

碳达峰背景下遵义市土地利用转型的 生态环境效应及预测

魏媛¹, 陈其²

(1. 贵州财经大学 管理科学与工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州财经大学 公共管理学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: [目的] 研究土地利用转型的生态环境效应及其发展趋势, 为促进土地利用转型、低碳循环发展及实现“双碳”目标提供依据。[方法] 基于贵州省遵义市 2005, 2010, 2015, 2020 年 4 期的土地利用数据, 运用空间分析技术, 对该区土地利用转型的生态环境效应及其发展趋势进行研究。[结果] ① 2005—2020 年土地转型主要表现为碳汇用地之间的相互转换, 以及碳汇用地向碳源用地转型。② 净碳排放量由 2005 年的 5.99×10^5 t 增加到 2020 年的 9.87×10^6 t, 增加了 9.27×10^6 t, 增幅达 1 548.15%。但增量却呈逐渐减少的趋势, 增幅也逐渐降低。③ 遵义市生态系统服务价值量由 2005 年的 7.64×10^{10} 元增加到 2020 年的 7.73×10^{10} 元, 呈波动上升趋势, 共增加了 9.14×10^8 元, 增长率为 1.2%。④ 通过灰色预测模型得出遵义市未来净碳排放量和生态系统服务价值量会持续增加, 且都呈规律上升趋势。[结论] 遵义市在生态环境方面仍面临着不小的压力, 还需加大力度提升生态系统服务价值, 着力实现碳达峰目标。

关键词: 碳达峰; 土地利用转型; 生态环境效应; 灰色预测; 贵州省遵义市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0388-11

中图分类号: S159

文献参数: 魏媛, 陈其. 碳达峰背景下遵义市土地利用转型的生态环境效应及预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 388-398. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20221207.003; Wei Yuan, Chen Qi. Eco-environmental effects and prediction of land use transition for Zunyi City under background of carbon peaking [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 388-398.

Eco-environmental Effects and Prediction of Land Use Transition for Zunyi City Under Background of Carbon Peaking

Wei Yuan¹, Chen Qi²

(1. School of Management Science and Engineering, Guizhou University of

Finance and Economics, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. School of Public

Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: [Objective] The ecological and environmental effects of land use transition and their development trends were analyzed in order to provide a basis for promoting land use transition, low-carbon cycle development, and realizing the goal of “double carbon”. [Methods] We used land use data for Zunyi City of Guizhou Province in 2005, 2010, 2015, and 2020 and spatial analysis technology for this study. [Results] ① Land transformation from 2005 to 2020 was mainly manifested by the interconversion between carbon sink sites and the transformation of carbon sink sites to carbon source sites. ② Net carbon emission increased from 5.99×10^5 tons in 2005 to 9.87×10^6 tons in 2020, an increase of 9.27×10^6 tons (1 548.15%). However, the incremental amount gradually decreased, and the rate of increase gradually decreased. ③ The value of ecosystem services in Zunyi City increased from 7.64×10^{10} yuan in 2005 to 7.73×10^{10} yuan in 2020, showing a fluctuating upward trend, with a total increase of 9.14×10^8 yuan and a growth rate of 1.2%. ④ The gray prediction model showed that the net carbon emissions and ecosystem service value for Zunyi City will continue to

收稿日期: 2022-07-17

修回日期: 2022-08-23

资助项目: 贵州财经大学 2021 年度在校本科生科研项目“碳中和背景下遵义市土地利用转型及其生态环境效应研究”(2021ZXSY43); 中华人民共和国国家商务部联合研究项目“喀斯特贫困山区低碳经济与生态系统耦合协调发展研究”(2016SWBZD12)

第一作者: 魏媛(1976—), 女(汉族), 贵州省毕节市人, 博士, 教授, 从事生态经济与土地资源可持续利用研究。Email: 303836813@qq.com。

通信作者: 陈其(1996—), 男(汉族), 四川省乐山市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源利用与保护。Email: 965264720@qq.com。

increase in the future, with both showing a consistent upward trend. [Conclusion] Zunyi City continues to facing considerable pressure in terms of the ecological environment, and needs to increase efforts to enhance the value of ecosystem services while striving to achieve the goal of carbon peaking.

Keywords: peak carbon dioxide emissions; land use transition; ecological and environmental effects; grey prediction; Zunyi City, Guizhou Province

作为温室气体的主要来源,碳排放正逐渐加剧全球气候变暖,为实现碳达峰、碳中和目标,世界各国正根据自身国情,制定相关政策,实施低碳发展战略。2020年,第75届联合国大会上,中国提出了2030年前达到碳达峰,2060年前实现碳中和的目标^[1]。2022年01月26日,国务院发布《关于支持贵州在新时代西部大开发上闯新路的意见》,在文件中专门提到了贵州要积极推进低碳循环发展。土地作为第二大碳排放源,对实现碳达峰和碳中和目标有着重要的影响作用^[2]。随着城镇化进程加快,土地利用转型造成的碳排放量不断上升。在此背景下,通过转变土地利用方式来降低碳排放量,实现土地资源和社会经济的可持续发展变得重中之重。近年来,随着社会经济的飞速发展,遵义市的城镇化率不断上升,引起城市产业结构变化和土地利用转型,用地转型导致人口剧增、环境恶化、水土污染、乡村地区贫困化等问题愈加严重,土地利用结构不合理、资源紧缺、环境污染必将成为遵义市未来发展面临的危机和挑战。因此,贵州省遵义市作为国家第二批低碳试点城市、国家森林城市、国家园林城市,在土地利用转型过程中如何培育绿色低碳的土地利用模式,改善生态环境,助力双碳目标的实现是值得深入研究的前瞻性问题。

土地利用转型的概念最早由英国利兹大学(The University of Leeds)的Grainger Alan(1995)在其研究以林业为主的国家土地利用时受森林转型假说的启发而提出^[3]。国外主要侧重于土地利用转型的理论研究和以实证来研究土地转型,Barbier^[4]对森林转型理论进行了完善;Popp A^[5]对土地利用转型促进生物能源和气候稳定进行研究;Paradis E^[6]对土地利用转型所造成的东南亚森林的损失和收益进行研究。2003年中国学者龙花楼^[7]将土地利用转型作为研究土地利用/覆被(LUCC)的新途径引入国内,诸多学者基于此开始对中国的土地利用转型进行深入研究。目前,已有国内学者将土地利用转型与乡村转型^[7]、生态服务价值^[8]、三生空间^[9]、生态敏感性^[10]、碳储量等^[11]相结合进行研究,不仅完善丰富了土地利用转型理论,也促进了土地利用转型研究的多元化发展。综上所述,中国学者对土地利用转型的生态环境效应进行的研究多集中于生态服务价值、生态敏感性和生境质量,而基于碳达峰目标结合碳排放

和生态服务价值的视角来探究土地利用转型的生态环境效应的研究还较少。因此,本文以遵义市为研究对象,选取2005,2010,2015,2020年4期的土地利用数据,对遵义市的土地利用转型状况进行分析,并测算了研究期内遵义市土地利用转型的碳排放量和生态系统服务价值量,以此预测2025,2030年遵义市的净碳排放量和生态系统服务价值量。以期为促进遵义市土地利用转型、低碳循环发展及实现“双碳”目标提供一定依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

