

基于土地变化的贵州省碳储量演变及其脆弱性特征分析

陈大蓉¹, 周旭¹, 杨胜天², 裴宇¹, 胡玉雪¹, 胡锋³

(1.贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳 550025; 2.北京师范大学水科学研究院, 北京 100000; 3.贵州省生态气象和卫星遥感中心, 贵州贵阳 550002)

摘要: [目的] 分析贵州省生态系统碳储量时空分布格局、演变特征及其对土地利用转移的响应, 研究各县域生态系统碳储量服务的脆弱性, 为贵州省区域土地利用管理决策及“双碳”目标的实现提供科学依据和参考。[方法] 运用 InVEST 模型和潜在影响指数(PI)分析贵州省 2000—2020 年碳储量变化特征和生态系统碳储存服务的脆弱性。[结果] ①近 20 a 间贵州省土地利用结构发生显著变化, 前 10 a 和后 10 a 分别有 14.10%, 17.29% 的土地发生转移, 耕地是建设用地扩张的主要来源。②贵州省 20 a 间生态系统碳储量减少 2.40×10^7 t, 林地的缩减和建设用地的扩张是碳储量减少的主要原因。③贵州省碳储量 Moran's I 指数均大于 0, 空间分布具有显著的空间正相关性和集聚性。冷热点分析显示碳储量热点分布较为分散, 冷点分布集中稳定。④贵州省前 10 a 和后 10 a PI 指数分别为 -1.27 和 -0.15, 脆弱性有所改善。县域间脆弱性存在空间差异, 边缘县域负向影响显著, 20 a 间 81.82% 的县脆弱性降低。[结论] 贵州省林地的转出和建设用地的扩张对碳储量和碳储量服务脆弱性影响显著, 未来应优化土地利用结构, 加强规划管理。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; InVEST 模型; 脆弱性; 贵州省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0301-09

中图分类号: P96, X87

文献参数: 陈大蓉, 周旭, 杨胜天, 等. 基于土地变化的贵州省碳储量演变及其脆弱性特征分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 301-309. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230216.002; Chen Darong, Zhou Xu, Yang Shengtian, et al. Analysis of carbon stock evolution and its vulnerability characteristics based on land use change in Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 301-309.

Analysis of Carbon Stock Evolution and Its Vulnerability Characteristics Based on Land Use Change in Guizhou Province

Chen Darong¹, Zhou Xu, Yang Shengtian², Pei Yu¹, Hu Yuxue¹, Hu Feng³

(1. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang,

Guizhou 550025, China; 2. Institute of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100000, China;

3. Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal distribution pattern and evolution characteristics of ecosystem carbon storage, its response to land use change, and the vulnerability of ecosystem carbon storage service in each county of Guizhou Province were analyzed in order to provide a scientific basis and reference for regional land use management decision-making and to realize the “dual carbon” goal. [Methods] The InVEST model and the potential impact (PI) index were used to analyze the characteristics of carbon stock changes and the vulnerability of ecosystem carbon storage services in Guizhou Province from 2000 to 2020. [Results] ① Land use type in Guizhou Province changed significantly during the last 20 years. 14.10% and 17.29% of the land changed type in the first 10 years and the last 10 years, respectively. Cultivated land was the main source of construction land expansion. ② Ecosystem carbon storage in Guizhou Province decreased by 0.24 billion tons in the past 20 years. Forest land reductions and construction land expansion were the main reasons for carbon

收稿日期: 2022-08-26

修回日期: 2022-10-08

资助项目: 国家自然科学基金委员会—贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目“喀斯特生物多样性形成和维持的钙依赖机制及其应用基础”(U1812401); 贵州省科学技术项目([2017]1131); 贵州省科技支撑项目([2017]2855)

第一作者: 陈大蓉(1996—), 女(布依族), 贵州省贵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息与遥感应用。Email: 1403565563@qq.com。

通信作者: 周旭(1981—), 男(汉族), 四川省古蔺县人, 博士, 副教授, 主要从事遥感水文与流域管理研究。Email: zxy8178@163.com。

storage reduction. ③ All Moran's I indices of ecosystem carbon stocks in Guizhou Province exceeded 0, indicating significant positive spatial correlation and agglomeration. The hot spot/cold-spot analysis showed that the distribution of carbon stock hot spots was relatively decentralized while the distribution of cold spots was centralized and stable. ④ The PI indices for Guizhou Province in the first and second 10-year periods were -1.27 and -0.15 , respectively, indicating an improvement in vulnerability. There were spatial differences in vulnerability among counties, with significant negative effects in the peripheral counties. The vulnerability of 81.82% of the counties decreased in 20 years. [Conclusion] The transfer of forest land and the expansion of construction land in Guizhou Province had a significant impact on carbon stocks and the vulnerability of carbon stock services. In the future, land use structure should be optimized, and planning and management should be strengthened.

