

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.032

邵良, 陈佳, 龙文涛, 等. 贵州省退耕还林(草)时空格局及其固碳效应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 170-177.

TAI Liang, CHEN Jia, LONG Wentao, et al. Spatial-temporal pattern of the "Grain-for-Green Project" and its carbon sequestration effect in Guizhou Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 170-177.

贵州省退耕还林(草)时空格局及其固碳效应

邵良, 陈佳, 龙文涛, 蔡华银, 王欣星

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要: [目的] 为探究退耕还林(草)工程对贵州省陆地生态系统碳储量的影响。[方法] 以贵州省为例, 利用 ArcGIS 与 InVEST 模型相结合, 研究 2000—2020 年贵州省退耕还林(草)时空分布格局及碳储量变化。[结果] (1) 2000—2020 年贵州省土地利用变化显著, 综合动态度呈先下降后上升的趋势, 依次为 0.32%, 0.11%, 0.09%, 0.35%。耕地、林地和草地之间相互转换, 建设用地与水域主要来源于耕地。(2) 2000—2020 年退耕还林(草)总面积为 238.17 万 hm^2 , 土地利用转型主要以耕地转向林地为主, 占总退耕还林(草)总面积的 84.86%, 主要分布在遵义市、毕节市和黔西南州等地。(3) 2000—2020 年退耕还林(草)区的碳储量共增加 $257.40 \times 10^6 \text{ t}$, 呈逐渐增长的趋势。耕地转向林地的固碳量最大, 达 $239.89 \times 10^6 \text{ t}$ (93.2%), 土壤碳库为主要贡献者, 碳储量为 $178.15 \times 10^6 \text{ t}$ (69.21%)。[结论] 实施退耕还林(草)工程有助于提高区域生态系统碳储量, 耕地转向林地的固碳能力最大, 耕地转向草地的固碳能力较小, 在未来实施退耕还林(草)工程可优先考虑耕地退耕成林地, 有助于提高区域碳储量。

关键词: 退耕还林(草)工程; 时空格局; 碳储量; InVEST 模型

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0170-08

Spatial-temporal Pattern of the "Grain-for-Green Project" and Its Carbon Sequestration Effect in Guizhou Province

TAI Liang, CHEN Jia, LONG Wentao, CAI Huayin, WANG Xinxing

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] To analyze the impacts of the "Grain-for-Green Project" on the ecosystem carbon stocks in Guizhou Province. [Methods] Taking Guizhou Province as an example, the spatial and temporal distribution pattern and carbon stock changes of the "Grain-for-Green Project" in Guizhou Province from 2000 to 2020 were investigated by using ArcGIS in combination with the InVEST model. [Results] (1) During the 20-year period, land use in Guizhou Province had changed significantly, and the comprehensive dynamic had shown a downward and then an upward trend, which was 0.32%, 0.11%, 0.09%, 0.35% in order. There was an interconversion among cropland, woodland and grassland, with built-up land and waters mainly derived from cropland. (2) The total area of the "Grain-for-Green Project" from 2000 to 2020 was 2 381 700 hm^2 , of which the land use transformation was mainly dominated by the conversion of cropland to forest land, which accounted for 84.86% of the total area of the "Grain-for-Green Project", and mainly in Zunyi, Bijie and Qianxinan Prefecture, etc. (3) A total of $257.40 \times 10^6 \text{ t}$ carbon stock was added to the "Grain-for-Green Project" area from 2000 to 2020, showing a trend of gradual growth. Cropland shifted to forest land sequestered the largest amount of carbon, amounting to $239.89 \times 10^6 \text{ t}$ (93.2%), and the soil carbon pool was the main contributor, with a carbon stock of $178.15 \times 10^6 \text{ t}$ (69.21%). [Conclusion] The implementation of the "Grain-for-Green Project" helps to increase the regional ecosystem carbon stock. The carbon sequestration capacity of conversion of cropland to forest land is the largest, and the carbon

收稿日期: 2024-09-15

修回日期: 2024-09-22

录用日期: 2024-10-08

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42367047); 贵州大学博士基金项目 (2021042)

第一作者: 邵良 (1999—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土地利用变化及其固碳效应研究。E-mail: gztailiang@outlook.com

通信作者: 陈佳 (1983—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持生态服务功能研究。E-mail: chen_li@nwafu.edu.cn

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

sequestration capacity of conversion of cropland to grassland is smaller. The implementation of the “Grain-for-Green Project” in the future can prioritize the conversion of cropland to forest land, in order to increase the regional carbon stock.