遵义位于中国西南、贵州北部(106°17'22"—107°26'25"E,27°13'15"—28°04'09"N),是国家第二批低碳试点城市,也是中国西部地区第八经济大城市,区位优势明显,中心城市发展强劲,腹地市场广阔,区县协作密切,红色文化底蕴厚重。属亚热带季风气候,终年温凉湿润。遵义市地处在全国地势第二级阶梯上,地形起伏大,地貌类型复杂。总面积30 762 km²,辖3个区、7个县、代管2个县级市和2个自治县,平均海拔一般在800~1 300 m(图1)。

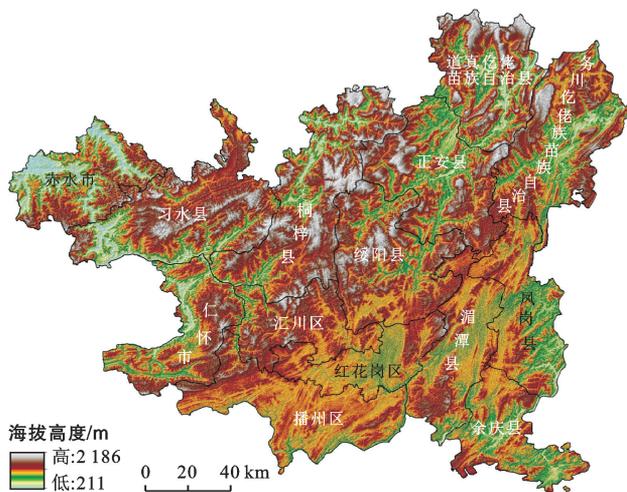


图1 遵义市行政区划及地形图

Fig.1 Administrative division map of Zunyi City

截至2020年,遵义市森林覆盖率为61.22%,城镇化率达56.69%。常住人口为 6.61×10^6 人,GDP达 3.72×10^{11} 元,其中一、二、三产业产值分别为 4.90×10^{10} 元、1 615.60亿元和 1.61×10^{11} 元。全年粮食

播种面积 $6.11 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 粮食总产量 $2.27 \times 10^6 \text{ t}$ 。

1.2 数据来源

遵义市 2005, 2010, 2015, 2020 年的土地利用数据源自 Landsat 系列卫星, 空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$; 并经由 ArcGIS 10.8 软件将遵义市土地分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类; DEM 数据来源于地理空间数据云。遵义市社会经济数据包括农作物、农业生产条件、GDP 等数据均来自于《遵义市统计年鉴》(2006, 2011, 2016, 2021 年)。

2 研究方法

2.1 土地利用转型分析

2.1.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵能够直观地将各个时间段、各种用地之间变化的数量和方向展示出来。计算公式为:

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

式中: S 为土地面积; n 为地类数量; i 表示研究初期的土地利用类型; j 表示研究期末的土地利用类型。

2.1.2 土地利用类型状态指数

$$D_i = (V_{in} - V_{out}) / (V_{in} + V_{out}) \quad (2)$$

表 2 耕地主要碳排放来源及指标

Table 2 Main carbon emission sources and indicators of cultivated land

碳排放来源	农作物总播种面积	化肥施用折纯量	农膜使用量	农业机械总动力	灌溉面积
碳排放转换系数	16.47 kg/hm^2	895.6 kg/t	5.18 kg/kg	0.18 kg/kW	266.48 kg/hm^2

其公式如下:

$$E_g = E_f + E_a + E_i + E_m \quad (4)$$

$$E_g = G_f \times A + (A_a \times B) + (W_a \times C) + A_i \times D + F_m \times E \quad (5)$$

式中: E_g 是耕地的碳排放量; E_f 是耕地使用化肥所致的碳排放量; E_a 是农业生产活动中使用农业机械所致的碳排放量; E_i 是耕地灌溉所致的碳排放量; E_m 是农业中使用地膜的碳排放量。 G_f 是化肥施用折纯量; A_a 是农作物的种植面积; W_a 是农业机械总动力; A_i 是灌溉面积; F_m 是地膜使用量。

2.3.2 耕地碳吸收测算 耕地也是固碳的重要组成部分, 农作物在生长过程中会产生光合作用, 以此促成碳吸收。本文选取遵义市主要农作物进行耕地碳吸收测算^[16], 其公式如下:

$$C_2 = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n c_i \times Y_i \times \frac{1-a_i}{H_i} \quad (6)$$

式中: C_2 表示农作物碳吸收总量; C_i 表示第 i 种农

作物的碳吸收量; c_i 表示第 i 种农作物的碳吸收率; Y_i 表示第 i 种农作物的经济产量; H_i 表示第 i 种农作物的经济系数; a_i 表示第 i 种农作物的平均含水率。农作物经济系数、碳吸收率及平均含水率分别来自李克让等^[17]、王修兰等^[18]、方精云等^[13]学者的研究, 具体见表 3。

2.2 直接碳排放测算

可直接进行碳排放测算的地类主要为碳汇用地, 包括林地、草地、水域和未利用地, 依据前人研究所得的碳排放系数进行测算^[12]。其公式为:

$$C_1 = \sum L_i = \sum S_i \times a_i \quad (3)$$

其中: C_1 为直接碳吸收量; L_i 为第 i 种土地利用类型所产生的碳吸收量; S_i 为第 i 种土地的面积; a_i 为第 i 种土地的碳吸收系数。具体碳吸收系数以及来源见表 1。

表 1 不同土地利用类型的碳排放系数

Table 1 Carbon emission factors for different land types

地类	林地	草地	水域	未利用地
碳排放系数	-0.581	-0.021	-0.025 7	-0.000 5
资料来源	方精云 ^[13]	方精云 ^[13]	方精云 ^[13] 、赖力 ^[14]	赖力 ^[14]

2.3 间接碳排放测算

2.3.1 耕地碳排放测算 耕地既为碳源也为碳汇, 作为碳源, 其主要通过农用地种植等一系列生产活动产生碳排放。本文主要运用排放因子法来测算耕地碳源^[15], 具体系数见表 2。

表 2 耕地主要碳排放来源及指标

Table 2 Main carbon emission sources and indicators of cultivated land

碳排放来源	农作物总播种面积	化肥施用折纯量	农膜使用量	农业机械总动力	灌溉面积
碳排放转换系数	16.47 kg/hm^2	895.6 kg/t	5.18 kg/kg	0.18 kg/kW	266.48 kg/hm^2

作物的碳吸收量; c_i 表示第 i 种农作物的碳吸收率; Y_i 表示第 i 种农作物的经济产量; H_i 表示第 i 种农作物的经济系数; a_i 表示第 i 种农作物的平均含水率。农作物经济系数、碳吸收率及平均含水率分别来自李克让等^[17]、王修兰等^[18]、方精云等^[13]学者的研究, 具体见表 3。

