

黔中城市群碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性

万海峰¹, 蒙友波¹, 陈洋¹, 赵祖伦², 罗洁琼³, 张朝睿⁴

(1.贵州省自然资源勘测规划研究院, 贵州 贵阳 550001; 2.贵州科学院 贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001; 3.南通大学 交通与土木工程学院, 江苏 南通 226019; 4.北京世纪国源科技股份有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 探究土地利用/覆被变化对区域生态系统碳储量及生态系统脆弱性的影响, 以为区域绿色低碳和生态系统的可持续发展提供参考依据。[方法] 以 2000, 2010, 2020 年黔中城市群核心经济区 3 期土地利用/覆被数据为基础, 运用 InVEST 模型和土地利用转移矩阵定量分析生态系统碳储量及其空间分布格局, 并采用潜在影响指数(PI)对区域生态系统服务脆弱性进行评估。[结果] ①2000—2020 年, 黔中城市群核心经济区土地利用/覆被变化总体表现为耕地和林地持续下降, 建设用地持续上升。研究区土地利用/覆被转移主要表现为耕地、林地、草地向其他地类的转移, 其中, 2000—2010, 2010—2020 年分别有 3 339.35, 3 669.15 km² 土地发生了转移, 前者林地转为草地是主要转移类型, 后者耕地转为建设用地为主要转移类型。②2000—2020 年区域的碳储量表现为减少趋势, 由 4.42×10^7 t 减小到 4.33×10^7 t, 累计减小 9.40×10^5 t, 林地转为草地是引起碳储量减少的主要原因。各年度碳储量密度均呈现西部、东部高, 中部低的分布态势; 20 a 间, 高密度区未发生明显变化, 低密度区表现为由中心区域向外围扩散。③2000—2020 年黔中城市群核心经济区主要扮演碳源的角色, 土地利用程度指数增加了 2.83, PI 指数分别为 -0.04, -0.31, 均表现为负面潜在影响, 且脆弱性不断增强。[结论] 增加林地、控制林地转为其他用地及建设用地扩张是促进区域绿色低碳和生态系统的稳定可持续发展的重要手段。

关键词: InVEST 模型; 土地利用/覆被变化; 碳储量; 脆弱性; 黔中城市群

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0443-10

中图分类号: X171.1

文献参数: 万海峰, 蒙友波, 陈洋, 等. 黔中城市群碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 443-452. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.043; Wan Haifeng, Meng Youbo, Chen Yang, et al. Response of carbon storage to land use/cover changes and vulnerability for Central Guizhou urban agglomeration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 443-452.

Response of Carbon Storage to Land Use/Cover Changes and Vulnerability for Central Guizhou Urban Agglomeration

Wan Haifeng¹, Meng Youbo¹, Chen Yang¹, Zhao Zulun², Luo Jieqiong³, Zhang Zhaorui⁴

(1. Guizhou Institute of Natural Resources Survey and Planning Research, Guiyang, Guizhou

550001, China; 2. Guizhou Academy of Sciences, Institute of Mountain Resources of Guizhou Province,

Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. School of Transportation & Civil Engineering, Nantong University,

Nantong, Jiangsu 226019, China; 4. Beijing Century Guoyuan Technology Co., Ltd, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The impacts of land use/cover changes on carbon storage and ecosystem vulnerability in regional ecosystems were determined in order to provide a reference for regional green low-carbon and sustainable development of ecosystems. [Methods] The ecosystem carbon storage and its spatial distribution pattern were quantitatively analyzed by using land use/cover data for the core economic zone of the Central Guizhou urban agglomeration in 2000, 2010, and 2020 with the InVEST model and a land use transfer

收稿日期: 2023-01-18

修回日期: 2023-09-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“可持续发展视角下沿海城市人居环境时空演变与影响因素研究”(42001239); 贵州省科技计划项目“喀斯特山地城市空间扩展生态环境效应及优化模式研究”(黔科合基础-ZK[2022]一般 277)

第一作者: 万海峰(1985—), 男(布依族), 贵州省长顺县人, 工程师, 本科, 主要从事自然资源调查与监测工作。Email: 87932962@qq.com。

通信作者: 陈洋(1982—), 男(侗族), 贵州省凯里市人, 高级工程师, 本科, 主要从事自然资源调查、监测和规划等工作。Email: 365242960@qq.com。

matrix. A potential impact index (PI) was used to assess the vulnerability of regional ecosystem services. [Results] ① Land use/cover changes in the core economic zone of the Central Guizhou urban agglomeration showed that cultivated land and forest land continued to decline from 2000 to 2020, and construction land continued to increase. Land use/cover changes in the study area were mainly manifested as the transfer of cultivated land, forest land, and grassland to other land use types, among which 3 339.35 and 3 669.15 km² of land were transferred from 2000 to 2010 and 2010 to 2020, respectively. The conversion of forest land to grassland was the main transfer type during the first period, and the conversion of arable land to construction land was the main transfer type in the second period. ② Regional carbon storage decreased from 2000 to 2020 (from 4.42×10^7 to 4.33×10^7 t), with a cumulative decrease of 9.40×10^5 t. The conversion of forest land to grassland was the main reason for the reduction in carbon storage. The carbon storage density in each year was higher in the west and east, and lower in the middle portion of the study area. There was no significant change in the high density area during the past 20 years, while the low density area spreading from the central area to the periphery. ③ The core economic zone of the Central Guizhou urban agglomeration was the main source of carbon from 2000 to 2020, with the land use degree index increasing by 2.83, and PI index being -0.04 and -0.31, respectively, showing negative potential impact and increasing vulnerability. [Conclusion] Increasing forest land, controlling forest land conversion to other uses, and expanding construction land are important means for promoting regional green, low-carbon, stable, and sustainable development of ecosystems.