Keywords: land use change; carbon stocks; InVEST model; vulnerability; Guizhou Province

陆地生态系统碳汇功能通过光合作用固碳释氧,在全球碳循环和调节大气 CO_2 浓度中发挥重要作用^[1]。研究表明,全球陆地生态系统碳储量为 2 000~2 500 Pg,其中植被碳储量约为 500~600 Pg,0~100 cm 的土壤碳储量是植被的 4 倍,约为 1 500~2 300 Pg^[2-3]。土地利用变化通过改变陆地生态系统的结构和功能,进而影响其碳循环过程^[4]。1980—2010 年,中国因土地利用变化损失了碳储量 279 Tg,表明土地利用变化是驱动陆地生态系统碳储量变化的原因之一^[5]。因此,定量评估土地利用变化与陆地生态系统碳储量之间的关系,对提升区域碳固存能力、促进低碳绿色可持续发展具有重要意义。

目前国内外围绕土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响开展了大量研究,主要研究方法分为:基于实地采样方法和基于模型模拟方法。实地采样方法能提高数据精度,但空间代表性不足,成本高,难以空间量化。为解决上述问题,CEVSA, CASA, InVEST 等模型逐渐被用于估算生态系统碳储量。其中,InVEST 模型具有所需参数少、操作简单便捷、运行速度快、评估结果可视化等优势^[6-7],被国内外学者广泛使用。王天福等^[8]运用 InVEST 模型估算陕西省 1980—2020 年生态工程土地利用结构优化对区域生态系统碳储量提升的影响,并识别了植被碳汇提质增效优先区。虎帅等^[9]基于 InVEST 模型对重庆市 2000—2010 年生态系统碳储量进行评估,结果表明建设用地扩张占用耕地和阔叶林是碳损失的主要原因。一些学者将 InVEST 和 CA-Markov^[10], CLUE-S^[11], PLUS^[12], FLUS^[13] 等模型耦合,探究不同情景下的碳储量,为提高区域生态系统碳储量提供优化途径。贵州省丰富的森林资源、肥沃的土壤条件为固碳提供了基础,但关于贵州省碳储量的研究多集中在局部地区单一生态系统^[14-15],仅有个别学者开展了“三生”空间转型对碳储量的影响研究^[16]。

生态系统脆弱性是指人类—生态系统容易受到或不能应对气候变化或土地利用变化等带来的负面影响导致生态系统服务供给能力下降的程度^[17]。国内学者关于生态系统服务脆弱性的研究多从生态系统服务价值出发^[18],考虑生态系统碳储量变化及其脆弱性的研究为之甚少。同时,不同空间尺度上的土地利用变化对生态系统脆弱性的影响机理与过程不同,分析不同尺度的脆弱性能因地制宜地提出保护和治理措施。在上述分析的基础上,为响应国家碳达峰目标和碳中和愿景,应对土地利用变化带来的气候变化问题,本文选取喀斯特发育强烈,生态环境脆弱,生态系统稳定性较差,易受人类活动影响,生态保护与经济发展存在矛盾的贵州省作为研究对象,引入生态系统服务对土地利用变化的脆弱性评估方法,探明生态系统碳储量时空分布格局和演变特征及对土地利用转移的响应,进一步探究研究区及研究区各县域生态系统碳储量服务的脆弱性,以期为贵州省区域土地利用管理决策及“双碳”目标的实现提供科学依据和参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

贵州省地处中国云贵高原东端 ($103^{\circ}36'$ — $109^{\circ}35'E$, $24^{\circ}37'$ — $29^{\circ}13'N$), 分属长江、珠江两大水系,是“两江”上游重要的生态安全屏障,在国家生态安全战略中具有重要地位。海拔由西向东逐渐降低,地势西高东低,自中部向北、东、南 3 面倾斜。全省地貌以高原、山地、丘陵和盆地为主,其中山地和丘陵占全省面积的 92.5%,是中国唯一一个没有平原的省份。气候为亚热带季风气候,光热资源充沛,降水充足,多年平均气温为 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 $1\ 100\sim 1\ 300\text{ mm}$ 。“十三五”期间,全省累计完成营造林 $1.21\times 10^6\text{ km}^2$,治理石漠化 $5.23\times 10^7\text{ km}^2$,治

理水土流失 $1.34 \times 10^7 \text{ km}^2$, 森林覆盖率达 62.12%。GDP 由 2000 年的 1.03×10^{11} 元增长至 2020 年的 1.78×10^{12} 元, 年均增长率为 14.26%。

1.2 数据来源与处理

本文采用土地利用数据(2000, 2010, 2020 年)来源于全球地表覆盖数据 GlobeLand 30 平台(<http://www.globallancover.com>), 该数据中国范围内的总体精度达 82.39%, 包含耕地、林地等 10 个大类^[19-20]。

依据实际情况以及查阅相关文献重新划分为林地、草地、耕地、水域和建设用地 5 大类, 空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

本文碳密度通过查阅文献借鉴他人的研究结果, 利用已知碳密度进行估算。其中, 优先使用贵州省及周边城市的实测碳密度成果, 并采用碳密度与气温和降水的关系模型修正得到^[21-23]。具体碳密度值见表 1。

表 1 贵州省各土地利用类型碳密度

Table 1 Carbon density of land use type in Guizhou Province

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机质	文献来源
耕地	36.48	6.93	92.50	0	Chuai 等 ^[24] ; 虎帅等 ^[9]
林地	58.27	17.50	173.40	5.48	丁访军等 ^[25]
草地	1.32	1.40	135.00	0	Chuai 等 ^[24] ; 虎帅等 ^[9]
水域	0	0	0	0	李义平等 ^[26]
建设用地	0	0	108.50	0	李义平等 ^[26] ; 虎帅等 ^[9]

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统碳储量估算方法 InVEST(integrated valuation of environment service and tradeoffs)模型是用于评估多种生态系统服务功能的模型, 其 Carbon 模块将生态系统碳储量划分为地上生物碳、地下生物碳、土壤和死亡有机碳 4 个基本碳库^[27]。具体计算公式为:

$$C_i = C_{i, \text{above}} + C_{i, \text{below}} + C_{i, \text{soil}} + C_{i, \text{dead}} \quad (1)$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i \quad (2)$$

式中: i 为第 i 种土地利用类型; C_i 为第 i 种土地利用类型的碳密度(t/hm^2); C_{total} 为生态系统总碳储量(t); $C_{i, \text{above}}$, $C_{i, \text{below}}$, $C_{i, \text{soil}}$ 和 $C_{i, \text{dead}}$ 分别为第 i 种土地利用类型的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度、死亡有机物碳密度(t/hm^2); A_i 为第 i 种土地利用类型的总面积(hm^2)。