Keywords: the “Grain-for-Green Project”; spatial and temporal patterns; carbon stocks; InVEST model

Received: 2024-09-15

Revised: 2024-09-22

Accepted: 2024-10-08

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

退耕还林(草)工程是我国投入资金最多、执行力度最大、群众参与程度最高的重大生态恢复工程之一^[1]。该工程分为2个阶段:第1阶段为1999年开始试点实施的前一轮退耕还林(草)工程,第2阶段为2014年开启的新一轮退耕还林(草)工程。主要以25°以上坡耕地、严重石漠化耕地、严重污染耕地等为退耕对象,实行退耕还林、退牧还草、封山育林等主要措施,2000—2020年我国已累计退耕还林(草)超3 000万 hm²,有效控制水土流失,提高我国植被覆盖率,优化退耕区的土地利用类型,同时也改变陆地生态系统的结构和功能。学术界从多个角度评估退耕还林(草)工程对水土保持^[2]、粮食生产^[3]、固碳量^[4]等方面的影响。在退耕还林(草)工程实施成效上,研究方法上多采用统计数据法、实地调查法等,但这种方法需要投入大量的人力和财力。综合利用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术监测退耕还林(草)工程,可以有效减少人力、财力的投入,且能够全面、准确地掌握工程的实施情况。众多学者运用RS和GIS的技术和方法,评价退耕还林(草)工程对土地利用变化的影响。度阳^[5]利用RS和GIS技术获取黄土高原2000年、2010年和2015年土地利用数据,并基于地形、气象、社会经济和政策因素,分析各影响因素对于退耕还林(草)工程的作用;方月等^[6]基于RS和GIS,探究退耕还林(草)工程实施以来陕西省洛川县土地利用和植被的变化情况。由此可见,RS与GIS技术在退耕还林(草)工程方面的研究众多且成效显著。

陆地生态系统是大气CO₂重要的汇^[7],林地、草地等通过吸收CO₂等温室气体来调节气候^[8]。为应对全球气候变化的问题,陆地生态系统碳储量成为研究的热点^[9]。近年来,国内外学者^[10-11]对陆地生态系统及其碳储量开展大量研究。其研究方法主要有样地清查法、模型模拟法等,样地清查法具有方法明确、技术简单和数据准确的优点,但该方法工作量大、耗时长,通常仅适用于小尺度研究,收集数据过程中会对研究区域环境造成干扰,且不能反映时间变化。随着3S技术的发展,大量学者通过模型模拟法评估生态系统碳储量的影响,InVEST模型因其所需数据量少,操作简单和运算速度快等特点被广泛应

用。KOHESTANI等^[12]基于InVEST模型评估了1988—2018年伊朗北部流域的碳储量;胡晓倩^[13]、姚楠等^[14]基于InVEST模型评估了退耕还林(草)工程在南方红壤丘陵区、黄土丘陵沟壑区的生态系统碳储量的时空变化,得出实施退耕还林(草)工程对区域生态系统碳储量具有显著的正面作用。国内研究多集中在黄土高原等地区,退耕还林(草)工程不仅改变区域的土地利用方式,还影响了陆地生态系统碳循环。因此,研究退耕还林(草)工程背景下碳储量的变化,对有效地提高区域碳储量有重要的意义。

贵州省是我国喀斯特地貌分布最广的省份,占全省总面积的70%以上,是“两江”上游生态屏障区、石漠化生态脆弱区高度耦合的省份^[15],继四川、陕西、甘肃3省试点开启退耕还林(草)工程后,贵州省最早于2000年开启退耕还林(草)工程,到2020年退耕还林(草)工程的实施使得土地利用格局发生显著变化,进而影响陆地生态系统碳储量。因此,本文以贵州省为研究区,探究2000—2020年退耕还林(草)时空分布及其碳储量的变化特征,评估该工程对贵州省陆地生态系统碳储量的影响。为下一步退耕还林(草)工程的实施与管理,我国“双碳”目标下的增汇减排工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省位于我国西南地区(103°36′—109°35′E, 24°37′—29°13′N),总面积176 167 km²,共有9个地级行政区(图1)。地势西高东低,海拔最高为2 900.6 m,最低为147.8 m,为典型的喀斯特地貌,山地、丘陵占90%以上,是全国唯一没有平原的省份,属于亚热带季风气候区,年平均气温15℃,年平均降水量1 100~1 300 mm。

贵州省于2000年开启第1轮退耕还林(草)工程,2014年启动第2轮退耕还林(草)工程,截至2021年已累计退耕还林247.22万 hm²,取得显著的生态效益^[16]。尽管如此,贵州省仍有大量坡耕地、严重石漠化耕地及受重金属镉、铅、锌严重污染的耕地需要退耕还林(草)。

1.2 数据来源与预处理

来源于YANG等^[17]制作的中国逐年30 m土地利用/覆盖数据集(annual china land cover dataset, CLCD),CLCD的精度(overall accuracy, OA):76.45% <

OA<82.51%,平均 OA 为 79.30%±1.99%,选取贵州省 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地覆盖的空间数据,根据本研究的实际状况,将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 类。数字高程模型 (DEM) 数据和行政边界数据,下载于地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn)。为便于 ArcGIS 处理,将数据均统一为 Kravsky_1940_Albers 投影坐标系。