Keywords: InVEST model; land use/cover change; carbon storage; vulnerability; Central Guizhou urban agglomeration

近年来全球气候不断变化,温室效应问题突出,“碳排放”“碳减排”等问题引起越来越多的关注^[1-2]。陆地生态系统因地表分布的大量固碳单元在吸收 CO₂,调节气候变化方面起着关键作用^[3],而土地覆被变化是影响陆地生态系统碳储量和碳循环的重要因素,通过转换地表覆被类型进而影响对二氧化碳的释放和吸收^[4-5],每年因土地覆被变化约有 4.03×10^9 t 被排放到大气中^[6]。随着中国城市化和工业化的快速发展,森林和草地资源破坏、城市扩张等人类活动使得土地覆被受到不同程度的影响,碳排放量显著增加,目前碳排放量占全球的 28%^[7],陆地生态系统碳储量达到 1.00×10^{11} t^[8],在维持全球碳平衡方面具有重要意义。

近年来,国内外学者针对土地利用/覆盖变化与碳储量的关系展开了积极的研究,如段璇瑜等^[9]运用 ArcGIS 与 InVEST 模型对海南岛海岸带土地利用变化与碳储量的关系进行研究,认为建设用地的大肆扩张及林地退化是导致碳储量下降的重要原因;李姣等^[10]研究了洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响,认为农田、林地的减少和建设用地的增加是导致其碳储量减少的主要原因;刘亚男等^[11]基于 GIS 估算法发现湿地转为耕地和建设用地是导致中国湿地碳流失的重要原因。但以往研究大多集中于海岸带、湿地等重要生态保护区,对于喀斯特地区的研究相对较少。此前,蔡广鹏等^[12]以绥阳县为例,探讨了土地利用/覆被变化对陆地植被碳储量的影响;

罗丹等^[13]以流域为例,探讨了喀斯特地区土地利用变化对碳储量时空分布的影响;李月等^[14]以普定县为例探讨了喀斯特地区建设用地扩张对碳储量变化的影响。但是这些研究多以流域或区县为例,而对于喀斯特地区城市群的研究鲜有报道。此外,以往研究大多注重探讨地类转换引起碳储量变化,忽视了碳储量对土地利用变化脆弱性的研究。碳储存服务作为生态系统服务的重要组成部分之一,研究其变化及脆弱性对缓解生态系统服务损失及退化有着重要意义^[15],而对于生态环境脆弱的喀斯特地区,研究其变化及脆弱性显得尤为重要。

黔中城市群是中国西部典型的山地城市群,喀斯特地貌发育典型,生态环境脆弱。同时也是国家实施新型城镇化、长江经济带和西部大开发战略的重点区域,其核心经济区是带动黔中城市群及贵州发展的核心增长极,也是贵州省实施工业强省和城镇化带动主战略的重要支撑。随着区域城市化进程不断加快,建设用地不断扩张,导致土地利用变化剧烈,严重影响了区域生态系统服务能力。因此,本文以 2000, 2010, 2020 年 3 期土地覆被数据为数据源,基于 InVEST 模型分析该区域的碳储量变化,采用生态系统脆弱性评估方法,深入分析黔中城市群核心经济区土地利用变化对碳储量变化的响应以及生态系统服务脆弱性,以期为该区域绿色低碳发展和生态系统的可持续发展提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔中城市群位于贵州省中部,其核心经济区覆盖贵州省4个市州的15个县区,包括:贵阳市主城区、清镇市、修文县、开阳县、息烽县、镇宁县、安顺市西秀区、平坝区、黔西市、织金县、普定县、贵定县、长顺县、龙里县、惠水县,总面积约 $2.61\times 10^4\text{ km}^2$,坐标范围为 $105^{\circ}20'0''\text{--}107^{\circ}25'0''\text{E}$, $25^{\circ}22'0''\text{--}27^{\circ}25'0''\text{N}$ (图1)。地貌以岩溶高原为主,地势自西向东递减,喀斯特地貌发育强烈,生态敏感且脆弱,山坡陡峻,土层浅薄,水土流失和石漠化问题严重^[16]。全区气候温暖湿润,大部分属亚热带湿润季风气候,平均温度为 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[17]。随着国家级新区贵安新区的建设发展以及贵州强省会意见的实施,区域建设活动强烈,复杂的生态环境与土地利用变化的耦合关系,对区域的碳储量及生态系统服务影响更大。

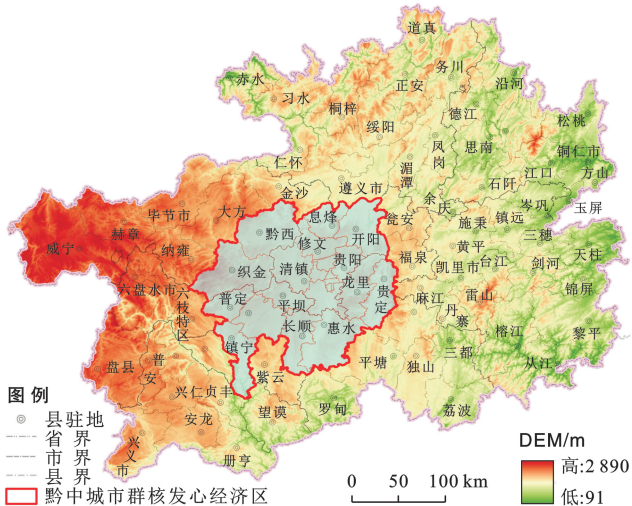


图1 黔中城市群核心经济区位置及地形

Fig.1 Topography and location in core economic zone of Central Guizhou urban agglomeration