2.3.3 建设用地碳排放测算 建设用地碳排放主要经能源消耗测算, 但遵义市 2005, 2010 年的能源消耗统计不完整, 因此本文采用王桂波等^[19]的测算方法, 运用单位 GDP 能耗与二、三产业产值乘积近似得到建设用地碳排放量。碳排放测算公式为:

$$E_j = \text{GDP}' \times H \times K \quad (7)$$

$$\text{GDP}' = \text{GDP}_2 + \text{GDP}_3 \quad (8)$$

式中: E_j 为建设用地碳排放量; GDP_2 为第二产业 GDP 量; GDP_3 为第三产业 GDP 量; H 为单位 GDP 能耗 ($\text{t}/10^4$) (以标准煤计); 煤炭消耗碳排放系数 $K = 0.747 6 \text{ t/t}$ (以 C 计)。

表 3 主要农作物碳吸收率、经济系数及含水率

Table 3 Carbon uptake, economic coefficients and moisture content of major crops

粮食作物	碳吸收率	经济系数	含水率%	经济作物	碳吸收率	经济系数	含水率%
小麦	0.485	0.40	12	花生	0.450	0.43	10
豆类	0.450	0.34	13	油菜籽	0.450	0.25	10
薯类	0.423	0.70	70	向日葵	0.450	0.30	10
水稻	0.414	0.45	12	烟叶	0.450	0.55	85
玉米	0.471	0.40	13	甘蔗	0.450	0.50	50
高粱	0.450	0.35	13	蔬菜	0.450	0.60	90
其他	0.450	0.40	12	瓜果	0.450	0.70	90

2.4 生态系统服务价值评估

生态系统服务价值的测算方法主要参照谢高地等^[20]所制的中国单位面积生态系统服务价值当量,并根据遵义市的实际情况选取旱地、阔叶、灌草丛、裸地和水系作为单位面积生态系统服务价值当量的参照标准。计算公式如下:

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \tag{9}$$

$$VC_k = \sum (EC_j \times E_a) \tag{10}$$

式中:ESV 为生态系统服务价值; k 为土地利用类型; A_k 是土地利用类型 k 的面积; VC_k 为第 k 类土地利用类型单位面积生态系统服务价值; EC_j 是某类土地利用类型第 j 项生态系统服务价值当量; E_a 为单位面积的生态系统服务价值。

生态系统服务价值当量因子是生态系统潜在服务价值的相对贡献率,该因子等于 $1 \text{ hm}^2/\text{a}$ 粮食价值

的 $1/7$ ^[21]。计算公式如下:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{q_i p_i m_i}{M} \tag{11}$$

式中: E_a 为单位面积耕地生态系统服务价值; n 为耕地产出粮食作物类别总数; i 为耕地产出粮食作物种类数; q_i 为 i 类粮食作物的平均产量; p_i 为 i 类粮食作物的均价; m_i 为 i 类粮食作物的面积; M 为粮食作物的总面积。

考虑到数据的可获得性,本文选取遵义市主要粮食作物(薯类、稻谷和玉米)的相关数据进行计算,2020 年遵义市平均粮食单产为 $3\ 709.84 \text{ kg}/\text{hm}^2$;再由中国农业农村部公布的数据可知 2020 年全国粮食平均收购价格为 $2.47 \text{ 元}/\text{kg}$;由此可计算出遵义市生态系统服务的经济价值为 $1\ 309.04 \text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。最后得到遵义市单位面积生态系统服务价值系数(表 4)。

表 4 遵义市单位面积生态系统服务价值系数

Table 4 Value coefficient of ecosystem services per unit area in Zunyi City

元/ hm^2

生态系统服务功能		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1 112.68	379.62	497.44	1 047.23	0	0
	原料生产	523.62	863.97	733.06	301.08	0	0
	水资源供给	26.18	445.07	405.80	10 851.94	0	0
调节服务	气体调节	877.06	2 840.62	2 578.81	1 007.96	0	26.18
	气候调节	471.25	8 508.76	6 820.10	2 997.70	0	0
	净化环境	130.90	2 526.45	2 251.55	7 265.17	0	130.90
	水文调节	353.44	6 204.85	5 000.53	133 836.25	0	39.27
支持服务	土壤保持	1 348.31	3 468.96	3 141.70	1 217.41	0	26.18
	维持养分循环	157.08	261.81	235.63	91.63	0	0
	生物多样性	170.18	3 154.79	2 853.71	3 338.05	0	26.18
文化服务	美学景观	78.54	1387.58	1256.68	2474.09	0	13.09

2.5 灰色 GM(1,1)预测模型

本文主要运用灰色预测模型对 2025,2030 年的净碳排放量与生态系统服务价值量进行预测,其一阶线性常系数微分方程标准型公式为:

$$\frac{d_x^{(1)}}{d_t} + ax^{(1)} = u \tag{12}$$

GM(1,1)模型对应的标准型解为:

$$x^{(1)} = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \tag{13}$$

式中: a 为发展灰数; u 称为内生控制灰数; t 为时间。

3 结果与分析

3.1 土地利用转型分析

3.1.1 土地利用变化分析 运用 ArcGIS 10.8 软件

对遵义市 2005, 2010, 2015, 2020 年 4 期的土地利用数据进行处理, 得到研究区土地利用变化情况见(图 2, 表 5)。遵义市的用地类型以林地和耕地为主, 草地次之, 其余用地所占比例极少。