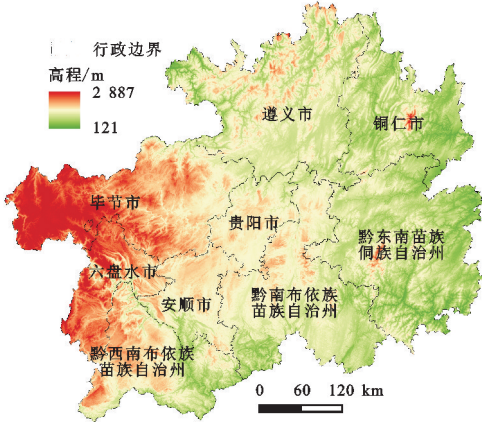


图 1 贵州省地理位置示意

Fig.1 Geographic location of Guizhou Province

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态度

(1)单一土地利用动态度可描述区域某一土地利用类型的变化速,计算公式^[18]为:

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\%$$
 (1)

式中:K 为研究时段内某一种土地利用类型动态度;U_b 和 U_a 分别为研究期末和期初该种土地利用类型的面积(hm²);T 为研究时段。

(2)综合土地动态度可分析某一研究区的综合土地利用动态度,计算公式^[19]为:

$$L_c=\frac{\sum_{i=1}^n\Delta L_{U_{i-j}}}{2\sum_{i=1}^n\Delta L_{U_i}}\times\frac{1}{T}\times100\%$$
 (2)

式中:L_c为综合土地利用动态度;ΔL_{U_{i-j}} 为 i 土地利用类型转为 j 土地利用类型面积的绝对值;ΔL U_i 为初期土地利用类型的面积(hm²);T 为研究时段。

1.3.2 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵能够反映研究期间区域内各种土地利用类型的结构特征及面积之间相互转化的情况和方向^[20]。表达式为:

$$S_{ij}=\begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & S_{ij} & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{Bmatrix}$$
 (3)

式中:S_{ij} 为 i 类土地利用类型转换成 j 类土地利用类型的面积,当 i=j 时,S_{ij} 为某种未发生土地利用变化的土地类型的面积;i 和 j 分别为转移前和转移后的类型(i,j=1,2,⋯,n);n 为土地利用类型数。

1.3.3 退耕还林(草)区的识别 退耕还林(草)工程使土地利用类型发生变化。与该工程相关的土地利用变化类型包括耕地转向林地、耕地转向草地、草地转向林地 3 种类型^[21]。研究以 5 年为 1 个研究时段,利用 ArcGIS 分析 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年贵州省土地利用转移矩阵,并提取上述有关的土地利用变化类型,从而获得退耕还林(草)工程的时空分布范围。

1.3.4 InVEST 模型估算碳储量 InVEST (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型是评估生态服务功能及其价值的综合评估模型。该模型 Carbon 模块能够可靠地估算陆地生态系统碳储量,主要包括地上生物碳储量、地下生物碳储量、土壤碳储量和凋落物有机质碳储量 4 个部分^[22]。计算计算公式为:

$$C_{total}=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead}$$
 (4)

式中:C_{total}为总碳储量(t);C_{above}为植被地上碳储量(t);C_{below}为植被地下碳储量(t);C_{soil}为土壤碳储量(t);C_{dead}为凋落物有机物碳储量(t)。

结合 ArcGIS 软件,以 5 年为 1 个研究时段,分析每个时段各类碳储量变化,与土地利用转移矩阵数据叠加,提取退耕还林(草)区的碳储量变化,获取不同退耕措施的碳储量变化情况。

由于贵州省各地类的碳密度研究较少,考虑到气候、土壤等条件的影响,避免研究的不确定性,本文碳密度(表 1)借鉴景晓玮^[23]和陈大蓉等^[24]的研究结果,已利用气候条件对碳密度进行修正,即碳密度与气温和降水的关系模型。

表 1 贵州省不同土地利用类型碳密度

Table 1 Carbon intensity of different land use types in Guizhou

Province		t/hm ²		
土地利用	地上	地下	土壤	凋落物有
类型	碳密度	碳密度	碳密度	机质碳密度
耕地	36.48	6.93	92.50	0
林地	58.27	17.50	173.40	5.48
草地	1.32	1.40	135.00	0
水域	0	0	0	0
未利用地	0.74	0.13	69.92	0
建设用地	0	0	108.50	0

2 结果与分析

2.1 贵州省土地利用动态变化特征

贵州省土地利用类型主要以林地、耕地和草地为

主(图 2)。林地主要分布在黔东南、黔南地区,耕地主要分布在贵阳市、安顺市和遵义市等地区,草地主要分布在毕节市、六盘水市等西部地区。

土地利用综合动态度呈先降后升的趋势,依次为 0.32%,0.11%,0.09%,0.35%(表 2)。土地利用转移方向上,耕地、林地、草地之间相互转换。草地的面积呈减少状态,变化动态度呈先增后减的趋势;耕地的面积先增加后减少,动态度从 2000—2005 年的 0.93%减少为 2015—2020 年的 -0.96%;建设用地和水域面积都呈增加状态,且主要来源于耕地,建设用地动态度平均值为 7.42%,表明贵州省城市化发展迅速,建设用地变化格局大,水域面积增加可能与贵州省水利工程有关;林地面积呈先减少后增加的状态,