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 土地覆被数据 土地覆被数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>) GlobeLand 30 数据集。该数据集包含11个主要的地表覆盖类型,分别是耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水域、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪。根据黔中城市群核心区的实际土地利用情况,研究区仅有耕地、林地、草地、灌木林地、水域和建设用地6类用地类型。

1.2.2 碳密度数据 高精度的碳密度数据可较为准确地估算区域的碳储量,由于前期对于研究区域的土地覆被类型的碳密度实测数据较少,本文主要参考前

人在该区域的碳密度实测和喀斯特地区的碳储量研究成果^[18-20],具体数值见表1。

表1 黔中城市群核心经济区不同土地覆盖类型碳密度参数

Table 1 Carbon density parameters of different land cover types in core economic zone of Central Guizhou urban agglomeration t/hm^2

土地覆盖类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤有机质碳密度	死亡有机质碳密度
耕地	3.29	0.59	109.68	0.00
林地	20.36	67.50	170.00	7.80
草地	0.82	0.87	89.02	0.00
灌木林地	26.60	67.50	94.00	0.00
水域	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00

1.3 研究方法

1.3.1 碳储量估算方法 InVEST 模型能够模拟不同土地利用/覆被情景下生态系统服务物质质量的变化^[21]。本文使用 InVEST 软件中的 Carbon 模型使用土地覆盖类型地图和4个碳库(地上生物量、地下生物量、土壤、死有机物)的碳储量来估算在当前景观下碳储量或一个时间段内的碳固持。计算公式为:

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

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

式中: i 表示第 i 种地类; C_i 为第 i 种地类的碳密度(t/hm^2); $C_{i,above}$ 、 $C_{i,below}$ 、 $C_{i,soil}$ 和 $C_{i,dead}$ 分别表示第 i 种地类下的地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、土壤有机质碳密度和死亡有机质碳密度(t/hm^2); $C_{\text{总}}$ 为研究区总碳储量(t); S_i 为第 i 类地类面积(hm^2); n 为地类种类数量。

1.3.2 土地利用程度综合指数 土地利用程度指数可定量分析土地利用在不同阶段上的开发程度,同时反映人类活动和自然环境的相互作用,其计算公式为^[22]:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (D_i \times S_i), L \in [100, 400] \quad (3)$$

式中: L 表示土地利用程度指数; D_i 表示第 i 级土地利用程度分级指数; S_i 为第 i 级土地利用面积占比; n 为土地利用程度分级数,分级标准参照刘纪远^[23]的相关研究,并结合研究区土地利用情况,将其分为4级,其中建设用地为4,耕地为3,林地、灌木林地、草地和水域为2。

1.3.3 生态系统脆弱性评估方法 基于 Schroter 等^[24]人拓展的起点脆弱性研究评估方法,将土地利用程度纳入评估系统中,采用 Metager 等^[25]提出的生态系统服务脆弱性量化方法(潜在影响指数,PI)来进行生态系统服务中碳储存服务脆弱性的度量,计算

公式为^[26]：

$$PI=\frac{\Delta C}{\Delta L}$$

(4)

式中:PI 为潜在影响指数;ΔC 为碳储量变化量;ΔL 为土地利用程度综合指数变化量。

2 结果与分析

2.1 土地利用/覆被时空变化特征

2.1.1 土地利用/覆被变化整体情况 由表 2 和图 2 可看出,2000—2020 年黔中城市群核心经济区土地利用/覆被以耕地和林地为主,两者面积之和分别占各年度土地总面积的 80.01%,79.56%,77.56%,且两者在此期间其面积均在减少,2000—2020 年分别减少 526.53,114.37 km²,从空间分布看,减少部分主要位于核心经济区西部、南部和中部,且大部分区域为建设用地增加区域。其次分布较多的为草地,主要分布于核心经济区的西部、西南部、东部和东南部,各年度占比均在 15.50%左右,2000—2020 年,其面积表现为先增加后减少,但总体看,减少了 62.09 km²,减少部分主要位于核心经济区西部。

灌木林地次之,主要分布于核心经济区西部和中部地区,各年度占比均在 2.70%左右,与草地相同,其

面积在 2000—2020 年表现为先增加后减少,但最终增加了 5.00 km²。

建设用地面积虽分布较少,但在 2000—2020 年其一直保持增长的趋势,所占比例由 1.00%增长到 3.42%,在 2010—2020 年增幅达到最大,为 215.90%,致使最终面积增加 633.10 km²,从空间分布看,变化最为明显的位于安顺至贵阳以及贵阳至惠水沿线,这与贵阳的城市发展规划(贵安新区)以及经济发展的范围一致,也从侧面表明 2000—2020 年黔中核心经济区城市化进程在不断加快。

水域面积分布最少,各年度占比均不到 1.00%,2000—2020 年表现为先减少后增加,最终面积增加 64.88 km²。从空间分布看,变化最为明显的位于织金县北部,为黔中水利枢纽工程的源头——平寨水库,该工程从织金开始,途经普定县、安顺市至贵阳市,修建了一系列梯度电站,使得水域面积增加。

