels in Sanjiangyuan region from 2000 to 2020

2.6 多情景预测下碳储量和生境质量变化

对 2030 年三江源地区自然发展(Q₁)、草地保护(Q₂)、野生动物保护(Q₃)3 种情景进行预测,预测的各地类面积变化情况详见表 9。与 2020 年相比,在不受约束的 Q₁ 情景下,水域和建设用地分别增加

表 9 三江源地区 2020 和 2030 年不同情景下各地类面积变化

Table 9 Changes in area of different land types in Sanjiangyuan region in 2020 and under different scenarios in 2030

项目	各地类面积/km ²					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020 年情景	2 555.22	16 594.67	276 483.02	21 916.47	384.89	70 718.71
2030 年自然发展情景(Q ₁)	2 550.49	16 480.26	276 101.72	22 815.39	420.95	70 284.16
2030 年草地保护情景(Q ₂)	2 550.56	16 447.99	276 617.59	22 816.64	381.87	69 838.32
2030 年野生动物保护情景(Q ₃)	2 553.99	16 599.51	276 498.78	23 077.89	381.52	69 541.29

2.7 多情景预测下综合重要性等级变化

三江源地区 2030 年 3 种情景下的综合重要性等级分布如图 12 所示。分析三江源地区 2020 和 2030 年 3 种情景下各等级面积的比例变化(表 10),发现 3 种情景下重要性较低的区域面积均有所减少,其中 Q_3 情景减少幅度最大,显示出更强的生态恢复与退化控制能力。相较于自然发展模式下的 Q_1 情景, Q_2 情景下重要性较低的面积比例在减小,重要性较高的面积比例在增加,但重要性极高区域的面积比例稍有减少。反映出以草地保护为核心的政策虽有助于维持重要性较高的生态区域,但对重要性极高的生态区域未起到促进作用。 Q_3 情景下则表现出更全面的生态治理效果。不仅重要性较低区域的面积比

例最低,而且重要性较高区域的面积比例也在增加,更重要的是重要性极高区域的面积比例也有所提升。尽管 Q_3 情景对重要性较高区域的促进作用不及 Q_2 情景,但从整体生态治理效果来看, Q_3 情景仍然最优。为了更直观地比较 3 种情景的生态治理效果,可以将重要性较高和重要性极高的面积叠加起来看, Q_1 、 Q_2 和 Q_3 情景下叠加的面积分别为 286 070.58、286 528.70 和 286 568.19 km^2 ,比例分别为 74.00%、74.12% 和 74.13%。由此可见, Q_3 情景在生态治理方面效果最优。因此,在综合考虑碳储量与生境质量的评价中, Q_3 情景优于 Q_2 情景, Q_2 情景优于 Q_1 情景,这与碳储量和生境质量评价结论一致,进一步验证了 Q_3 是最优情景的结论。

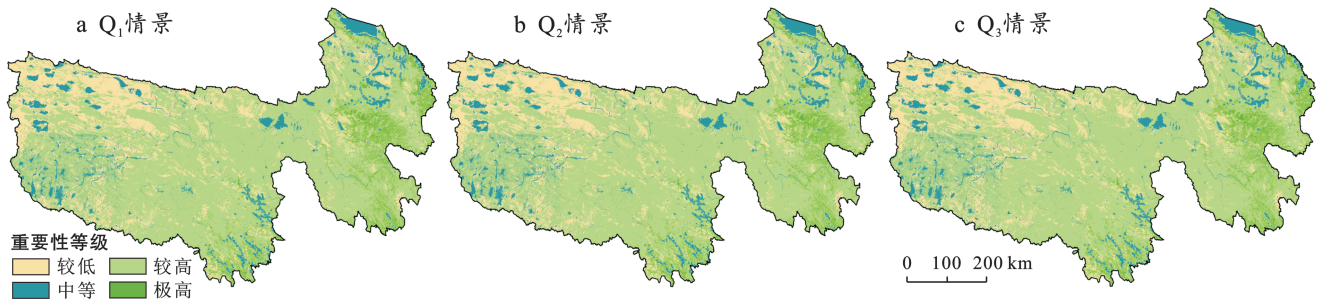


图 12 三江源地区 2030 年多情景预测综合重要性等级分布

Fig.12 Distribution of comprehensive importance levels under multiple scenarios in Sanjiangyuan region in 2030

表 10 三江源地区 2020 年及 2030 年不同情景下各重要性等级面积比例
Table 10 Area proportions of different importance levels in Sanjiangyuan region in 2020 and under different scenarios in 2030