1.3.2 生态系统脆弱性评估方法 IPCC 报告指出脆弱性是一个关于暴露、敏感和适应能力的函数, 指一个系统容易受到或不能应对气候变化不利影响的程度^[28]。Schröter 等^[29]随后提出起点脆弱性评估方法将土地利用变化涵盖其中, 拓展了脆弱性的概念。基于 Schröter 提出的起点脆弱性评估方法和 Metzger 等^[30]提出的潜在影响指数(PI), 无量纲度量土地利用变化对生态系统脆弱性^[31]。具体计算公式为:

$$\text{PI} = \frac{C_x - C_y}{C_y} \div \frac{L_x - L_y}{L_y} = \frac{L_x \times (C_y - C_x)}{C_x \times (L_y - L_x)} \quad (3)$$

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (D_i \times P_i) \quad (4)$$

式中: C 为碳储量; L 为土地利用强度; x, y 分别表示期初和期末的年份; D_i 为第 i 级土地利用程度分

级指数; P_i 为第 i 级土地利用类型的面积比例; n 为土地利用程度分级数。本文参考庄大方等^[32]的研究, 将贵州省土地利用指数分为 3 级, 林地、草地、水域为 2, 耕地为 3, 建设用地为 4。

1.3.3 空间异质性分析 空间自相关能有效描述地理现象的空间聚集性, 判断同一区域内变量之间是否存在依赖性。本文基于 Moran's I 指数和 Getis-Ord G_i^* 热点分析模型, 分析贵州省生态系统碳储量空间分布的异质性。Moran's I 指数可表征要素在空间分布的聚类或离散程度, 但不能探测具体的聚集范围和位置; Getis-Ord G_i^* 能准确识别聚集区域的空间分布位置, 弥补 Moran's I 指数在空间布局关系特征分析的不足^[8]。具体计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: n 为要素总数; x_i, x_j 分别为位置 i, j 的碳储量值; \bar{x} 为碳储量的平均值; W_{ij} 是基于固定距离范围建立的空间权重矩阵。Moran's I 取值范围为 $[-1, 1]$, Moran's I 值为正数则表示存在空间正相关关系, 值越高则区域碳储量聚集程度越大; Moran's I 值为负数则表示存在空间负相关关系, 值越低则区域碳储量空间差异越大; Moran's I 值为零值则表示空间上不具有相关性, 区域碳储量随机分布。

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij}(d) X_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (6)$$

式中: W_{ij} 为 i, j 之间的空间权重矩阵; x_i 为 i 的碳

储量值; n 为要素总数。 $G_i^*(d)$ 为正数则表示该空间单元与邻近单元的碳储量值相似, 此时空间聚类(热点或冷点)趋于紧密, $G_i^*(d)$ 为负数则表示该空间单元与邻近单元的碳储量值相异, 此时空间聚类趋于分散, $G_i^*(d)$ 为零值则表示该空间单元与邻近单元的碳储量值呈随机独立分布特征。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空分布特征

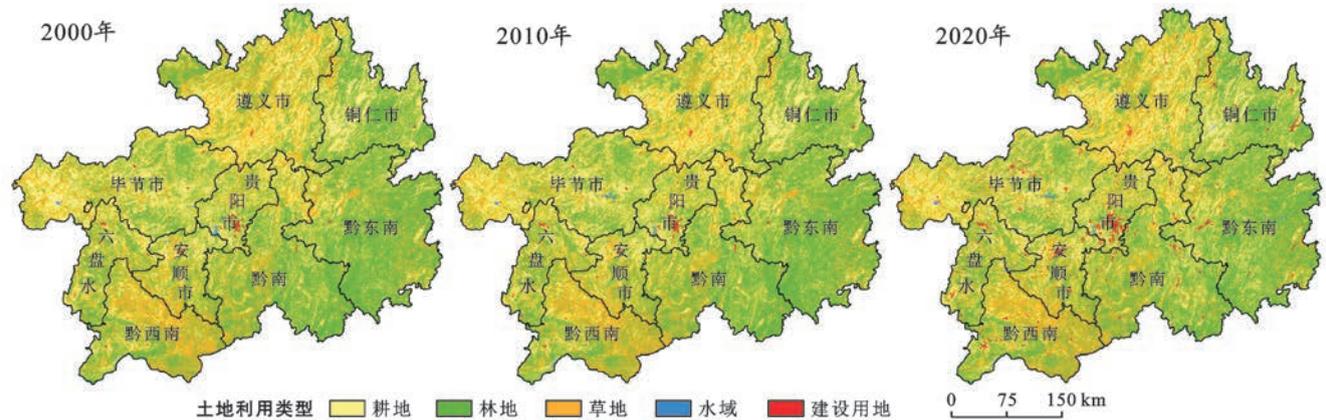
贵州省土地利用空间分布较为稳定, 区域间存在一定差异(图 1)。2000, 2010, 2020 年 3 个时期土地利用类型以耕地、林地和草地为主, 分别占研究区总面积的 34%, 46%, 17% 左右。其中, 林地主要分布在黔东南和黔南, 分别占总林地面积的 25%, 18% 左右; 耕地主要分布在遵义市南部、毕节市东部、黔南北部、铜仁市西部和黔东南西北部, 分别占 21%, 20%, 12%, 12% 和 11%; 草地主要分布在遵义市、黔西南、黔南和毕节市等地区; 水域主要分布于黔东南、毕节市和遵义市; 建设用地主要零散分布于各地级市。