综上所述,2000—2020 年,耕地和林地表现为持续下降,建设用地呈持续上升趋势,且建设用地增加区域与耕地、林地减少区域高度重叠,草地和灌木林地均表现为先增加后减少,但草地最终表现为减少,灌木林地则表现为增加,水域表现为先减少后增加,但最终呈增加趋势。

表 2 黔中城市群核心经济区土地利用现状
Table 2 Current situation of land cover in core economic zone of Central Guizhou urban agglomeration

土地覆被类型	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2010 年 面积变化/km ²	2010—2020 年 面积变化/km ²
	面积/km ²	所占比例/%	面积/km ²	所占比例/%	面积/km ²	所占比例/%		
耕地	10 674.52	40.86	10 569.27	40.46	10 147.99	38.84	−105.25	−421.28
林地	10 229.74	39.15	10 218.03	39.11	10 115.38	38.72	−11.71	−102.66
草地	4 089.08	15.65	4 154.95	15.90	4 026.99	15.41	65.87	−127.96
灌木林地	698.58	2.67	744.81	2.85	703.58	2.69	46.23	−41.23
水域	175.63	0.67	157.88	0.60	240.51	0.92	17.75	82.64
建设用地	260.15	1.00	282.76	1.08	893.25	3.42	22.61	610.49



图 2 黔中城市群核心经济区 2000—2020 年土地利用类型分布
Fig.2 Districition of land use types in core economic zone of Central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2020

2.1.2 土地利用转移矩阵分析 根据土地利用转移矩阵来看(表 3 和表 4),2000—2010 年黔中城市群核心经济区共有 3 339.35 km²土地发生了转移,占区域面积的 12.78%。其中,林地为主要的转出者,转出面积为 1 110.04 km²,占转出面积的 33.24%,主要转向草地,面积为 638.38 km²,其次为向耕地的转移,面积为 353.67 km²。另外转出面积较多的为草地,为 1 030.68 km²,占转出总面积的 30.86%,主要转为林地和耕地。耕地的转出面积为 870.95 km²,占转出总

面积的 26.08%,主要转向林地和草地。灌木林地、水域和建设用地的转出面积分别为 222.47,85.73,19.48 km²,分别占转出面积的 6.66%,2.57%和 0.58%,其主要转向耕地、林地和草地。从转入情况来看,转入面积表现为:林地>草地>耕地>灌木林地>水域>建设用地,其中,建设用地转入来源主要为耕地和草地。由此可见,该地区 2000—2010 年土地利用变化主要表现为耕地、林地、草地向其他地类转移,其中林地转为草地是主要的转移类型。

表 3 黔中城市群核心经济区 2000—2010 年土地利用转移矩阵
Table 3 Stochastic matrix of land cover in core economic zone of Central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2010

项 目		2010 年面积					
		耕 地	林 地	草 地	灌木林地	水 域	建设用地
2000 年面积	耕 地	9 803.57	411.24	338.06	79.34	26.03	16.28
	林 地	353.67	9 119.70	638.38	104.50	9.46	4.03
	草 地	343.14	564.31	3 058.40	75.79	28.61	18.83
	灌木林地	47.52	98.96	70.03	476.11	3.47	2.49
	水 域	11.33	21.99	44.23	7.72	89.90	0.46
	建设用地	10.04	1.83	5.85	1.35	0.41	240.67

2010—2020 年,黔中城市群核心经济区共有 3 669.15 km²土地发生了转移,相较于前 10 a 增加了 329.80 km²。主要转出地类发生了变化,地类由林地变为耕地,耕地的转出面积为 1 207.93 km²,占转出面积的 32.92%。主要表现为耕地向建设用地转移,转出面积为 439.79 km²,占耕地转出面积的 36.41%;其次转为林地,面积为 415.83 km²。林地次之,转出面积为 1 139.27 km²,占转出面积的 31.05%。草地的转出面积为 1 042.66 km²,占转出总面积的 28.42%。灌木林地和建设用地与前 10 a 相比未见明

显变化。水域的转出面积较前 10 a 减少了近 4.7 倍,减少了 67.31 km²。从转入量来看,转入面积表现为:林地>草地>耕地>建设用地>灌木林地>水域,与 2000—2010 年相比,建设用地转入量显著增加,增加了 589.32 km²,约为前 10 a 转入量的 15 倍,主要为耕地的转入,占总转入面积的 69.65%,其次为草地转入,占总量的 13.67。由此看出,该地区 2010—2020 年土地利用变化主要表现耕地、林地、草地间相互转移或向其他地类转移,其中耕地转为建设用地是主要的转移类型。

表 4 2010—2020 年黔中城市群核心经济区土地利用转移矩阵
Table 4 Stochastic matrix of land cover in core economic zone of Central Guizhou urban agglomeration from 2010 to 2020

项 目		2020 年面积					
		耕 地	林 地	草 地	灌木林地	水 域	建设用地
2010 年面积	耕 地	9 361.34	415.83	283.65	41.90	26.76	439.79
	林 地	397.23	9 078.76	554.45	90.89	27.41	69.29
	草 地	325.53	524.86	3 112.29	64.35	41.60	86.32
	灌木林地	47.16	87.98	64.40	504.85	4.97	35.45
	水 域	2.22	5.56	9.03	1.05	139.46	0.56
	建设用地	14.51	2.38	3.17	0.54	0.31	261.85