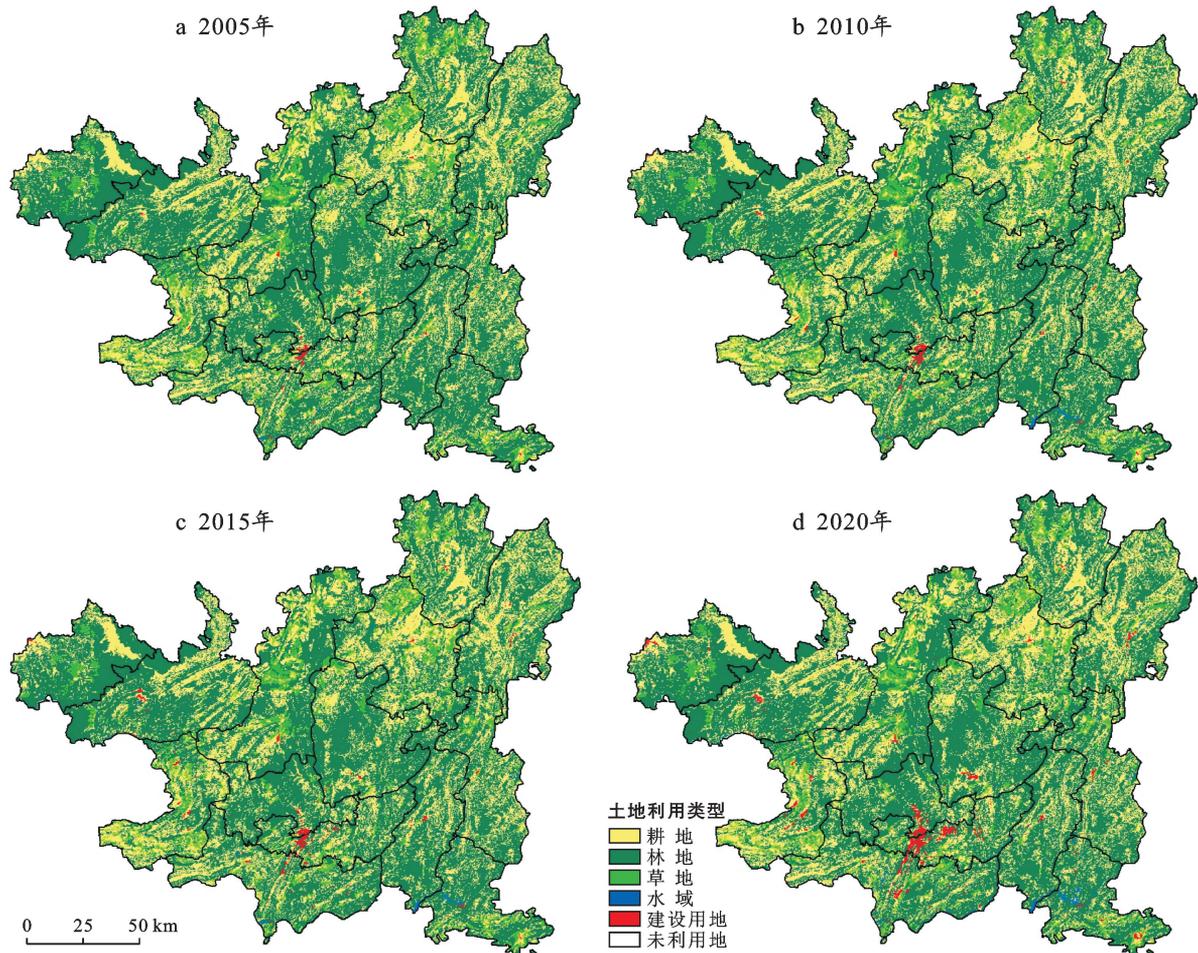


图 2 遵义市 2005—2020 年土地利用变化空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use change in Zunyi City from 2005 to 2020

表 5 遵义市 2005—2020 年土地利用变化

Table 5 Land use change in Zunyi City from 2005 to 2020

项目	地类	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2005—2020 年 变化量	2005—2020 年 变化率%
碳源用地 面积/hm ²	建设用地	8 646	12 596	19 397	35 777	27 131	313.80
	耕地	1 039 728	1 034 020	1 027 936	1 018 504	-21 224	-2.04
	林地	2 153 393	2 158 533	2 157 601	2 145 756	-7 637	-0.35
碳汇用地 面积/hm ²	草地	208 172	202 325	202 139	201 070	-7 102	-3.41
	水域	5 462	7 941	8 297	14 207	8 745	160.11
	未利用地	45	36	50	51	6	13.33

注:本文中耕地既为碳源也为碳汇,但其碳汇作用大于碳源作用。

由图 2 和表 5 可知,遵义市林地集中分布于中东部、西部及东南部;耕地在北部与西部较多;草地除了中部地区较少外,其他地方均有散落分布;建设用地只有南部集中较为明显,其余地方零星散布。2005—2020 年,遵义市耕地、林地和草地都有小幅度的减少,

其中耕地减少了 21 224 hm²,林地减少了 7 637 hm²,草地减少了 7 102 hm²;水域和建设用地均有大幅度提升,其中建设用地增幅最大,达 313.8%,增加了 27 131 hm²,水域增幅达 160.11%,增加了 8 745 hm²;未利用地变化不大。综上所述,建设用地面积表现为

增加,而主要的碳汇用地面积则表现为减少,这可能也是近些年来导致遵义市净碳排放量大幅增长的原因之一。

3.1.2 土地利用转移矩阵分析 基于遵义市 2005—

2020 年的土地利用数据,运用 ArcGIS 10.8 软件作遵义市 2005—2020 年的土地利用转移变化矩阵见表 6,进而得到土地利用转型状况见表 7。

表 6 遵义市 2005—2020 年土地利用转移矩阵
Table 6 Land use transfer matrix of Zunyi City during 2005—2020

地类	2020 年面积						总计
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	
2005 年面积							
草地	170 048	6 940	29	3 779	32	1	180 829
耕地	6 054	861 758	328	48 462	189	1	916 792
建设用地	1 686	14 796	7 250	8 420	33	0	32 185
林地	9 266	49 907	168	1 870 631	329	2	1 930 303
水域	245	2 403	18	5 273	4 327	7	12 273
未利用地	1	1	0	14	0	29	45
总计	187 300	935 805	7 793	1 936 579	4 910	40	3 072 427

表 7 遵义市 2005—2020 年土地利用转型状况
Table 7 Land use transformation status of Zunyi City during 2005—2020

地类	未变化部分	转入部分		转出部分		土地利用类型 状态指数	
		面积	比例/%	面积	比例/%		
碳源用地	建设用地	7 250	24 935	15.72	543	0.34	0.96
	耕地	861 758	55 304	34.87	74 047	46.75	-0.14
碳汇用地	草地	170 048	10 781	6.80	17 252	10.89	-0.23
	林地	1 870 631	59 632	37.60	65 948	41.64	-0.05
	水域	4 327	7 946	5.00	583	0.37	0.86
	未利用地	29	16	0.01	11	0.01	0.19
	总计	2 914 043	158 614	100	158 384	100	—

表 6—7 结果表明,2005—2020 年,除了未利用地无显著变化外,遵义市其他地类均发生了明显转换。建设用地和水域的状态指数分别为 0.96,0.86,均趋近于 1,说明这 15 a 间建设用地和水域转入速度远大于转出速度,处于快速扩张状态;耕地和草地的状态指数为 -0.14 和 -0.23,说明草地和林地的转入速度略小于转出速度,处于少量缩减状态;林地状态指数为 -0.05,趋近于 1,处于比较稳定的状态;未利用地由于其面积较小,相比之下变化不明显。林地、耕地和草地为主要的转出地类。其中林地转出了 65 948 hm²,主要向耕地、建设用地、水域和草地转换了 48 462,8 420,5 273,3 779 hm²,分别占总转面积的 73.49%,12.77%,8%和 5.73%。耕地转出了 74 047 hm²,主要向林地、建设用地、草地和水域转换了 49 907,14 796,6 940,2 403 hm²,分别占 67.4%,19.98%,9.37%和 3.25%。草地转出了 17 252 hm²,主要向林地、耕地和建设用地转换了 9 266,6 054,1 686 hm²,分别占 53.48%,35.09%和 9.77%。