随着社会经济发展对用地需求的增大, 贵州省土地利用结构发生显著变化。20 a 间共有 41 528.68 km²

面积发生变化, 占研究区总面积的 23.59% (表 2)。2000—2020 年建设用地和水域呈扩张趋势, 分别净增加 2 246.40 km², 465.60 km²。其中, 建设用地增幅明显, 建设用地扩张面积是 2000 年的 3 倍, 面积扩张来源主要是耕地, 占建设用地面积扩张的 72.04%, 主要发生在贵阳、遵义和毕节市。水域的扩张来源于耕地、林地和草地, 与贵州省河流治理和水利工程建设密切相关。而耕地、林地和草地均不同程度减少, 分别为 100.67, 1 056.91, 1 554.42 km², 主要为耕地、林地和草地之间的相互转化。

2000—2010 年和 2010—2020 年分别有 14.10%, 17.29% 的土地发生转移, 土地利用类型转移特征总体变化趋势相似, 部分地类具有时段差异性(表 3—4)。其中, 耕地呈先减少后增加的变化趋势, 林地呈先增加后减少的变化趋势, 且林地转入耕地面积大于耕地转入林地的面积。

草地持续减少, 建设用地持续增加, 且呈增加速度最快。2000—2010 年林地、草地和耕地分别向建设用地转移 22.72, 83.92, 135.71 km², 净转入 107.97 km²; 2010—2020 年林地、草地和耕地分别向建设用地转移 367.52, 313.26, 1 538.72 km², 净转入 2 138.43 km²。



注: 本图源于 GlobeLand 30, 并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2019)1822 号标准地图校准制作。下同。

图 1 2000—2020 年贵州省土地利用类型分布

Fig.1 Distribution of land use types in Guizhou Province from 2000 to 2020

表 2 2000—2020 年贵州省土地利用类型转移矩阵

Table 2 Transer matrix of land use type in Guizhou Province from 2000 to 2020

土地利用类型		2020 年面积					变化量
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	
2000 年面积	耕地	47 935.37	5 924.23	3 714.06	264.09	1 618.29	11 520.67
	林地	7 625.92	65 698.46	7 922.30	282.91	390.27	16 221.40
	草地	3 560.09	9 100.52	19 921.43	260.26	372.69	13 293.57
	水域	136.55	119.58	75.48	418.28	13.29	344.91
	建设用地	97.42	20.16	27.31	3.25	535.87	148.14
	变化量	111 419.99	15 164.49	11 739.15	810.51	2 394.54	—

km²

表 3 2000—2010 年贵州省土地利用类型转移矩阵

Table 3 Transer matrix of land use type in Guizhou Province from 2000 to 2010

km²

土地利用类型	2010 年面积					变化量
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	
2000年面积						
耕地	53 254.62	2 997.06	2 973.73	94.92	135.71	6 201.42
林地	3 031.92	73 241.04	5 572.40	51.79	22.72	8 678.82
草地	2 537.56	6 712.04	23 768.10	113.38	83.92	9 446.90
水域	115.20	133.23	100.15	411.65	2.96	351.55
建设用地	84.75	17.80	33.10	1.68	546.67	137.34
变化量	5 769.42	9 860.13	8 679.39	261.77	245.31	—

表 4 2010—2020 年贵州省土地利用类型转移矩阵

Table 4 Transer matrix of land use type in Guizhou Province from 2010 to 2020

km²

土地利用类型	2020 年面积					变化量
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	
2010年面积						
耕地	51 035.63	3 905.76	2 346.70	197.23	1 538.72	7 988.41
林地	5 768.82	70 388.09	6 296.59	280.16	367.52	12 713.08
草地	2 428.23	6 502.76	22 961.60	241.64	313.26	9 485.89
水域	62.85	57.23	39.27	506.47	7.60	166.96
建设用地	59.84	9.11	16.43	3.29	703.32	88.66
变化量	8 319.74	10 474.86	8 698.99	722.32	2 227.09	—

2.2 生态系统碳储量时空变化特征

贵州省 2000, 2010, 2020 年生态系统总碳储量分别为 $3.30 \times 10^9, 3.32 \times 10^9, 3.28 \times 10^9$ t, 平均碳密度分别为 187.63, 188.52, 186.27 t/hm², 呈现先平缓增加后快速下降趋势, 20 a 间碳储量和平均碳密度分别减少 2.40×10^7 t, 1.37 t/hm² (图 2a)。2000—2010 年, 研究区碳储量以平均每年 1.56×10^7 t 的速度缓慢增长, 但是在 2010—2020 年平均每年减少量高达 3.97×10^7 t。2000—2010 年, 贵州陆续开展退耕还林还草、石漠化工程治理等生态恢复工程, 促进碳储量的增加。2010 年以后贵州省经济发展迅速, 工业化和城镇化速度加快, 土地需求增加, 碳密度高的地类被侵占, 碳储量减少。

通过统计贵州省 9 个市州碳储量变化情况

(图 2b) 和碳储量空间分布 (图 3), 发现贵州省生态系统碳储量存在显著的空间异质性。碳储量较高区域主要分布在黔东南一带, 该地区土层较厚, 宜于植被生长, 且城市化水平相对较低。碳储量较低区域主要分布在贵阳市及周边区域, 该地区人类活动频繁, 城市化水平相对较高, 耕地被大量侵占。各市州总碳储量具体表现为: 黔东南 > 遵义市 > 黔南 > 毕节市 > 铜仁市 > 黔西南 > 六盘水 > 安顺市 > 贵阳市, 整体呈现东南高西南低的空间格局。20 a 间, 贵州省 9 个市州生态系统碳储量表现为: 遵义市和铜仁市增加, 其余市州均有所下降 (图 2b)。其中, 遵义市和铜仁市总碳储量分别增加 $1.09 \times 10^7, 1.98 \times 10^6$ t; 黔南、黔东南碳储量损失最多, 分别为 $1.72 \times 10^7, 1.42 \times 10^7$ t; 其余市州碳损失相对较少。