2.2 碳储量时空变化特征

运用 InVEST 模型中的 Carbon 模块估算黔中城市群经济核心区 2000,2010,2020 年的碳储量,得出其碳储量分别为 4.42×10^7 , 4.42×10^7 , 4.33×10^7 t。

2000—2010 年增加了 1.00×10^4 t,平均每年增加 1 000 t,其主要原因在于 2000—2010 年耕地和林地的面积减少,草地和灌木林地的面积增加,虽然耕地和林地为单位面积上碳储量总量略大于草地和灌木

林地碳储量总量,但增加的面积和减少的面积差异不大,且部分耕地和林地向建设用地与水域转变,反而使得区域碳储量略微增加。2010—2020 年减少了 9.50×10^5 t,年均减少 9.50×10^4 t,这主要是由于 2010—2020 年,该区域的社会经济活动加强,城镇化进程加快,对土地开发利用需求增大,建设用地和水域增加,侵占耕地、林地、草地和灌木林地,使得区域碳储量出现大幅度下降。

从区域碳储量的空间分布来看(图 3),2000,2010,2020 年的碳储量密度均呈现西部、东部高,中部低的分布态势。其中高碳储量密度区域主要位于研究区的西部和东部,即“镇宁—长顺—惠水—龙里—贵定—开阳”连线东部区和“织金—黔西”连线西部区,主要是因为该地区拥有较高森林覆盖面积,植

被覆盖率相对较高。低碳储量密度区为“普定—安顺(西秀区)—平坝—清镇—贵阳—修文—息烽”连线的中部区,从土地利用分布图看(图 2),该区域主要为建设用地分布区域。其中,贵阳市碳储量分布较为特殊,表现为“高一低”密度环带现象,其中心碳储量密度低,外围碳储量密度高,虽贵阳市城市扩张较快,建设用地比例相对较高,但由于其环城林地的存在,使其具有较高森林覆盖率,约为 42.19%,使得外围具备较高的碳储量密度。2000—2020 年,碳储量高密度区未发生明显变化,低密度区变化则主要体现在贵阳市中心以及安顺至贵阳连线方向,由中心区域向外围扩散,其主要与贵阳市经济快速发展,大力开展城镇建设有关,如国家级新区贵安新区的发展建设,促使大量地类向建设用地转移,造成碳储量密度降低。

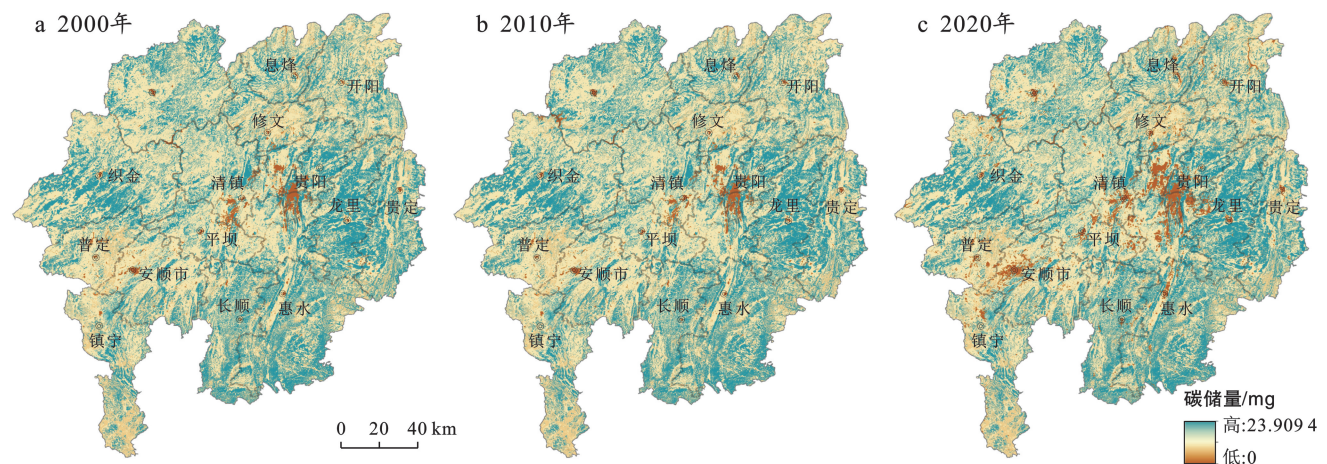


图 3 黔中城市群经济核心区碳储量空间分布

Fig.4 Spatial pattern of carbon storage in economic core area of Central Guizhou urban agglomeration

2.3 土地利用转移对碳储量的影响

从上述分析可知,土地利用变化在一定程度引起

了碳储量的变化,为进一步分析各地类间转移对碳储量的影响,分别计算各地类转移的碳变化量(表 5—6)。

表 5 黔中城市群核心经济区 2000—2010 年土地利用碳储量转移矩阵

Table 5 Transfer matrix of land use carbon storage in core economic zone of Central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2010

项 目		2010 年面积					
		耕 地	林 地	草 地	灌木林地	水 域	建设用地
2000 年面积	耕 地	0.00	0.62	−0.07	0.06	−0.03	−0.02
	林 地	−0.54	0.00	−1.09	−0.08	−0.03	−0.01
	草 地	0.07	0.97	0.00	0.07	−0.03	−0.02
	灌木林地	−0.04	0.07	−0.07	0.00	−0.01	−0.01
	水 域	0.01	0.05	0.12	0.01	0.00	0.00
	建设用地	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