等级	2020 年		2030 年 Q_1 情景		2030 年 Q_2 情景		2030 年 Q_3 情景	
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
较低	70 730.41	18.30	70 336.51	18.20	69 851.90	18.07	69 553.05	17.99
中等	29 277.19	7.57	30 150.28	8.06	30 176.77	7.81	30 436.12	7.87
较高	270 737.59	70.04	270 368.74	69.94	270 858.03	70.07	270 749.08	70.04
极高	15 812.17	4.09	15 701.83	4.06	15 670.67	4.05	15 819.11	4.09

3 讨论

研究结果表明,草地和林地面积增加对碳储量与生境质量均有正向推动作用,尤其是草地在区域内大幅度扩张过程中提升碳汇能力的同时,也改善了物种栖息环境。相反,未利用地与建设用地增加则同时抑制两项指标。虽然水域的碳汇能力低,但水域增加对林地和草地有正向反哺作用。由此可见,生态土地利用类型的增加对生态系统服务功能具有双重促进作用。同时,碳储量与生境质量在土地利用变化响应上具有高度一致性,特别是在林地和草地环境中,二者指标均出现协同提升,说明加强生态用地管理是实现双指标优化的关键路径。

2000—2010 年三江源地区的碳储量和生境质量显著提升,综合重要性等级上升的面积也较多。这一成果得益于 2005 年启动的三江源自然保护区生态保护和建设一期工程。该工程通过治理草地退化、土地沙化、水土流失等问题,以及实施禁牧等政策,使得未利用地大量向草地转移,草地面积显著增加;同时,未利用地向水域的转移也促进水域面积的增加。然而,2010—2020 年碳储量出现略微下降,生境质量指数仅轻微上升,综合重要性等级上升的面积也明显减少。直接原因在于水域轻微增加、林地微增、建设用地增加、草地转为下降。首先,由于城镇化与基础设施建设的需求增长,导致草地被占用。其次,未利用地与草地的互转比由 4.87(2000—2010 年)降

至1.04(2010—2020年),反映出对未利用地的治理力度不足,导致草地恢复效果不佳。间接原因是气候变化和人类活动(如过度放牧)等因素影响,导致草地退化的治理效果不明显。因此,未来治理应聚焦草地退化控制,统筹生态保护与经济发展,并在未利用地区域促进草地恢复。例如,应在放牧频繁区改善草地生长条件,促进草地恢复。同时,林地具有高碳储量和高生境水平,对进一步改善生态环境有重要作用,应作为重点保护对象。未来可以在具备足够生长条件的区域开展植树造林工作,提高林地覆盖率。此外,林草地面积增加也有助于提升区域的水涵养能力。

基于综合重要性等级的空间分布特征及土地利用变化趋势,本研究进一步提出分区分类的差异化保护策略,以增强政策的实践指导性。首先,对于东部及东南部林地集中分布的重要性极高区,如囊谦、班玛县等区域,应实施最严格的保护政策,重点维护其作为碳汇核心与生物多样性庇护所的功能。其次,对于中部广泛分布的重要性较高的草地覆盖区,治理核心是遏制草地退化,促进草地恢复,需严格执行草畜平衡制度,并统筹生态保护与经济发展。最后,对于西北部未利用地集中的重要性较低区,如治多、曲麻莱县等区域,应积极稳妥地推进沙化治理和生态修复工程,促进未利用地向生态草地的自然转化。通过上述差异化施策,可推动三江源地区生态系统服务的整体提升与协同增效。

本研究结果中,2000,2010和2020年三江源地区3个时期内的碳储量呈现出先大幅增加后略微减少的变化趋势,与Wu Xinyan等^[26]的研究结果一致;生境质量指数则表现为先大幅上升后轻微上升,与Jiang Rui等^[28]的研究结果一致。此外,本研究发现草地退化对生态系统服务功能产生负面影响,这与张爽等^[4]在纳帕河流域的研究结论一致;也与许茜等^[15]指出草地退化是三江源地区的主要问题的观点相契合。同时,本研究也揭示了碳储量与生境质量的变化与土地利用格局之间的紧密联系。

从多情景分析来看,根据2030年的预测结果,野生动物保护情景(Q₃)在提升碳储量和生境质量方面最为出色,优于草地保护情景(Q₂),而草地保护情景(Q₂)又优于自然发展情景(Q₁)。其中,Q₃情景的核心是保护各类生态用地,强调生态系统的整体性,而Q₂情景的核心是草地保护,这表明保护措施不应局限单一目标,而应从全局出发,实现林地、草地和水域的协同保护。该研究结果也表明了通过优化土地

利用格局可以提高碳储量和生境质量,对生态环境保护产生积极影响。

此外,本研究在方法上存在一定的局限性。首先,InVEST模型的生境质量模块未考虑研究区具体的生物种类数据,威胁因子和敏感性因子更多依赖于前人研究的经验数据。其次,碳储量模块中碳密度数据虽引用数据集根据降水量进行了修正,但缺乏对三江源地区实际情况的针对性研究。未来研究可以进一步考虑生态系统服务功能的多维度需求来优化评估指标。同时,可以结合实地调查数据,提高模型的适用性和准确性。