2000—2005 年减少较多,动态度为 -0.40%,2005—2015 年动态度同为 -0.06%,2015—2020 年动态度达到最大值 0.49%;未利用地的平均动态变化度最大,在 2015—2020 年最大为 105.27%,但其变化面积较小,可能与水土流失、石漠化有关。

2.2 贵州省退耕还林(草)时空格局

由表 3 可知,2000—2020 年贵州省退耕还林(草)总面积为 238.12 万 hm²,退耕还林(草)面积呈上升趋势,其扩张速度在逐年增加,从 9.19 万 hm²/a 上升至 14.83 万 hm²/a,土地利用转型主要以耕地转向林地为主,面积为 202.12 万 hm²,占总面积的 84.86%,其次是耕地转向草地和草地转向林地。退耕还林(草)区主要分布在遵义市、黔西南州、毕节市等地区。

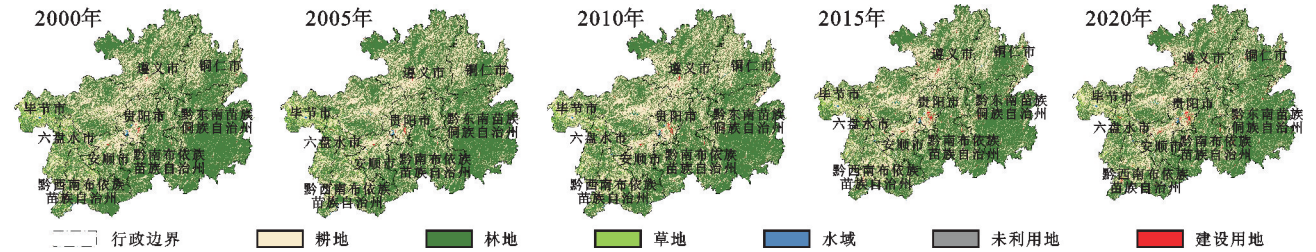


图 2 贵州省 2000—2020 年土地利用类型空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use types in Guizhou Province from 2000 to 2020

表 2 贵州省 2000—2020 年土地利用动态变化

Table 2 Land use dynamics in Guizhou Province from 2000 to 2020

土地利用 类型	变化量/10 ⁴ hm ²				动态度/%			
	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年
草地	-5.04	-5.75	-4.21	-1.78	-2.53	-3.30	-2.90	-1.43
耕地	26.86	6.01	3.59	-29.46	0.93	0.20	0.12	-0.96
建设用地	0.89	1.91	3.26	3.60	4.61	8.04	9.77	7.24
林地	-22.79	-3.56	-3.35	27.19	-0.40	-0.06	-0.06	0.49
水域	0.08	1.39	0.72	0.44	0.37	6.40	2.50	1.35
未利用地	0	0	0	0.02	-5.13	4.32	28.99	105.27
综合动态度					0.32	0.11	0.09	0.35

表 3 贵州省 2000—2020 年退耕还林(草)面积

Table 3 Area of the Grain-for-Green Project in Guizhou Province from 2000 to 2020

土地利用变化类型	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年	总面积 10 ⁴ hm ²
耕地转林地	36.34	47.61	53.94	64.23	202.12
耕地转草地	4.89	3.93	5.93	6.65	21.40
草地转林地	4.73	3.70	2.91	3.26	14.65
总面积	45.96	55.24	62.78	74.14	238.12

退耕还林(草)区在时间与空间上有一定的差异。2000—2005 年,耕地转向林地的面积为 36.34 万 hm²,主要分布在贵阳市、黔南州西北部、安顺市、毕节市西部和遵义市(图 3),耕地转向草地与草地转向林地的面积分别为 4.89 万,4.73 万 hm²,主要分布在毕节市西部、六盘水市及黔西南州等西部地区;2005—2010 年,耕地转向林地的面积为 47.61 万 hm²,相对于 2000—2005 年增加约 30%,退耕还林

(草)区域向黔西南州、黔南州南部、六盘水市、毕节市中部、遵义市及铜仁市东部地区扩张,耕地转向草地与草地转向林地面积有所减少,面积分别为 39.31 万,3.76 万 hm²,比 2000—2005 年依次减少约 20%和 20.4%,主要分布在毕节市西部、六盘水市和黔西南州,耕地转草地类型向贵阳市南部扩张;2010—2015 年,耕地转向林地的面积为 53.94 万 hm²,比 2005—2010 年增加 13.29%,主要分布在铜仁市北

部、遵义市东部、黔南州西南和六盘水市东部,耕地转向草地的面积为 5.93 万 hm^2 ,增加 50.83%,扩张到黔东南州东部,草地转向林地的面积为 2.90 万 hm^2 ,比 2005—2010 年减少 22.72%;在 2015—2020 年,在

新一轮退耕还林(草)工程实施下,退耕还林(草)面积增至 74.14 万 hm^2 ,除西北部区域退耕还林(草)面积有所减少外,其余市州都有所增加,主要向贵州省西南部和北部扩张。