由表 5—6 可得,2000—2010 年黔中城市群核心区土地利用变化引起碳储量增加 2.06×10^6 t,2010—2020 年间碳储量减少 2.05×10^6 t,整体增加 $1.00 \times$

10^4 t。其中,引起碳储量增加最多的是草地转为林地,增加了 9.70×10^5 t,占碳储量增加的 47.09%,其次是耕地转为林地,增加了 6.20×10^5 t,占碳储量

增加的 30.10%;引起碳储量减少最多的为林地转为草地,减少了 1.09×10^6 t,占碳储量减少的 53.17%,其次为林地转为耕地,减少了 5.40×10^5 t,占碳储量减少量的 26.34%。2010—2020 年黔中城市群核心区土地利用变化引起碳储量增加 2.75×10^6 t,减少 1.80×10^6 t,整体减少了 9.50×10^5 t。其中,草地转为林地是引起碳储量增加的主要原因,占碳储量增加

的 50.00%,其次是耕地转为林地,占碳储量增加的 35.00%;林地转为草地是引起碳储量减少的主要原因,占碳储量减少的 52.22%,其次是林地转为耕地,占碳储量减少的 21.81%。从 2000—2010,2010—2020 年土地利用碳储量转移矩阵可以看出,其他地类向林地的转换,会使研究区碳储量增加,而林地转为其他地类,则造成碳储量减少。

表 6 黔中城市群核心经济区 2010—2020 年土地利用碳储量转移矩阵
Table 6 Transfer matrix of land use carbon storage in core economic zone of
Central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2010

10⁶ t

项 目		2020 年					
		耕 地	林 地	草 地	灌木林地	水 域	建设用地
2010年	耕 地	0.00	0.63	−0.06	0.03	−0.03	−0.50
	林 地	−0.60	0.00	−0.94	−0.06	−0.07	−0.18
	草 地	0.07	0.90	0.00	0.07	−0.04	−0.08
	灌木林地	−0.04	0.06	−0.07	0.00	−0.01	−0.07
	水 域	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	建设用地	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2.4 碳储量服务的脆弱性评估

根据生态系统脆弱性评估方法和土地利用变化对生态系统服务脆弱性的量化方法,对 2000—2010 和 2010—2020 年两个时间段的碳储量对土地利用变化的脆弱性评估(表 7)。

表 7 土地利用对碳储量能力的潜在影响(PI)
Table 7 Potential impact (PI) of land use on
carbon storage capacity

年份	土地利用程度 综合指数	土地利用 程度变化	总碳储量/ 10 ⁶ t	碳储量 变化	PI/ 10 ⁶ t
2000	242.85	—	44.23	—	—
2010	242.62	−0.23	44.24	0.01	−0.04
2020	245.68	3.06	43.29	−0.95	−0.31

由表 7 可知,该区域土地利用程度处于中偏上发展水平,2000—2010 年土地利用程度略有减弱,但变化程度不大;2010—2020 年土地利用程度较前 10 a 有所增加,这主要受高等级分级指数建设用地扩张的影响。与此同时,20 a 间,研究区碳储量也发生了一定的变化,2000—2010 年增加了 1.00×10^4 t,2010—2020 年增加了 9.50×10^5 t,说明,黔中城市群主要扮演碳源的角色,主要原因是碳密度高的林地、耕地、草地减少,而碳密度低的建设用地增加。从潜在影响指数(PI)来看,在两个时间段内,其指数均为负值,分别为 4.00×10^4 t, 3.10×10^5 t,表明这 20 a 间土地利用变化对生态系统服务均存在负面影响,且影响不断加剧,脆弱性不断增强,同时表明土地利用开发存在不

合理现象,这对地区经济发展和生态环境保护产生一定的制约。因此在后期的土地利用开发过程中,应加强土地规划的合理性,促进林地、耕地、和建设用地之间的动态平衡,同时注重高碳储量密度地类的保护和增长,减弱不合理的土地利用开发对碳储量平衡的影响,增强生态系统的服务能力。

3 讨 论

从本文的研究结果来看,黔中城市群核心经济区固碳能力在 2000—2010 年有所增加,这与郜红娟等^[18]的结论一致,林地和灌木林地等表现出强烈的碳汇能力。这是由于在时间段内,贵州省大力实施植树造林、封山育林和退耕还林等政策,使得大量的耕地、草地等向灌木林地和林地转移,即低固碳能力的地类向高固碳能力地类转移,造成区域碳储量增加。除此之外,郜红娟等^[18]和廖小峰等^[19]发现不同的树种对区域的碳储量影响也存在差异,主要表现为落叶阔叶林和常绿阔叶林对区域的碳储量增加贡献突出,针阔混交林和灌木林的贡献较小。因此,为实现研究区绿色低碳发展,增加林地和控制林地转为其他地类的同时还要注重区域树种的选择。在 2010—2020 年,区域碳储量急剧减少,通过与杨静怡等^[27]对比研究发现,该区域建设用地持续增加,建设用地主要来自于林地、灌木林地、草地和耕地的转入,而碳储量与林地、草地、灌木林地和耕地面积变化为显著正相关关系,建设用地与之负相关关系,因此在这 10 a 间碳储量整体下降。从碳储量的空间变化来看,研究区