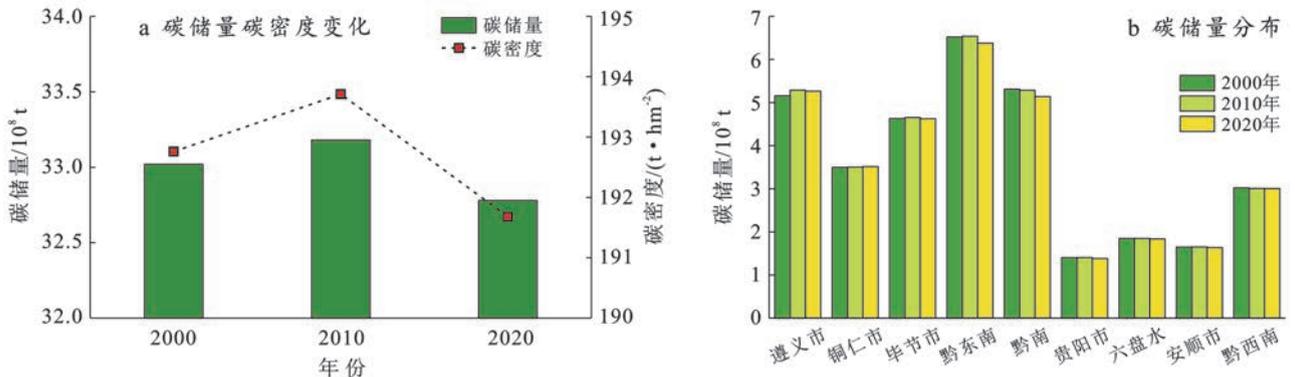


图 2 2000—2020 年贵州省碳储量和碳密度及各市州碳储量变化

Fig.2 Carbon storage and carbon intensity in Guizhou Province and changes in carbon stocks of subregions from 2000 to 2020

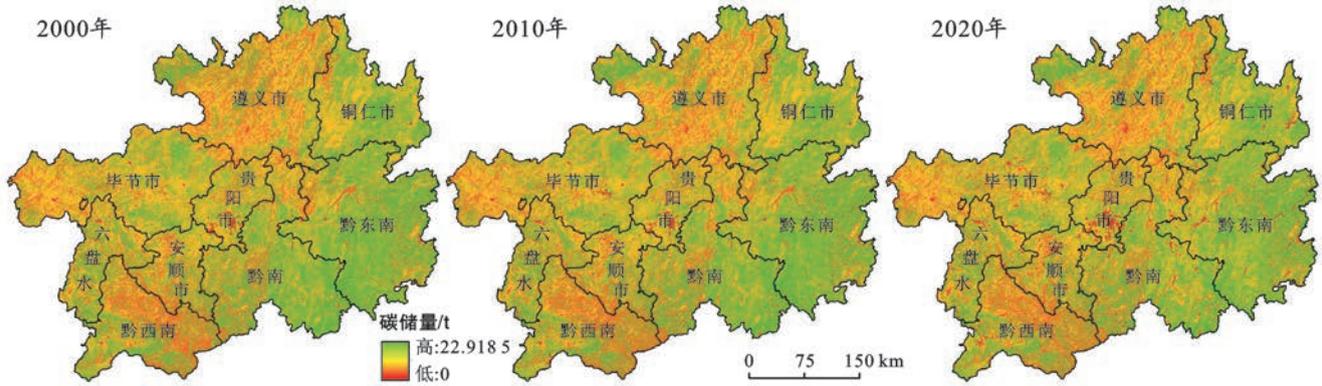


图 3 2000—2020 年贵州省碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon storage in Guizhou Province from 2000 to 2020

2.3 生态系统碳储量空间自相关分析

对碳储量进行全局自相关分析,可验证碳储量的空间集聚和离散规律。从表 5 可知:各期的全局自相关 Moran's I 指数均为正值,分别为 0.431 2, 0.433 1, 0.430 6,说明贵州省生态系统碳储量的空间格局呈正相关,局部空间存在明显的集聚趋势。研究期间, Moran's I 指数先升高后降低,由 2000 年的 0.431 2 下降到 2020 年的 0.430 6,碳储量空间集聚效应有减弱趋势。

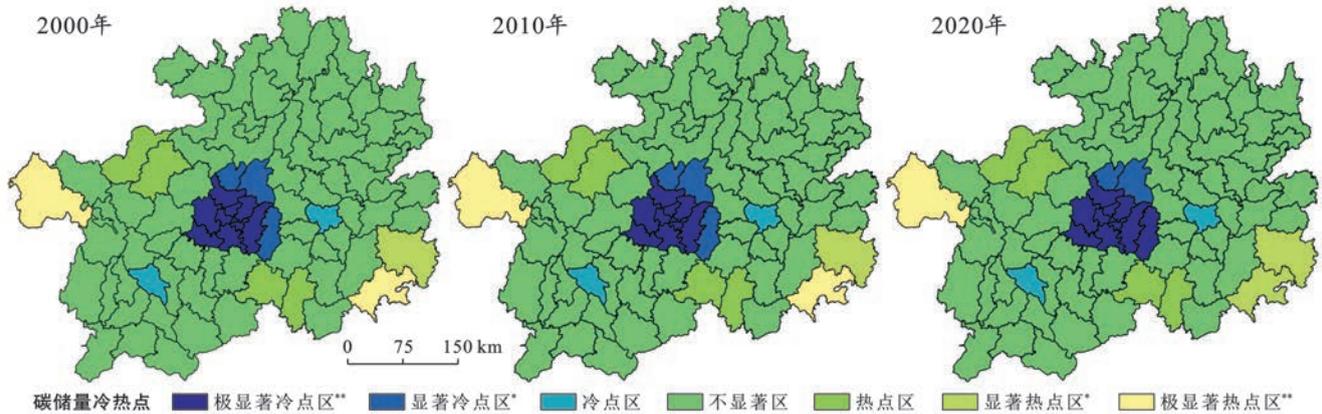
采用 ArcGIS 空间统计的关联指数 Getis-Ord G_i^* 进一步探究贵州省生态系统碳储量空间集聚现象,结果显示贵州省生态系统碳储量具有显著的冷热点效应(图 4)。碳储量热点分布较为分散,极显著热点区分布在从江县和威宁县,从江县 2020 年转为显