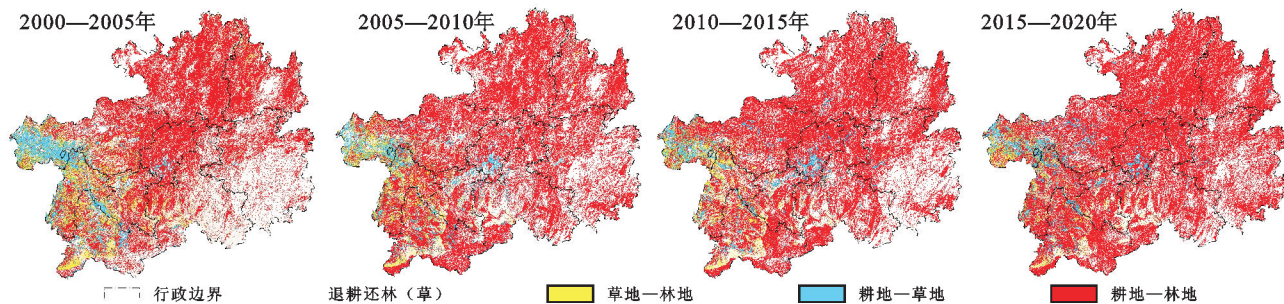


图 3 贵州省 2000—2020 年退耕还林(草)时空分布格局

Fig.3 Spatial and temporal distribution pattern of the "Grain-for-Green Project" in Guizhou Province from 2000 to 2020

2.3 退耕还林(草)工程实施区的碳储量时空演变特征

经 InVEST 模型计算得到 2000—2020 年贵州省生态系统碳储量依次为 37.29×10^8 , 37.01×10^8 , 36.93×10^8 , 36.86×10^8 , 37.16×10^8 t, 呈先下降后上升的趋势, 2000—2015 年从 37.29×10^8 t 下降至 36.86×10^8 t, 降幅为 0.92%, 主要是由于高碳密度的林地、草地的减少和建设用地增加; 2015—2020 年碳储量升高至 37.17×10^8 t, 增幅为 0.83%, 林地面积增加, 可

能与 2014 年开启的新一轮退耕还林(草)工程有关, 主要是耕地向林地转换的面积增加。全省碳密度的空间分布格局表现为黔东南州、黔南州及遵义市的碳密度高, 贵阳市、安顺市、六盘水市等地区碳密度较低(图 4)。黔东南州及黔南州等地主要为高碳密度的林地, 毕节市、六盘水市等高海拔区域有较多的草地, 贵阳市建设用地增加, 可以明显看出低碳密度区域明显扩大。

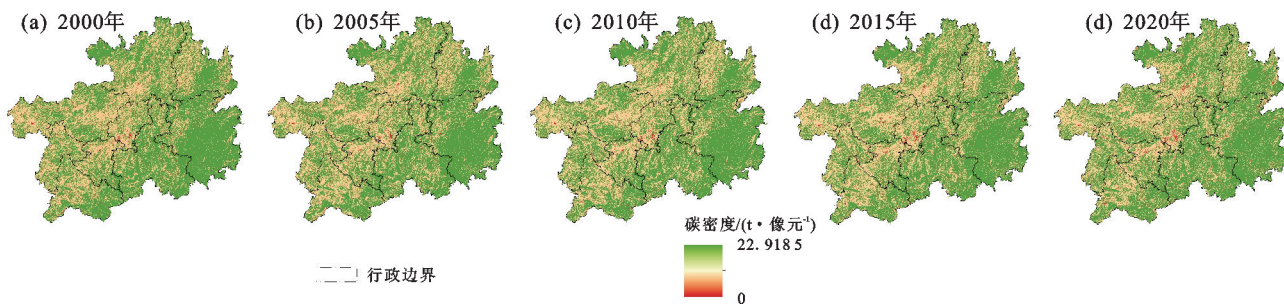


图 4 贵州省碳密度空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution pattern of carbon density in Guizhou Province

贵州省 2000—2020 年碳储量变化时空分布特征见图 5。将碳储量变化分为 3 类, 分别为显著减少、基本不变和显著增加。显著减少区域主要为林地转向耕地, 基本不变区域主要为土地利用类型未变化区域, 显著增加区域主要为退耕还林(草)实施区。能够明显看出全省 2000—2020 年退耕还林(草)工程实施力度逐渐加大, 涉及范围逐渐扩大, 区域的碳储量显著增加。2000—2005 年, 碳储量增加区域主要分布在贵阳市及周边地区, 黔南州和黔西南州的碳储量显著减少; 2005—2010 年, 六盘水、黔西南州等地区碳储量显著增加, 贵阳市、遵义市、铜仁市等地的碳储量显著减少; 2010—2015 年, 铜仁市、毕节市东部及黔西南州东部地区碳储量显著增加, 黔西南州西部和六盘水市等地的碳储量显著减少; 2015—2020 年, 新一轮退耕还林(草)工程推动下, 全省碳储量显著提高,