除未利用地之外,其余地类均有明显的转入。其中林地共承接了 59 672 hm² 的土地,主要由耕地和

草地贡献了 49 907,9 266 hm²,分别占总转入面积的 83.64%和 15.53%。耕地共承接了 55 034 hm² 的土地,主要由林地和草地贡献了 48 462,6 054 hm²,分别占 88.06%和 11%。草地共承接了 10 781 hm² 的土地,主要由耕地和林地贡献了 6 940,3 779 hm²,分别占 64.37%和 35.05%。建设用地共承接了 24 935 hm² 的土地,主要由耕地、林地和草地贡献了 14 796,8 420,1 686 hm²,分别占 59.34%,33.77%和 6.76%。水域共承接了 7 946 hm² 的土地,主要由林地和耕地贡献了 5 273,2 403 hm²,分别占 66.36%和 30.24%。

综上所述,遵义市 2005—2020 年除了碳汇用地之间的相互转型外,则主要表现为碳汇用地向碳源用地的转型,最为明显的便是作为碳汇用地的林地、耕地和草地大幅转型为碳源用地建设用地,碳源用地面积的剧增直接导致了遵义市近些年来净碳排放量大幅增加。中国在“十四五”规划中提出,要提升生态系统的碳汇能力,在此条件下,遵义市需遏制碳汇用地向碳源用地的转型,并引导其他用地向主要的碳汇用地转型,以此提升生态系统的碳汇能力。

3.2 土地利用碳排放效应分析

基于遵义市 2005—2020 年土地利用的相关数

据,通过直接、间接碳排放测算得到遵义市碳排放情况见表 8。

表 8 遵义市 2005—2020 年碳排放、碳吸收及净碳排放量

Table 8 Carbon emissions, carbon absorption and net carbon emissions of Zunyi City from 2005 to 2020

10⁴ t

年份	碳源		碳排放总量	碳汇				碳吸收总量	净碳排放量
	建设用地	耕地		林地	草地	水域	农作物		
2005	453.46	23.55	477.01	125.11	0.44	0.01	291.58	417.14	59.87
2010	915.96	22.91	938.87	125.41	0.42	0.02	269.25	395.11	543.76
2015	1 253.45	31.00	1 284.46	125.36	0.42	0.02	299.46	425.26	859.20
2020	1 315.73	31.64	1 347.37	124.67	0.42	0.04	235.49	360.62	986.75

注:由于未利用地的碳吸收量微乎其微,这里将其忽略不计。

由表 8 测算结果可知,建设用地为遵义市的主要碳源,碳排放占比一直高于 95%。2005—2020 年,建设用地和耕地碳排放均呈增加趋势,其中建设用地碳排放量由 4.53×10^6 t 增加到 1.32×10^7 t,增幅高达 190.15%;耕地碳排放量由 2.36×10^5 t 增加到了 3.16×10^5 t,增幅达 34.35%,但在 2005—2010 年有 2.72% 的跌幅。碳排放总量也呈递增趋势,由 2005 年的 4.77×10^6 t 增加到 2020 年的 1.35×10^7 t,增幅高达 182.46%。这与近 15 a 来,遵义市社会经济飞速发展,建设用地大幅扩张密切相关。

在碳汇用地中,农作物与林地是主要的碳汇,其中农作物碳吸收占比维持在 70% 左右,林地碳吸收约占 30%;草地、水域及未利用地的碳汇作用不太明显。2005—2020 年,农作物碳吸收量起伏不定,但总体减少了 5.61×10^5 t,减少了约 19.24%;林地碳吸收总量变化幅度不大,只减少了 4 400 t,减少率为 0.35%。总体来看,碳吸收总量减少了 5.65×10^5 t,跌幅达

13.55%。这可能是由于遵义市近些年社会经济的快速发展,农作物种植的种类进行了变更,致使农作物的碳吸收能力下降。总体来看,2005—2020 年遵义市净碳排放量快速增加,由 2005 年的 5.99×10^5 t 增加到 2020 年的 9.87×10^6 t,增加了 9.27×10^6 t,增幅达 1 548.15%。但增量却呈逐渐减少的趋势,2005—2010 年增加了 4.84×10^6 t,2010—2015 年增加了 3.15×10^6 t,2015—2020 年只增加了 1.28×10^6 t,增幅也逐渐降低。这说明近些年遵义市越来越重视生态环境问题,低碳政策得到了很好的贯彻实行。随着中国“双碳”目标的提出,遵义市在低碳发展方面虽取得了不错的进展,但距离 2030 年碳达峰,2060 年实现碳中和仍有不小的差距,因此如何优化土地利用结构,减少碳排放,是遵义市未来亟须解决的问题。

3.3 土地利用变化的生态系统服务价值分析

基于遵义市 2005—2020 年 4 期的土地利用数据,测算得到遵义市生态系统服务价值量见表 9。

表 9 遵义市 2005—2020 年生态系统服务价值量

Table 9 Value of ecosystem services in Zunyi City during 2005—2020

土地利用类型	生态系统服务价值/10 ⁴ 元				变化量/10 ⁴ 元	变化率/%
	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2005—2020 年	2005—2020 年
耕地	545 778.34	542 781.76	539 588.28	534 637.25	-11 141.09	-2.04
林地	6 469 327.21	6 484 767.25	6 481 966.99	6 446 381.67	-22 945.54	-0.35
草地	536 563.02	521 491.86	521 013.73	518 258.64	-18 304.38	-3.41
水域	89 817.43	130 575.97	136 418.11	233 600.30	143 782.87	160.08
未利用地	1.18	0.94	1.32	1.35	0.17	14.41
合计	764 1487.18	7 679 617.77	7 678 988.43	7 732 879.20	91 392.02	1.20

总体来看,2005—2020 年遵义市生态系统服务价值量由 2005 年的 7.64×10^{10} 元增加到 2020 年的 7.73×10^{10} 元,共增加了 9.14×10^8 元,增幅为 1.2%。其中林地、草地和耕地的生态系统服务价值分别减少了 2.29×10^8 , 1.83×10^8 , 1.14×10^8 元,分别减少了

0.35%, 3.41% 和 2.04%, 减少幅度不大;水域生态系统服务价值增幅明显,达 160.08%,增长了 1.44×10^9 元;未利用地无明显变化。以比例来看,林地所占生态系统服务价值总量的比例最高,达 83% 以上,耕地和草地均占 7% 左右,且此 3 类用地都有下降趋势;

只有水域占比由 1% 增长到 3%; 未利用地占比极小。林地、耕地和草地这 3 类生态用地为主要的转出地类, 均有向非生态用地转型, 这直接导致生态系统服务价值量减少。

3.4 土地利用转型对生态环境效应的作用机制

3.4.1 理论框架构建 土地利用转型表现为人类活动所导致的土地属性的变化^[22]。为探究土地利用转型方式对生态环境效应的影响机制, 基于前人的研究

成果构建理论框架见图 3。本文将土地类型分为碳汇用地和碳源用地^[23], 生态用地和非生态用地^[24]。碳汇用地主要表现为可进行碳吸收的地类, 即耕地、林地、草地、水域和未利用地; 碳源用地表现为进行碳排放的地类, 即建设用地。生态用地为包含生态系统服务价值的地类, 按其生态系统服务价值系数大小依次为: 水域 > 林地 > 草地 > 耕地 > 未利用地; 非生态用地为不含生态系统服务价值的地类, 即建设用地。