4 结论

(1) 2000,2010和2020年碳储量分别为 2.41×10^9 t, 2.47×10^9 t和 2.47×10^9 t,生境质量平均指数分别为0.625 1,0.660 6和0.662 2,2000—2010年生态保护效果显著,然而,2010—2020年生态改善趋缓,亟需增强治理措施。

(2) 三江源地区各土地利用类型对碳储量的影响顺序为:林地>耕地>草地>未利用地>建设用地>水域,对生境质量的影响顺序为:水域>林地>草地>耕地>未利用地≈建设用地。从综合重要性等级来看,林地是重要性等级极高的地类,草地是重要性等级较高的地类,水域和耕地是重要性等级中等的地类,而未利用地和建设用地是重要性等级较低的地类。因此,未来生态保护应加强林地的保护与发展,优先治理草地的退化问题,减少草地向未利用地的转移,并对水域和耕地采取相应的保护措施。

(3) 2030年不同情景下的预测结果显示,野生动物保护情景(Q₃)在提升碳储量和生境质量方面最为出色,优于草地保护情景(Q₂),而草地保护情景(Q₂)又优于自然发展情景(Q₁)。Q₃情景协同保护林地、草地与水域,整体生态服务提升效果最佳。因此,建议优先推行野生动物保护策略,强化生态系统整体协同管理。

参考文献(References)

- [1] 李奇,朱建华,肖文发.生物多样性与生态系统服务:关系、权衡与管理[J].生态学报,2019,39(8):2655-2666.
Li Qi, Zhu Jianhua, Xiao Wenfa. Biodiversity and ecosystem services: Relationship, balance and management [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(8):2655-2666.
- [2] 刘梦园.基于InVEST模型的河西地区碳储量与生境质量评价[D].甘肃兰州:兰州大学,2023.
Liu Mengyuan. Assessment of carbon storage and habitat quality in Hexi region based on InVEST model [D]. Lan-

- zhou, Gansu: Lanzhou University, 2023.
- [3] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 78-87.
Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Temporal and spatial heterogeneity of synergistic relationship of ecosystem services balance in the Yellow River basin [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 78-87.
- [4] 张爽, 高启晨, 张戎, 等. 基于PLUS-InVEST模型碳储量时空演变及驱动因素分析: 以纳帕海流域为例[J]. 中国环境科学, 2024(9): 5192-5201.
Zhang Shuang, Gao Qichen, Zhang Rong, et al. Spatial-temporal evolution of carbon storage and its driving factors based on PLUS-InVEST model: A case study of napahai basin [J]. China Environmental Science, 2024 (9): 5192-5201.
- [5] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于InVEST模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究: 以北京为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 553-562.
Chen Yan, Qiao Fei, Jiang Lei. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52 (3): 553-562.
- [6] Liang Xun, Guan Qingfeng, 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.
- [7] 蔡玉梅, 刘彦随, 宇振荣, 等. 土地利用变化空间模拟的进展: CLUE-S模型及其应用[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 63-71.
Cai Yumei, Liu Yansui, Yu Zhenrong, et al. Progress in spatial simulation of land use change: CLUE-S model and its application [J]. Progress in Geography, 2004, 23 (4): 63-71.
- [8] 陈勉为, 冯丹, 张仕凯, 等. 基于RSEI和ANN-CA-Markov模型的伊宁市生态环境质量动态监测及预测研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 911-921.
Chen Mianwei, Feng Dan, Zhang Shikai, et al. Study on dynamic monitoring and prediction of eco-environmental quality in Yining City based on RSEI and ANN-CA-Markov model [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 911-921.
- [9] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于Markov-FLUS模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958.
Chen Liting, Cai Haisheng, Zhang Ting, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use in Raohe River basin based on Markov-FLUS model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [10] 汪勇政, 徐雅利, 余浩然. 基于PLUS-InVEST模型的安徽省碳储量时空变化预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 277-289.
Wang Yongzheng, Xu Yali, Yu Haoran. Prediction of spatial and temporal changes of carbon storage in Anhui Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 277-289.
- [11] 张晓东, 武丹, 王莹, 等. 耦合InVEST与Geodetector模型的银川市生境质量时空演变特征及影响因子研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1242-1251.
Zhang Xiaodong, Wu Dan, Wang Ying, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of habitat quality in Yinchuan City by coupling InVEST and geodetector models [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1242-1251.
- [12] 黄璐瑶, 杜珊凤, 纪小芳, 等. 基于Biome-BGC模型的浙江凤阳山针阔混交林碳动态模拟[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(5): 11-20.
Huang Luyao, Du Shanfeng, Ji Xiaofang, et al. Dynamic simulation of carbon in coniferous and broad-leaved mixed forest in Fengyangshan, Zhejiang Province based on Biome-BGC model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(5): 11-20.
- [13] 李莹, 马伯虎, 赵宁曦. 基于MaxEnt模型的海南岛人类活动强度分布预测及其对野生动物生境干扰分析[J]. 生态科学, 2024, 43(6): 43-52.
Li Ying, Ma B H, Zhao Ningxi. Prediction of human activity intensity distribution and analysis of its interference to wildlife habitat in Hainan Island based on MaxEnt model [J]. Ecological Science, 2024, 43(6): 43-52.
- [14] 孟庆林, 李明玉, 任春颖, 等. 基于HSI模型的吉林省东部地区生境质量动态评价[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 140-147.
Meng Qinglin, Li Mingyu, Ren Chunying, et al. Dynamic assessment of habitat quality in eastern Jilin Province based on HSI model [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(3): 140-147.
- [15] 许茜, 李奇, 陈懂懂, 等. 近40a三江源地区土地利用变化动态分析及预测[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 695-704.
Xu Qian, Li Qi, Chen Dongdong, et al. Dynamic analysis and prediction of land use change in the three rivers source area in recent 40 years [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 695-704.
- [16] 蔡永祥, 罗少辉, 王军, 等. 三江源地区1961—2019年降水量时空变化特征[J]. 草业科学, 2022, 39(1): 10-20.
Cai Yongxiang, Luo Shaohui, Wang Jun, et al. Spatial-