遵义市、铜仁市和黔西南州等地区增加明显。

由表 4 可知, 2000—2020 年全省退耕还林(草)工程的固碳量显著增加约 257.39×10^6 t, 总体呈逐渐增长的趋势。与该工程有关的土地利用变化类型的碳储量变化有显著差异, 由耕地转向林地的固碳量占比最大, 贡献 239.89×10^6 t (93.2%), 草地转林地的固碳量为 17.12×10^6 t (6.65%), 耕地转向草地固碳量仅为 0.39×10^6 t (0.15%), 表明退耕还林措施有明显的固碳效应, 退耕还草对固碳效应影响的显著性较小。在 4 大碳库中, 土壤的碳储量变化的贡献最大, 为 178.15×10^6 t (69.21%), 植被地上碳储量、植被地下碳储量和死亡有机物质碳储量依次为 44.84×10^6 (17.42%), 22.53×10^6 (8.75%), 11.87×10^6 t (4.61%)。耕地转向林地和草地转向林地的 4 大碳库均为正效应, 而在耕地转向草地土地利用变化类型中, 植被地上和地下碳储量减少, 仅有土壤碳储量为正效应。

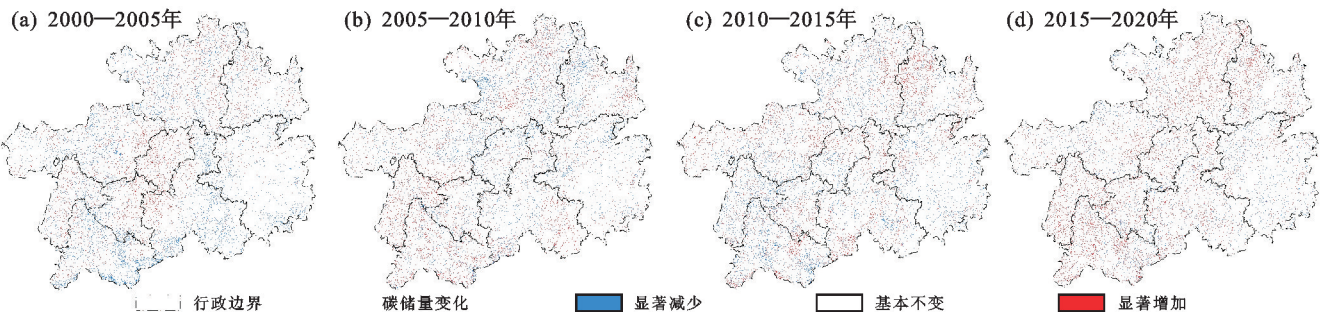


图 5 贵州省 2000-2020 年碳储量变化时空分布特征

Fig.5 Characteristics of spatial and temporal distribution of carbon stock changes in Guizhou Province from 2000 to 2020

表 4 贵州省 2000—2020 年退耕还林(草)区碳储量变化

Table 4 Changes in carbon stocks in the “Grain-for-Green Project” areas in Guizhou Province from 2000 to 2020						10 ⁶ t
年份	土地利用变化	植被地上碳储量	植被地下碳储量	土壤碳储量	凋落物有机质碳储量	总计
2000—2005	耕地转林地	7.92	3.84	29.39	1.99	43.13
	耕地转草地	−1.72	−0.27	2.08	0	0.09
	草地转林地	2.69	0.76	1.81	0.26	5.53
2005—2010	耕地转林地	10.37	5.03	38.50	2.61	56.51
	耕地转草地	−1.38	−0.22	1.67	0	0.07
	草地转林地	2.14	0.61	1.44	0.21	4.39
2010—2015	耕地转林地	11.75	5.70	43.62	2.95	64.02
	耕地转草地	−2.08	−0.33	2.52	0	0.11
	草地转林地	1.65	0.47	1.12	0.16	3.40
2015—2020	耕地转林地	13.99	6.79	51.94	3.52	76.23
	耕地转草地	−2.34	−0.37	2.83	0	0.12
	草地转林地	1.85	0.52	1.25	0.18	3.81
总计		44.84	22.53	178.15	11.87	257.39

3 讨论

(1)研究数据来源于 YANG 等^[17]制作的土地利用数据,总体精度达到 79.31%,评估表明其优于 MCD12Q1、ESACCI_LC、FROM_GLC 和 Globe-Land30。但不同的数据源、分类系统和分类方法,遥感制图结果差异显著^[25]。廖艳梅等^[26]利用全国地理信息资源目录服务系统 GlobeLand 30 数据集对贵州省土地利用变化进行研究,土地利用变化面积及速率等有所区别,但土地利用转移的主要方向较为一致。虽然土地利用数据有所差异,但在宏观大尺度上可以体现退耕还林(草)工程引起的土地利用变化规律,随着遥感影像分辨率逐渐提高,分类系统与方法研究深入,土地利用数据分辨率及精度也会更加精确。