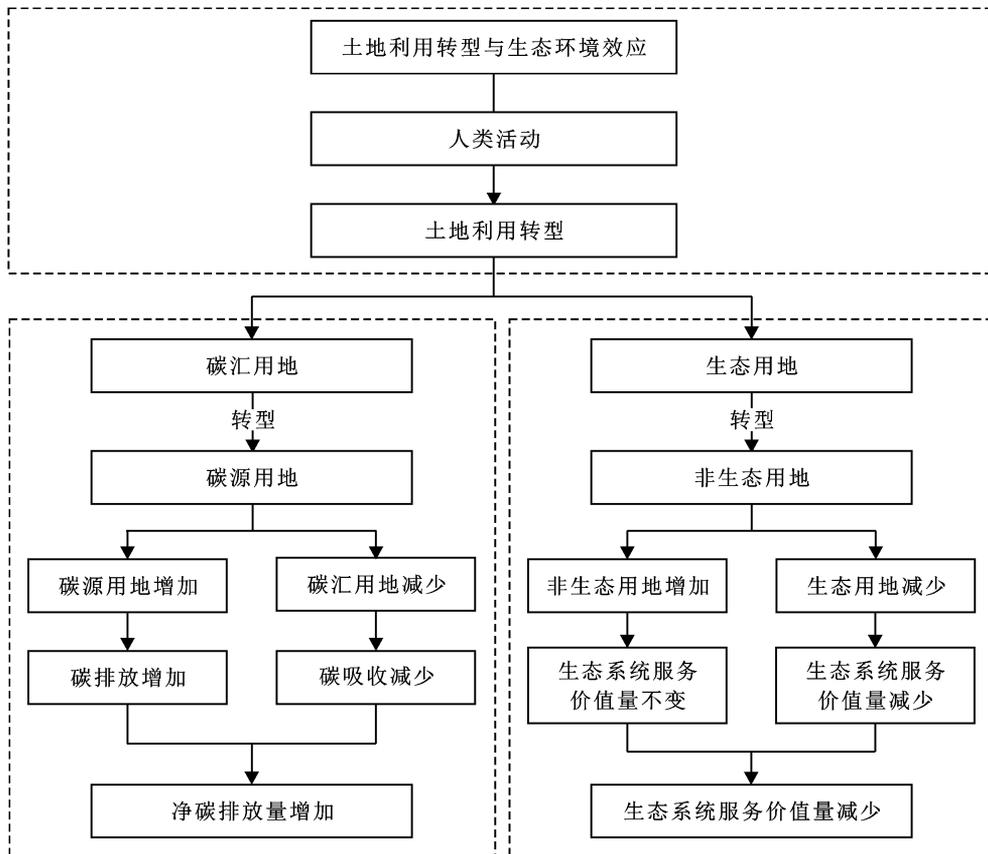


图 3 土地利用转型对生态环境效应影响的理论框架

Fig.3 Framework of the impact of land use transformation on ecological and environmental effects

3.4.2 土地利用转型方式对碳排放的影响 为进一步明晰土地利用转型对碳排放的影响, 对土地利用转型面积较大的 11 种转型路径的碳排放效应进行分析。由图 4 可知, 耕地转为建设用地、林地转为建设用地及草地转为建设用地所带来的碳排放变化最为明显, 分别增加了 5.47×10^{10} , 3.10×10^{10} , 6.20×10^9 t。其余均为碳汇用地之间的相互转移, 相比之下, 增量与减量都不明显。综上所述, 在碳汇用地相互转移造成碳排放与碳吸收量增减不明显的前提下, 耕地、林地和草地等碳汇用地向碳源用地转移, 造成碳汇用地面积减少, 碳源用地面积剧增, 加剧碳排放量增加, 最终导致了净碳排放量的增加。

3.4.3 土地利用转型方式对生态系统服务价值的影响 以图 5 来看, 土地利用转型也对生态系统服务价值产生了重要影响, 且不同地类之间的转型对其影响程度各异。2005—2020 年, 生态用地向非生态用地转移分别造成了 2.53×10^8 , 7.77×10^7 , 4.35×10^7 元生态系统服务价值的损失, 生态系统服务价值系数高的地类向生态系统服务价值系数低的地类转移分别导致了 1.20×10^9 , 2.53×10^8 , 1.24×10^8 , 1.61×10^7 元生态系统服务价值的损失。而生态系统服务价值系数低的地类向生态系统服务价值系数高的地类转移, 分别使生态系统服务价值量增加了 1.24×10^9 , 7.09×10^8 , 3.83×10^8 , 1.42×10^8 , 3.95×10^7 元。生态用地

向非生态用地转移虽然造成了生态系统服务价值的损失,但其幅度低于生态系统服务价值系数低的地类向生态系统服务价值系数高的地类转移所带来的增量,因此,2005—2020 年遵义市土地利用转型的生态系统服务价值是呈增加态势的。

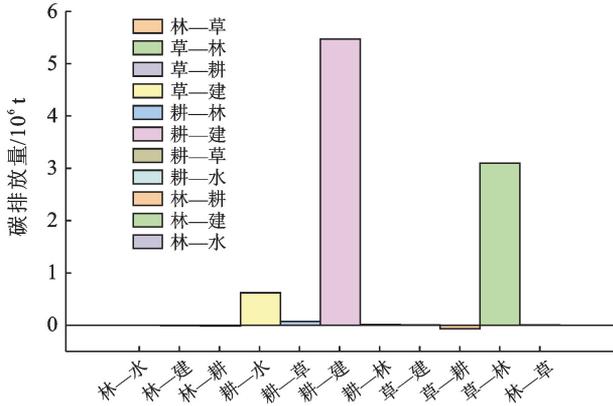


图 4 遵义市 2005—2020 年土地利用转型的碳排放量
Fig.4 Carbon emissions of land use transition in Zunyi City from 2005 to 2020

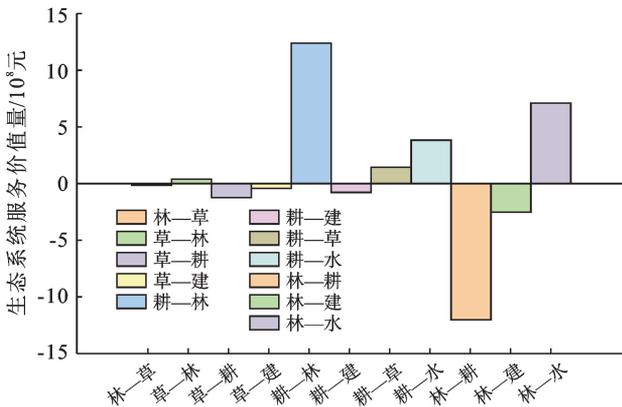


图 5 遵义市 2005—2020 年土地利用转型的生态系统服务价值

Fig.5 Value of ecosystem services in land use transition in Zunyi City from 2005 to 2020