- temporal variation characteristics of precipitation in Sanjiangyuan region from 1961 to 2019 [J]. *Pratacultural Science*, 2022,39(1):10-20.
- [17] 贾天朝,胡西武.基于PLUS-InVEST-Geodector模型的三江源国家公园碳储量时空变化及驱动力[J].*环境科学*,2024,45(10):5931-5942.
- Jia Tianzhao, Hu Xiwu. Spatial-temporal changes and driving forces of carbon storage in Sanjiangyuan National Park based on plus-invest-geodecotor model [J]. *Environmental Science*, 2024,45(10):5931-5942.
- [18] 解铭威,周慧荻,陈耸,等.2000—2020年山西省吕梁市土地利用时空变化及其驱动因素[J].*水土保持通报*,2024,44(3):296-306.
- Xie Mingwei, Zhou Huidi, Chen Song, et al. Spatio-temporal evolution of land use and its driving forces in Lüliang City of Shanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(3):296-306.
- [19] 李俊,杨德宏,吴锋振,等.基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J].*水土保持通报*,2023,43(1):378-387.
- Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage in Kunming based on PLUS and InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):378-387.
- [20] 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等.森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J].*亚热带资源与环境学报*,2007,2(1):34-42.
- Chen Guangshui, Yang Yusheng, Liu Lezhong, et al. Research progress of underground carbon allocation (TBCA) in forest [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007,2(1):34-42.
- [21] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013,89:67-76.
- [22] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000,404(6780):858-861.
- [23] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].*中国科学D辑*,2003,33(1):72-80.
- Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. Vegetation and soil carbon storage in China [J]. *Science in China (Series D)*, 2003,33(1):72-80.
- [24] 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*,2019,4(1):86-92.
- Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. 2010s China terrestrial ecosystem carbon density data set [J]. *China Scientific Data*, 2019,4(1):86-92.
- [25] 陈利军,刘高焕,励惠国.中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J].*遥感学报*,2002,6(2):129-135.
- Chen Lijun, Liu Gaohuan, Li Huiguo. Remote sensing dynamic monitoring of net primary productivity of vegetation in China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002,6(2):129-135.
- [26] Wu Xinyan, Shen Caiting, Shi Linna, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and simulation prediction of carbon storage: A case study in Sanjiangyuan Area, China [J]. *Ecological Informatics*, 2024, 80: 102485.
- [27] 孙晓雨,杨金明,张家豪,等.五台山风景名胜区土地利用变化及其对生境质量的影响[J].*自然保护地*,2024,4(2):124-140.
- Sun Xiaoyu, Yang Jinming, Zhang Jiahao, et al. Land use change and its influence on habitat quality in Wutai Mountain scenic spot [J]. *Natural Protected Areas*, 2024,4(2):124-140.
- [28] Jiang Rui, Liu Jingfeng. Characterization and projection of spatial and temporal changes in habitat quality of Sanjiangyuan based on land use change [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2024,34(9):1797-1821.
- [29] 贾艳艳,王少杰,刘福胜,等.黄河三角洲高效生态经济区土地利用变化及其与生境质量的相关性[J].*水土保持通报*,2020,40(6):213-220.
- Jia Yanyan, Wang Shaojie, Liu Fusheng, et al. Land use change and its correlation with habitat quality in the efficient eco-economic zone of the Yellow River delta [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(6):213-220.