著热点区;显著热点区为黎平县,热点区分布在毕节市、大方县、平塘县和独山县,20 a 均未发生变化。碳储量冷点分布集中稳定,呈片状分布在贵阳市及周边县域,零散分布在关岭县和凯里市,除贵定县于 2020 年由显著冷点区转为极显著冷点区外,其他县域 20 a 未发生变化。

表 5 2000—2020 年贵州省碳储量 Moran's I 值

Table 5 Moran's I of carbon storage in Guizhou Province from 2000 to 2020

项目	2000 年	2010 年	2020 年
Moran's I	0.431 2	0.433 1	0.430 6
P	0	0	0
Z	6.672 0	6.702 1	6.663 6



注:贵阳市包括 6 区(南明区、花溪区、云岩区、乌当区、白云区、观山湖区)3 县(开阳县、息烽县、修文县)一市(清镇市)

图 4 2000—2020 年贵州省碳储量冷热点空间分布

Fig.4 Spatial distribution of hot-spots of carbon storage in Guizhou Province from 2000 to 2020

2.4 生态系统碳储量对土地利用变化的响应

由表 6 可知,不同时期各土地利用类型的碳储量发生一定变化。具体而言,林地是贵州省生态系统碳储量的主要贡献者,贡献率达 60% 以上;耕地贡献率次之,接近 23%;草地贡献率在 12% 左右;建设用地的贡献率不足 1%。2000—2010 年,林地和建设

用地碳储量分别增加 3.00×10^7 , 1.00×10^6 t,耕地和草地碳储量分别减少 6.00×10^6 , 1.00×10^7 t,总碳储量增加 1.60×10^7 t。2010—2020 年,林地和草地碳储量分别减少 5.70×10^7 , 1.00×10^7 t,耕地和建设用地分别增加 4.00×10^6 , 2.30×10^7 t,总碳储量减少 4.00×10^7 t。

表 6 2000—2020 年贵州省不同土地利用类型碳储量
Table 6 Carbon storage of different land use types in Guizhou Province from 2000 to 2020

时段	碳储量/ 10^8 t				
	耕地	林地	草地	建设用地	总计
2000 年	7.78	20.86	4.31	0.07	33.02
2010 年	7.72	21.16	4.21	0.09	33.18
2020 年	7.77	20.59	4.11	0.32	32.78
2000—2010 年	-0.06	0.3	-0.10	0.02	0.16
2010—2020 年	0.04	-0.57	-0.10	0.23	-0.40
2000—2020 年	-0.01	-0.27	-0.20	0.25	-0.24

根据碳储量转移矩阵分析碳储量对不同土地利用类型的响应(表 7)。从土地利用的转出来看,林地

表 7 2000—2020 年贵州省碳储量转移矩阵

Table 7 Transer matrix of carbon storage in Guizhou Province from 2000 to 2020

10^8 t

土地利用类型	2020 年碳储量					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	变化量
耕地	0	0.733 5	-0.004 0	-0.034 6	-0.036 1	0.658 8
林地	-9.442 0	0	-0.989 4	-0.072 0	-0.057 0	-10.560 4
草地	0.003 8	1.136 6	0	-0.033 8	-0.007 9	1.098 7
水域	0.017 9	0.030 5	0.009 8	0	0.001 4	0.059 6
建设用地	0.002 2	0.002 9	0.000 6	-0.000 4	0	0.005 4
变化量	-9.418 1	1.903 5	-0.983 0	-0.140 8	-0.099 6	—

2.5 生态系统碳储量服务的脆弱性评估

本文分别从省、县两个空间尺度评价研究区生态系统碳储量服务的脆弱性。从表 8 可以看出,2000, 2010, 2020 年土地利用强度分别为 234.55, 234.43, 237.05, 呈现先减弱后增强的变化趋势, 20 a 间提高 3.5。2000—2010 年和 2010—2020 年的潜在影响指数(PI)分别为 -1.27, -0.15, 均表现为负面潜在影响, 但土地利用变化对碳存储服务负面影响是减弱的。

以县域单元来看(图 5), 2000—2020 年不同县域土地利用变化对研究区生态系统碳储存服务产生的

的转出减少碳储量 1.06×10^9 t, 主要由林地向耕地、草地转出, 分别减少 9.44×10^8 , 9.89×10^7 t。

从土地利用的转入来看, 不同土地利用类型表现为: 向林地的转入使碳储量减少 1.98×10^8 t, 主要损失来源有草地和耕地, 分别为 1.14×10^8 , 7.34×10^7 t。其次是向耕地的转入, 共减少碳储量 9.42×10^8 t。此外, 建设用地的转入使碳储量减少 9.96×10^6 t, 主要是来源于林地和耕地, 而建设用地的碳密度低于林地和耕地, 致碳储量减少。可以看出, 碳储量的减少主要与林地面积的缩减和建设用地的扩张相关。