(2)总体来看,退耕还林(草)工程对生态固碳具有促进作用,耕地转向林地对碳储量的贡献最大,与部分学者结果具有一致性,郜红娟等^[27]研究乌江流域贵州段土地利用变化对碳储量的影响,结果表明,流域碳储量的增加是在退耕还林工程作用下林地碳储量增加的结果;而耕地转向草地对碳储量的贡献最小,许明祥等^[28]分析了黄土丘陵区退耕还林(草)区 303 个样点的土壤有机碳密度,结果表明,退耕还林具有显著的固碳效益,而退耕还草没有显著的固碳效益。在 4 大碳库中,土壤碳库是退耕还林(草)区碳储

量的主要贡献者,对生态系统固碳效益影响最大。耕地转向草地的变化类型中,植被地上碳储量和植被地下碳储量均有所下降,可能有以下 2 个原因:其一,耕地生态系统受人为施肥、灌溉等管理措施的影响,而草地生态系统属于自然恢复的过程,耕地生态系统的植被生长条件较好;其二,贵州省处于喀斯特山区,土层较薄且坡度较大,生态系统脆弱,易发生水土流失和石漠化,草地的保水、保肥能力较差,贵州省在未来退耕还草实施和管理中应同时做好水土保持措施,以促进喀斯特山区草地生态系统恢复。

(3)该模型具有一定的局限性,其一,贵州省不同土地利用碳密度数据较难获取,逐年碳密度数据缺乏,本文所利用的碳密度参考的是前人的研究成果,忽略碳密度变化,因此,估算结果存在不确定性,实际的碳密度随气候变化、人类活动等因素的变化而发生改变,在未来的研究中应连续监测研究区域不同土地利用的碳密度数据,提高碳储量估算精度;其二,估算结果与土地利用的状况有关,本文将土地利用类型分为 6 类,未考虑到同一地类不同植被和不同树龄等影响对固碳能力的差异性,因此也存在不确定性,今后的研究可根据不同植被类型作为研究对象,以提高估算精度。

4 结 论

(1) 2000—2020 年贵州省土地利用格局变化显著。土地利用综合动态度呈先下降后上升的趋势。在 2000—2005 年与 2015—2020 年综合动态度较大,可能与 2000 年和 2014 年开启的 2 轮退耕还林(草)工程有关;建设用地、水域的面积增加,主要来源于耕地,表明贵州省城市化及水利工程发展迅速。草地、耕地与林地之间相互转移,表明退耕还林(草)工程引起土地利用变化明显。

(2) 2000—2020 年贵州省退耕还林(草)工程效果显著。退耕还林(草)规模呈上升趋势,其扩张速度在逐年增加,其中主要以退耕还林措施为主,占退耕还林(草)总规模的 84.86%,退耕还林(草)区主要分布在遵义市、毕节市、黔西南州等地,具有由中部向四周扩张的趋势。

(3) 2000—2020 年贵州省退耕还林(草)工程促使退耕还林(草)区的碳储量增加。退耕还林措施对提高固碳量的贡献高于退耕还草措施,更有利于提高区域碳储量;土壤的碳储量变化对总碳储量的贡献最大。因此,退耕还林(草)工程对提高区域碳储量和改善生态环境有重要意义。

参考文献:

- [1] 李坦,惠宝航,张添烨,等.1999—2019 年中国退耕还林工程研究进展[J].安徽农业大学学报(社会科学版),2022,31(3):38-49.
LI T, HUI B H, ZHANG T Y, et al. A review of the research on the grain for green program in China: 1999—2019[J]. Journal of Anhui Agricultural University (Social Sciences Edition), 2022, 31(3): 38-49.
- [2] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 11-19.
- [3] 时亚坤,曾奕,郭金金,等.黄土高原新一轮退耕还林草工程对粮食生产的影响[J].水土保持研究,2022,29(3):419-425.
SHI Y K, ZENG Y, GUO J J, et al. Effect of the new phase of the Grain for Green Program on grain output on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 419-425.
- [4] 吴普侠,汪晓珍,吴建召,等.中国退耕还林工程固碳现状及固碳潜力估算[J].水土保持学报,2022,36(4):342-349.
WU P X, WANG X Z, WU J Z, et al. Estimation of carbon stock and carbon sequestration potential for China's Grain for Green Project[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 342-349.
- [5] 度阳.黄土高原地区退耕还林(草)工程效果研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
DU Y. Study on effects of SLCP in Loess Plateau[D]. Yangling, Shanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [6] 方月,王云强,宋怡.基于 RS 和 GIS 的陕西省洛川县土地利用类型和植被覆盖变化特征[J].地球环境学报,2024,15(1):118-128.
FANG Y, WANG Y Q, SONG Y. Characteristics of land-use types and vegetation cover changes in Luochuan County of Shaanxi Province based on RS and GIS[J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(1): 118-128.
- [7] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J].中国科学:地球科学,2022,52(6):1010-1020.
PIAO S L, HE Y, WANG X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(6): 1010-1020.
- [8] 戴尔阜,黄宇,吴卓,等.内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J].地理学报,2016,71(1):21-34.
DAI E F, HUANG Y, WU Z, et al. Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 71(1): 21-34.
- [9] SHEVLIKOVA E, STOUFFER R J, MALYSHEV S, et al. Historical warming reduced due to enhanced land carbon uptake [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(42): 16730-16735.
- [10] HASHIM T T, SURATMAN M N, SINGH H R, et al. Predictive model of mangroves carbon stocks in Kedah, Malaysia using remote sensing[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 540(1): e012033.
- [11] 李胡跃,戴全厚,胡泽银,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的贵阳市碳储量时空演变及多情景模拟预测[J].水土保持通报,2024,44(3):441-451.
LI H Y, DAI Q H, HU Z Y, et al. Temporal and spatial evolution of carbon storage in Guiyang city based on PLUS-InVEST model and multi-scenario simulation and prediction[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 441-451.
- [12] KOHESTANI N, RASTGAR S, HEYDARI G, et al. Spatiotemporal modeling of the value of carbon sequestration under changing land use/land cover using InVEST model: A case study of Nour-rud Watershed, Northern Iran[J]. Environment, Development and Sustainability, 2024, 26(6): 14477-14505.
- [13] 胡晓倩.南方红壤丘陵区退耕还林(草)土壤保持和固碳服务及其空间关系影响因素研究[D].长沙:湖南大学,2022.