3.5 生态环境效应预测分析

3.5.1 碳排放预测分析 以遵义市 2005—2020 年净碳排放量为基础,运用灰色 GM(1,1)模型预测遵义市 2025,2030 年的净碳排放量。具体构建结果见表 10。

表 10 碳排放灰色预测模型构建结果

Table 10 Construction results of carbon emission gray prediction model

发展系数 a	灰色作用量 u	后验差比 C 值	小误差概率 p 值
-0.121 9	1 347.901 1	0.015 1	1.000

经检验,得出后验差比 C 值小于 0.35,小误差概率 p 也大于 0.95,说明该模型精度很高。遂建立模型:

$$x^{(1)} = 11\ 117.3e^{0.121\ 9t} - 11\ 057.43 \quad (14)$$

遵义市 2005—2030 年净碳排放量趋势如图 6 所示。由图 6 可知,遵义市未来净碳排放量还会持续增加,到 2025 年达到 1.27×10^7 t,2030 年达到 1.57×10^7 t。预测结果表明,遵义市 2005—2030 年的净碳排放量呈快速增加趋势,且在 2005—2010 年增幅达到最高,其余时间段均呈现出规律上升态势。

遵义市 2005—2020 年净碳排放量实际值虽也呈上升趋势,但明显可以看到每个阶段的上升幅度在逐渐放缓。这说明在理论状态下,遵义市按照目前的社会经济条件照常发展下去,净碳排放量还会持续增加,到 2030 年远不能达到峰值;但通过与实际情况相对比可知,在国家低碳政策的引领下,生产生活方式逐渐发生转变,人们的低碳意识不断提高,净碳排放量增幅得到明显控制,照此趋势发展下去,遵义市至 2030 年有望实现碳达峰目标。国发 2 号文件中提到了贵州省要积极推进低碳循环发展,因此,遵义市在未来的发展规划中,必须更快地转变发展方式,加大力度推进绿色低碳循环发展,以减少碳排放,助力实现“双碳”目标。

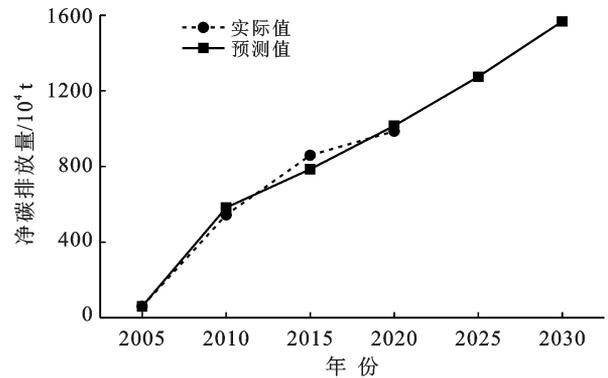


图 6 遵义市 2005—2030 年净碳排放量变化趋势

Fig.6 Changes in net carbon emissions in Zunyi City from 2005 to 2030

3.5.2 生态系统服务价值预测分析 基于遵义市 2005—2020 年生态系统服务价值量,运用灰色 GM(1,1)模型预测遵义市 2025,2030 年的生态系统服务价值量,其构建结果见表 11。

表 11 生态系统服务价值灰色预测模型构建结果

Table 11 Results of grey prediction model for ecosystem service value

发展系数 a	灰色作用量 u	后验差比 C 值	小误差概率 p 值
-0.003 5	7 630 760.762 2	0.116 5	1.000

经检验,得出后验差比 C 值小于 0.35,小误差概率 p 也大于 0.95,说明该模型精度很高,遂建立该模型如下。

$$x^{(1)} = 2\ 187\ 858\ 847.81e^{0.003\ 5t} - 2\ 180\ 217\ 360.63 \quad (15)$$

综上可得遵义市 2005—2030 年生态系统服务价值量预测趋势见图 7。

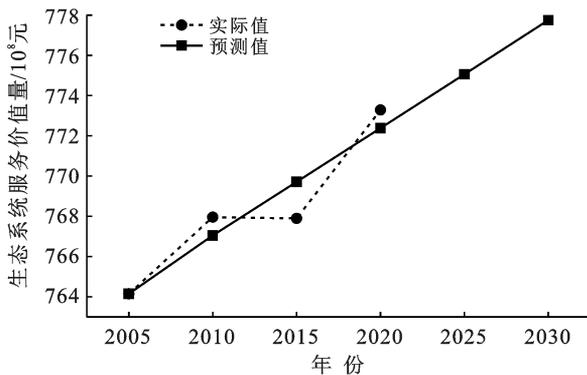


图 7 遵义市 2005—2030 年生态系统服务价值量变化趋势

Fig.7 Trends in the value of ecosystem services in Zunyi City from 2005 to 2030

由图 7 可知,遵义市未来生态系统服务价值量会持续增加,2025 年预计达 7.75×10^{10} 元,2030 年达 7.78×10^{10} 元。其中 2020—2025 年增加 2.68×10^8 元,增幅达 0.35%;2025—2030 年增加 2.69×10^8 元,增幅也约为 0.35%。通过与实际值对比可知,遵义市 2005—2020 年的生态系统服务价值量呈波动上升趋势,而预测值则会在保持现有影响或政策等因素不变的情况下呈稳定上升趋势。这说明遵义市生态系统服务价值量在现实中会受到各种主观因素影响和政策因素而产生波动,但最终都会有所上升。所以在未来的发展中,遵义市除了继续实施现有的相关生态政策,还需规划好各类用地,保护好生态用地,促进生态系统服务价值稳中有升。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 2005—2020 年,作为遵义市主要碳排放源的建设用地面积增加了 $27\ 131\ \text{hm}^2$,增幅达 313.8%;而作为主要碳汇用地的耕地、林地和草地面积减少了 $21\ 224,7\ 637,7\ 102\ \text{hm}^2$ 。在土地转型方面,主要表现为碳汇用地之间的相互转换,以及碳汇用地林地、耕地和草地向碳源用地建设用地转型。

(2) 遵义市 2005—2020 年的碳排放总量呈递增趋势,由 $4.77 \times 10^6\ \text{t}$ 增加到 $1.35 \times 10^7\ \text{t}$,增幅高达 182.46%。碳吸收总量则起伏不定,但总体减少了 $5.65 \times 10^5\ \text{t}$,跌幅达 13.55%。净碳排放量由 2005 年的 $5.99 \times 10^5\ \text{t}$ 增加到 2020 年的 $9.87 \times 10^6\ \text{t}$,增加了 $9.27 \times 10^6\ \text{t}$,增幅达 1 548.15%。但增量却呈逐渐减

少的趋势,增幅也逐渐降低。通过灰色预测模型得出遵义市未来净碳排放量将会持续增加,到 2025 年达到 $1.27 \times 10^7\ \text{t}$,2030 年达到 $1.57 \times 10^7\ \text{t}$,预测值在 2010 年后呈规律上升趋势。这是在现行经济发展状况下会达到的理论预测值,通过与实际值相对比可知,在实际发展过程中可以通过各种不确定因素,改善预测情况从而减缓净碳排放量增速,以逐渐实现碳达峰目标。