影响主要分布在贵州省边缘县域。2000—2010 年威宁县负向影响最显著, PI 为 -11.65, 其次是黔西县和云岩区, PI 分别为 -9.01, -6.61; 正向影响最显著的是观山湖, PI 高达 14.91, 其次是仁怀市和凯里市, PI 分别为 7.35, 6.18。2010—2020 年天柱县负向影响最显著, 其次是松桃县和锦屏县, PI 分别为 -21.30, 7.56, 6.49; 正向影响最显著的是晴隆县, PI 为 14.66。从 2000—2010 年及 2020 年各县域 PI 均发生不同程度变化, 呈增强趋势的县有 16 个, 减弱的有 72 个, 比例达 81.82%, 但减弱幅度并不大, 严控建设用地规模扩张可以有效提高其脆弱性。

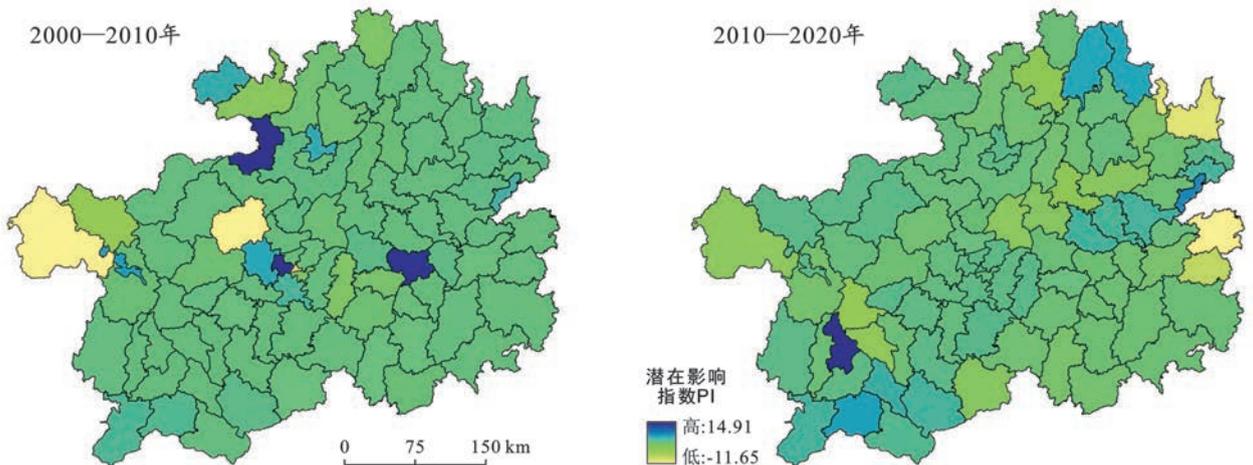


图 5 2000—2020 年贵州省各县域生态系统碳储存服务脆弱性

Fig.5 Vulnerability of ecosystem carbon storage seivices at county scale in Guizhou Provice from 2000 to 2020

表 8 土地利用变化对贵州省碳储备能力的潜在影响

Table 8 Potential impact of land use change on carbon storage capacity in Guizhou Province

年份	土地利用强度指数	土地利用强度变化	总碳储量/ 10^8 t	总碳储量变化/ 10^8 t	PI
2000	234.55	—	33.02	—	—
2010	234.43	-0.12	33.18	0.16	-1.27
2020	237.05	2.62	32.78	-0.40	-0.15

注:PI<0,负面潜在影响;PI=0,无潜在影响;PI>0,正面潜在影响。

3 讨论

研究结果表明贵州省生态系统碳储量变化特征与土地利用变化相吻合,具有高度一致性。贵州省生态系统碳储量在 2010 年后显著下降,这与陈美景等^[16]研究结果较为一致。2010—2020 年建设用地急剧扩张,扩张面积是 2000 年的 3 倍。这是由于人口的持续增长和对美好生活的需要,加大人类活动强度,建设用地扩张侵占耕地,林地转为其他用地,使生态环境有负向发展的态势^[32]。

2000 年开始,贵州省天然林保护、退耕还林还草、珠江防护林建设、长江防护林建设、石漠化综合治理、水土流失综合治理等重大生态工程的持续实施,促进生态环境得到有效改善。其中,遵义、铜仁市的生态项目工程使植被改善,碳储量增加;而黔南、黔东南碳储量损失最多,该区域虽实施相应的生态工程,在人类活动加强的作用下,植被呈退化趋势,这与张继等^[33]研究结果较为一致。可见,林地发挥着重要的碳汇作用,林地的转入表现出强烈的碳汇效应,林地的转出将降低区域碳吸收能力。因此,未来贵州省应继续实施和巩固生态工程的建设,进一步发挥退耕还林还草、天然林等的积极作用,促使建设用地向林地、耕地转变,在维持林地生态系统固碳能力的前提下,不断增加其规模,以整体稳定,逐渐增强的趋势提升固碳增汇能力。

近 20 a 贵州省生态系统碳储存服务脆弱性在省尺度上表现出负面潜在影响,县尺度上有所差异。2000—2010 年,贵州省耕地转为建设用地造成碳损失,且反映土地利用强度的建设用地占比较少,两种综合作用导致生态系统碳储量服务脆弱性恶化。2010—2020 年,工业化城镇化进程加快,基础设施建设对用地的需求,大量的耕地、林地向建设用地转入,在土地利用强度增加的同时造成碳损失。显然,从生态系统碳储量脆弱性结果可知,增加耕地、林地的比例和集中布局工业用地、住宅用地来缓解土地利用强度的加剧,同时提高林地、耕地的碳汇能力,降低生态系统碳储存服务的脆弱性。