中心地带碳储量明显低于西部和东部区域,且随着时间推移,建设用地不断向外围扩张,碳储量的低密度区也由中心区域向外围扩散,在 2010—2020 年尤为明显,这是由于该时间段内,为贵阳市和贵安新区城市化快速发展,大量其他地类向建设用地转移,土地利用变化剧烈^[28]。此外,在 2000—2020 年研究区主要扮演碳源的角色,在该时间段内区域的生态系统储存服务脆弱性表现为负面潜在影响,这与陈大蓉等^[29]的研究结果一致,区域的城镇化发展,造成土地利用强度逐渐增加,碳储量减少。因此,为保障研究区生态系统的稳定可持续发展,研究区在不断推进社会经济发展的同时,也要加强林地、草地、耕地等固碳能力较强地类的保护,集中建设用地布局,进而降低生态系统服务的脆弱性。

研究为黔中城市群核心经济区的绿色低碳和生态系统的稳定可持续发展提供了一定的参考,但研究也存在一定的不足:①InVEST 模型 Carbon 对碳循环过程进行了简化,利用静态的地类碳密度来精选碳储量估算,本身就存在一定的局限性^[30],且本文采用的碳密度值主要来自于前人在该区域的研究,与实地测量数相比,精度不高,但也被广泛运用^[31-32],具有较好的科学合理性。后期将进一步加强野外数据采集,获取更加有效的动态碳密度数据,提高碳储量估计精度。②本文的土地利用数据来自于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>)GlobeLand30 数据集,其土地利用分类较为笼统,无法完全诠释区域内的土地利用和碳储量变化情况,后期将细化研究区的土地利用类型,减少相对误差,提升区域内的碳储量估算精度,更好地为区域的绿色发展提供数据支撑。

4 结 论

本文运用 InVEST 模型 Carbon 对黔中城市群核心经济区碳储量进行了估算,并对土地利用变化和碳储量变化时空格局进行了探讨分析,并对区域的生态脆弱性进行评估,得出以下结论。

(1) 2000—2020 年,黔中城市群核心经济区土地利用/覆被总体表现为耕地和林地持续下降,建设用地持续上升,空间分布看,建设用地增加区域与耕地、林地减少区域高度重叠。其中,前 10 a 的主要转移类型是林地转为草地,后 10 a 的主要转移类型是耕地转为建设用地。

(2) 2000—2020 年黔中城市群经济核心经济区碳储量累计减少 9.40×10^5 t,其中,林地转为草地是引起碳储量减少的主要原因。从空间分布看,各年度

碳储量密度均呈现西部、东部高,中部低的分布态势;20 a 间,高密度区未发生明显变化,低密度区则表现为由中心区域向外围扩散,这与该期间建设用地的扩张密切相关。

(3) 2000—2020 年黔中城市群经济核心经济区主要扮演碳源的角色,土地利用程度综合指数增加了 2.83,PI 指数分别为-0.04,-0.31,均表现为负面潜在影响,且脆弱性不断增强。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Hu Shuai, Zhang Xueru, Guan Dongjie. Analysis on carbon storage change of construction land expansion in Chongqing based on InVEST model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(3):323-331.
- [2] 张平平,李艳红,殷浩然,等.中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J].自然资源学报,2022,37(5):1183-1197.
Zhang Pingping, Li Yanhong, Yin Haoran, et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1183-1197.
- [3] 张斌,李璐,夏秋月,等.“三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J].生态学报,2022,42(6):2265-2280.
Zhang Bin, Li Lu, Xia Qiuyue, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: A case study of Wuhan City circle [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2265-2280.
- [4] Yang Hang, Huang Junlong, Liu Dianfeng. Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: Analysis of their concurrent effects on carbon storage [J]. Applied Geography, 2020,115:102135.
- [5] 李彦旻,沈育生,王世航.基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J].水土保持学报,2022,36(1):182-188.
Li Yanmin, Shen Yusheng, Wang Shihang. Spatio-temporal characteristics and effects of terrestrial carbon emissions based on land use change in Anhui Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):182-188.
- [6] de B Richter D Jr, Houghton R A. Gross CO₂ fluxes from land-use change: Implications for reducing global emissions and increasing sinks [J]. Carbon Management, 2011,2(1):41-47.
- [7] 张金鑫,王红玲.中国畜牧业碳排放地区差异、动态演进