- HU X Q. Study on soil conservation and carbon sequestration of the Grain for Green Program and its influencing factors in the hilly red soil region of southern China [D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [14] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 329-336.
- YAO N, LIU G Q, YAO S B, et al. Evaluation on effect of conversion from farmland to forest and grassland project on ecosystem carbon storage in loess hilly-gully region based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 329-336.
- [15] 余万洋, 陈怡帆, 方发永, 等. 1980—2020 年贵州省草地空间分布格局演变及驱动力分析[J]. 草业学报, 2024, 33(1): 1-18.
- YU W Y, CHEN Y F, FANG F Y, et al. An analysis of grassland spatial distribution and driving forces of patterns of change in grassland distribution in Guizhou Province from 1980 to 2020[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(1): 1-18.
- [16] 杨永艳, 韦堂梅, 李明泽, 等. 贵州省退耕还林工程监测县生态效益评价[J]. 贵州林业科技, 2023, 51(3): 51-58.
- YANG Y Y, WEI T M, LI M Z, et al. Evaluating ecological benefits on Grain for Green Project (GGP) in Monitoring Counties of Guizhou Province[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2023, 51(3): 51-58.
- [17] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [18] 甄艳, 吴宗攀, 尹志恒, 等. 四川省若尔盖县土地利用时空变化研究[J]. 生态科学, 2022, 41(2): 41-49.
- ZHEN Y, WU Z P, YIN Z H, et al. Study on spatio-temporal change of land use in Zoige County, Sichuan Province[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 41-49.
- [19] 黄钰清, 李骁尧, 于强, 等. 1995—2018 年黄河流域土地利用变化及驱动力分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6): 113-121.
- HUANG Y Q, LI X Y, YU Q, et al. An analysis of land use change and driving forces in the Yellow River Basin from 1995 to 2018[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6): 113-121.
- [20] 刘婉如, 陈春波, 罗格平, 等. 巴尔喀什湖流域土地利用/覆被变化过程与趋势[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1452-1463.
- LIU W R, CHEN C B, LUO G P, et al. Change processes and trends of land use/cover in the Balkhash Lake Basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1452-1463.
- [21] 李慧颖. 基于遥感和 InVEST 模型的辽宁省退耕还林工程生态效应评估[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- LI H Y. The evaluation on ecological effects of the project of returning farmland to forest in Liaoning Province, based on remote sensing and InVEST model[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [22] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于 InVEST 模型的 1999—2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 267-274.
- LIU G, LI G Q, LI J, et al. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274.
- [23] 景晓玮. 基于 InVEST 模型的贵州省生态系统服务计量及价值评估研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.
- JING X W. Research on the measurement and valuation of ecosystem services in Guizhou Province based on the InVEST model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022.
- [24] 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 D R, ZHOU X, YANG S T, 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.
- [25] 侯西勇, 邸向红, 侯婉, 等. 中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1478-1488.
- HOU X Y, DI X H, HOU W, et al. Accuracy evaluation of land use mapping using remote sensing techniques in coastal zone of China[J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(10): 1478-1488.
- [26] 廖艳梅, 尹林江, 韩敏, 等. 贵州省土地利用变化及其生态效应分析[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(9): 25-30.
- LIAO Y M, YIN L J, HAN M, et al. Analysis of land use change and its ecological effects in Guizhou Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(9): 25-30.
- [27] 郜红娟, 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 H J, HAN H Q, ZHANG C Q, 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.
- [28] 许明祥, 王征, 张金, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5405-5415.
- XU M X, WANG Z, ZHANG J, et al. Response of soil organic carbon sequestration to the “Grain for Green Project” in the hilly Loess Plateau region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5405-5415.