本文碳密度值来源于已有文献资料,但不同地区受气温、降水、地形、人类活动等因素的综合影响,碳密度存在区域分异特征。虽然采用降水和气温数据进行修正,与实测数据相比仍存在误差。其次,采用 InVEST 模型计算碳储量时,土地利用变化是唯一的变量,没有考虑碳密度的年际变化。另外,土地利用数据来源于 GlobeLand,受解译人员主观性,解译精度难以保证。因此,未来的研究中,通过实地监测获得更精准的碳密度数据,使用高分辨率遥感数据及提高解译精度等提高碳储量估算精度。

4 结论

本文以贵州省为研究区,将土地利用数据与 InVEST 模型结合起来,分析 2000,2010,2020 年的生态系统碳储量变化和碳储量对土地利用转移的响应,并通过潜在影响指数从省、县尺度评估碳储量服务的脆弱性。

(1) 贵州省土地利用类型以耕地、林地和草地为主,2000—2020 年土地利用结构发生显著变化,前 10 a 和后 10 a 分别有 14.10%,17.29% 的土地发生转移,后 10 a 转移更加剧烈。其中,建设用地和水域呈扩张趋势,耕地、林地和草地均不同程度减少,74.02% 的建设用地由耕地转入。

(2) 贵州省 2000—2020 年生态系统碳储量减少 2.40×10^7 t,林地面积的缩减和建设用地的扩张是碳储量减少的主导因素。生态系统碳储量存在显著的空间异质性,碳储量较高地区集中在黔东南一带,贵阳市及周边碳储量最少。

(3) 2000—2020 年贵州省生态系统碳储量的全局 Moran's *I* 指数均大于 0,表明生态系统碳储量空间分布具有显著的空间正相关性和集聚性。冷热点分析发现,整体空间分布显示碳储量热点分布较为分散,冷点分布集中稳定,且热点区减少,冷点区变化不大。

(4) 贵州省 2000—2010 年和 2010—2020 年的 PI 指数分别为 -1.27 和 -0.15,生态系统碳储量服务脆弱性均呈负向影响,相对前 10 a,后 10 a 脆弱性有所改善。县域间脆弱性存在空间差异,边缘县域负向影响显著,20 a 间 81.82% 的县脆弱性降低。

[参 考 文 献]

- [1] Lu Fei, Hu Huifeng, Sun Wenjuan, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16):4039-4044.
- [2] Watson R T, Change I P O C. Land use, land-use

- change, and forestry: A special report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [3] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65 (1):10-21.
- [4] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(2):189-204.
- [5] Zhang Mei, Huang Xianjin, Chuai Xiaowei, et al. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A spatial-temporal perspective [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:10233.
- [6] Kondo M, Ichii K, Patra P K, et al. Land use change and El Niño-Southern Oscillation drive decadal carbon balance shifts in Southeast Asia [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1):1154.
- [7] 柳嘉佳, 王普昶, 王志伟, 等. 基于 InVEST 模型的贵州喀斯特生态系统服务功能评估研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(20):25-27.
- [8] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5):1214-1232.
- [9] 虎帅, 张学儒, 官冬杰. 基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25 (3):323-331.
- [10] Zhu Guofeng, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127:107770.
- [11] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(1):360-373.
- [12] Wang Zhuo, Zeng Jie, Chen Wanxu. Impact of urban expansion on carbon storage under multi-scenario simulations in Wuhan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29 (30): 45507-45526.
- [13] Li Jingye, Gong Jian, Guldman J M, et al. Carbon dynamics in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau from 1990 to 2030 using land sat land use/cover change data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3):528.
- [14] 丁访军, 高艳平, 周凤娇, 等. 贵州西部 4 种林型土壤有机碳及其剖面分布特征[J]. *生态环境学报*, 2012, 21 (1):38-43.
- [15] 惠辽辽, 邵景安, 慈恩, 等. 近 30 a 贵州遵义县农田土壤有机碳动态及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(4):653-665.
- [16] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应: 以贵州省为例[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(11):101-111.
- [17] 刘金龙, 马程, 王阳, 等. 基于径向基函数网络的京津冀地区生态系统服务脆弱性评估[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6):1040-1046.
- [18] 黄静, 崔胜辉, 李方一, 等. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性[J]. *生态学报*, 2011, 31(24):7441-7449.
- [19] Chen Jun, Chen Jin, Liao Anping, et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103:7-27.
- [20] Yang Yongke. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125:156-173.
- [21] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配[J]. *生态学报*, 2007, 27(12):5148-5157.
- [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] Alam S A. 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.
- [24] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25:50-61.
- [25] 丁访军, 潘忠松, 吴鹏, 等. 贵州东部常绿落叶阔叶混交林碳素积累及其分配特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(6): 1761-1768.
- [26] 李义平, 蔡宏, 田鹏举, 等. 贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2):92-99.
- [27] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. *地理学报*, 2019, 74(3):446-459.
- [28] McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, et al. IPCC. 2001: Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(10):1285-1285.
- [29] Schröter D, Cramer W, Leemans R, et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe [J]. *Science*, 2005, 310(5752):1333-1337.
- [30] Metzger M J. The vulnerability of ecosystem services to land use change [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1):69-85.
- [31] 汪瑞, 何如海, 栾倩, 等. 滁州市陆地生态系统土壤碳储量对土地利用变化响应[J]. *国土与自然资源研究*, 2015 (3):7-11.
- [32] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2):105-111.
- [33] 张继, 周旭, 蒋啸, 等. 生态工程建设背景下贵州高原的植被变化及影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7):1623-1633.