(3) 遵义市 2005—2020 年生态系统服务价值量由 7.64×10^{10} 元增加到 7.73×10^{10} 元,共增加了 9.14×10^8 元,增长率为 1.2%,说明遵义市近些年实施的生态建设、环境保护等政策初见成效,生态用地得到优化配置,生态系统服务价值总量稍有上升。通过灰色预测模型可知遵义市生态系统服务价值量到 2025 年预计达 7.75×10^{10} 元,2030 年达 7.78×10^{10} 元,增幅约为 0.7%,说明遵义市保持现有的社会经济条件和相关政策继续发展下去的话,生态系统服务价值总量会呈规律上升趋势,但增幅实则较低。就土地而言,其碳排放与生态系统服务价值之间存在一定的关联性,优化土地利用模式,减缓碳排放在一定程度上也可以提升生态系统服务价值。所以受未来众多不确定性因素,如“双碳”目标、生态环境政策、生态理念的影响,遵义市生态系统服务价值总量的增幅可能更大。

4.2 对策建议

全球将全面进入到“碳中和”时代,各国也将努力到 21 世纪中叶实现碳中和。在 2021 年的生态文明贵阳国际论坛上,贵州省做出承诺要为切实履行碳达峰碳中和责任做出贡献。而遵义市作为贵州省第二大经济体、国家第二批低碳试点城市,必将依托其现实基础,结合特色产业,走绿色低碳循环发展的道路,助力实现“双碳”目标。因此,本文根据上述研究结果,提出建议如下。

(1) 促进土地利用转型升级,培育绿色低碳的土地利用模式。近些年,遵义市的碳汇用地逐渐减少,碳源用地逐渐增加,使得净碳排放量大幅增加。国发 2 号文件中提到,要巩固森林生态系统碳汇能力,发挥森林固碳效益。因此,遵义市在未来的土地利用规划中,应稳定碳汇用地尤其是林地的数量,保障其质量,保持并不断提升森林的固碳能力。在国务院发布的 2030 年前碳达峰行动方案中指出,要推进城乡建设绿色低碳转型。随着社会经济的快速发展,建设用地扩张虽不可避免,但遵义市可以推进建设用地节约集约利用,将低碳理念融入规划设计中,促进土地高效利用,以此控制建设用地的规模。

(2) 增加碳吸收,减少碳排放。耕地和林地作为遵义市主要的碳汇,除了增加其用地面积之外,还需提升林地质量,改善耕地的种植模式,发展低碳农业,以此提升耕地和林地的碳吸收能力。国发 2 号文件指出,贵州省要加快推动煤炭清洁高效利用,积极发展新能源。建设用地作为主要的碳汇,其碳排放主要源于能源消耗,遵义市可以依据现实情况,大力开发水能、地热、风能、太阳能、生物质能、液化天然气和页岩气等新能源,以代替传统能源消耗品,逐渐形成绿色低碳能源消耗体系;同时,对于不可替代的传统能源,可以通过引进先进技术或自身进行技术革新,以提高能源的使用效率,减少能耗。

(3) 逐渐建立起碳汇交易市场。通过碳汇交易,可以增强林地的碳汇能力,有效减少碳排放。早于 1992 年,在联合国环境与发展大会上便提出了碳汇交易。而中国的碳排放交易市场建设在 2011 年才开始起步,至 2021 年,中国碳排放权交易体系才正式启动^[25]。贵州省第十三次党代会上提出,要坚持“碳减排”与“碳增汇”并举,用好碳排放权交易等政策,不断增强生态系统碳汇、固碳能力。遵义市的碳汇交易发展尚未成型,到 2022 年,遵义市赤水市才完成了贵州省首笔以会议排放卖出的碳汇交易。随着“双碳”目标的提出,碳汇交易必将得到迅速发展,遵义市应主动抓住这个机会,逐渐建立碳汇交易市场,完善碳汇交易机制,丰富碳汇交易产品,以抵消碳排放,促进经济向低碳循环发展转型,助力实现“双碳”目标。

(4) 保护好林地、草地、水域等生态用地,提升其数量与质量。土地利用转型会引起生态系统服务价值量的变化,而林地是对遵义市生态系统服务价值贡献最多的地类。国发二号文件中也指出,要改善提升自然生态系统质量,实施森林质量精准提升工程,深入开展国家储备林建设,加快低效林改造,这对提升遵义市生态系统服务价值也有着重要影响。

[参 考 文 献]

- [1] 李俊峰,李广.碳中和:中国发展转型的机遇与挑战[J].环境与可持续发展,2021,46(1):50-57.
- [2] 魏媛,简小玉.基于碳达峰碳中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J].生态经济,2022,38(4):108-114.
- [3] Grainger A. National land use morphology: Patterns and possibilities [J]. Geography,1995,80(3):235-245.
- [4] Barbier E B, Burgess J C, Grainger A. The forest transition: Towards a more comprehensive theoretical framework [J]. Land Use Policy, 2010,27(2):98-107.
- [5] Popp A, Rose S K, Calvin K, et al. Land-use transition for bioenergy and climate stabilization: Model comparison of drivers, impacts and interactions with other land use based mitigation options [J]. Climatic Change, 2014,123(3):495-509.
- [6] Paradis E. Modelling transition in land cover highlights forest losses and gains in Southeast Asia [J]. Biodiversity and Conservation, 2020,29(8):2539-2551.
- [7] 龙花楼.论土地利用转型与乡村转型发展[J].地理科学进展,2012,31(2):131-138.
- [8] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].地理研究,2015,34(4):691-700.
- [9] 司晓君,崔佳.中原城市群“三生”用地转型及其生态环境效应[J].水土保持通报,2022,42(2):284-290.
- [10] 韦绍音,陆汝成,林晓楠,等.基于土地利用转型的广西边境地区生态服务功能交叉敏感性分析[J].水土保持研究,2022,29(3):308-316.
- [11] 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.
- [12] 李颖,黄贤金,甄峰.江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J].农业工程学报,2008,24(S2):102-107.
- [13] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [14] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].江苏南京:南京大学,2010.
- [15] 李波,张俊彪,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [16] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(5):203-208.
- [17] 李克让.土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M].北京:气象出版社,2002.
- [18] 王修兰.二氧化碳、气候变化与农业[M].北京:气象出版社,1996.
- [19] 王桂波,南灵.陕西省土地利用碳排放效应时空差异分析[J].资源与产业,2012,14(1):124-130.
- [20] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [21] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [22] 宋小青.论土地利用转型的研究框架[J].地理学报,2017,72(3):471-487.
- [23] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J].中国土地科学,2022,36(6):100-112.
- [24] 林彤,冯兆华,吴大放,等.基于 FLUS 模型的喀斯特地区生态用地时空变化及多情景预测:以湖南省宁远县为例[J].水土保持通报,2022,42(2):219-227.
- [25] 许丁,张卫民.基于碳中和目标的森林碳汇产品机制优化研究[J].中国国土资源经济,2021,34(12):22-28.