- 与收敛分析:基于全国 31 个省(市)1997—2017 年畜牧业数据[J].江汉论坛,2020(9):41-48.
- Zhang Jinxin, Wang Hongling. Regional difference, dynamic evolutionary and convergence analysis on the Chinese animal husbandry: Based on the animal husbandry data in 31 provinces from 1997 to 2007 [J]. Jiangnan Tribune, 2020(9):41-48.
- [8] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 151-163.
- [9] 段璇瑜,龚文峰,孙雨欣,等.海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J].水土保持通报,2022, 42(5):301-311.
- Duan Xuanyu, Gong Wenfeng, Sun Yuxin, et al. Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42 (5):301-311.
- [10] 李姣,汪杰,李朗,等.洞庭湖生态经济区土地利用变化对碳储量的影响[J].生态学杂志,2022,41(6):1156-1165.
- Li Jiao, Wang Jie, Li Lang, et al. Impact of land use change on carbon storage in the Dongting Lake Eco-economic Zone [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(6):1156-1165.
- [11] 刘亚男,郝敏,张希丽,等.中国湿地碳储量分布特征及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(7):2481-2489.
- Liu Yanan, Xi Min, Zhang Xili, et al. Carbon storage distribution characteristics of wetlands in China and its influencing factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7):2481-2489.
- [12] 蔡广鹏,韩会庆,张凤太,等.喀斯特地区贵州省绥阳县土地利用/覆被变化对陆植被碳储量的影响[J].水土保持研究,2012,19(4):122-124.
- Cai Guangpeng, Han Huiqing, Zhang Fengtai, et al. Impacts of land use change on the vegetation carbon storage in Suiyang, Guizhou Province in the Karst area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19 (4):122-124.
- [13] 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 Dan, Zhou Zhongfa, Chen Quan, 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.
- [14] 李月,罗红芬.基于 InVEST 模型的黔中喀斯特地区建设用地扩张碳储量变化研究[J].西北林学院学报, 2024, 39(1):185-192.
- Li Yue, Luo Hongfen. Research on carbon storage change of construction land expansion in Central Guizhou's Karst region based on InVEST model [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39 (1):185-192.
- [15] 向书江,张骞,王丹,等.近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J].自然资源学报,2022,37(5):1198-1213.
- Xiang Shujiang, Zhang Qian, Wang Dan, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000—2020 [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5):1198-1213.
- [16] 滕明塔,李旭东,方冰轲,等.黔中城市群地表覆盖变化及驱动因素分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(1):21-31.
- Teng Mingta, Li Xudong, Fang Bingke, et al. Study of land cover change and its driving factors of urban cluster in central Guizhou [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2023, 41(1):21-31.
- [17] 王小凤.黔中城市群生态系统生产总值(GEP)时空演变特征研究[D].贵州 贵阳:贵州师范大学,2022.
- Wang Xiaofeng. A study on the temporal and spatial evolution characteristics of gross ecosystem product (GEP) in the central Guizhou urban agglomeration [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Normal University, 2022.
- [18] 郇红娟,韩会庆,张朝琼,等.乌江流域贵州段 2000—2010 年土地利用变化对碳储量的影响[J].四川农业大学学报,2016,34(1):48-53.
- Gao Hongjuan, Han Huiqing, Zhang Chaoqiong, et al. Effects of land use change on carbon storage in Wujiang River of Guizhou Province from 2000-2010 [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2016, 34(1):48-53.
- [19] 廖小锋,赵晓朋,谢元贵.贵州喀斯特地区五种植被恢复模式碳储量异质性研究[J].浙江农业学报,2015, 27 (12):2100-2104.
- Liao Xiaofeng, Zhao Xiaopeng, Xie Yuangui. Study on heterogeneity of carbon stocks for five forest recovery modes in karst area of Guizhou [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(12):2100-2104.
- [20] 李明军,杜明凤,喻理飞.贵州省森林植被碳储量、碳密度及其分布[J].西北林学院学报,2016,31(1):48-54.
- Li Mingjun, Du Mingfeng, Yu Lifei. Carbon storage and density of forest vegetation and its spatial distribution pattern in Guizhou Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 48-54.
- [21] 张哲,时振钦,朱文博,等.基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟[J/OL].环境科学,

- (2023-07-25), <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202306203>.
- Zhang Zhe, Shi Zhenqin, Zhu Wenbo, et al. Simulation of temporal and spatial changes of ecosystem carbon storage in Funiu Mountains based on InVEST model [J/OL]. *Environmental Science*, (2023-07-25) <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202306203>.
- [22] 尹林江,周忠发,朱昌丽,等.喀斯特石漠化及土地利用变化的地貌分异特征:以贵州省关岭贞丰花江石漠化综合示范区为例[J].*水土保持通报*,2020,40(2):37-46.
- Yin Linjiang, Zhou Zhongfa, Zhu Changli, et al. Geomorphological differentiation characteristics of land use change in Karst rocky desertification area: A case of Guanling-Zhenfeng Huajiang Rocky Desertification Comprehensive Demonstration Zone in Guizhou Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(2):37-46.
- [23] 刘纪远.国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J].*遥感学报*,1997,1(3):225-230.
- Liu Jiyuan. Study on national resources & environment survey and dynamic monitoring using remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997,1(3):225-230.
- [24] 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.
- [25] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006,114(1):69-85.
- [26] Wu Yuzhe, Shen Jiahui, Zhang Xiaoling, et al. The impact of urbanization on carbon emissions in developing countries: A Chinese study based on the U-Kaya method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,135:589-603.
- [27] 杨静怡,吴峰.贵阳市 1980—2018 年土地覆盖类型及碳储量变化研究[J].*西南林业大学学报(自然科学)*, 2020,40(4):115-121.
- Yang Jingyi, Wu Feng. Study on change of land cover type and carbon storage during 1980—2018 in Guiyang [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2020,40(4):115-121.
- [28] 龙飞,曾晴,钟露璐.金融支持贵阳城镇化发展过程中存在的问题及对策研究[J].*中国管理信息化*,2019,22(1):137-139.
- Long Fei, Zeng Qing, Zhong Lulu. Problems and countermeasures in the process of financial support for Guiyang's urbanization development [J]. *China Management Informationization*, 2019,22(1):137-139.
- [29] 陈大蓉,周旭,杨胜天,等.基于贵州省土地变化的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.
- 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.
- [30] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013,165:6-18.
- [31] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性 & 预测:以广东省为例[J].*中国环境科学*,2022,42(10):4827-4839.
- Lin Tong, Yang Muzhuang, Wu Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4827-4839.
- [32] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2021,29(6):1018-1029.
- Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021,29(6):1018-1029.