

DOI: 10.5846/stxb202208192384

罗丹,周忠发,陈全,张露,吴岚,伍堂银.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.生态学报,2023,43(9):3500-3516.
Luo D, Zhou Z F, Chen Q, Zhang L, Wu L, Wu T Y. Responses of carbon storage to land use pattern in karst area: A case study of Nanbei Panjiang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3500-3516.

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

罗 丹^{1,2}, 周忠发^{1,2,*}, 陈 全^{1,3}, 张 露^{1,2}, 吴 岚^{1,2}, 伍堂银^{1,2}

1 贵州师范大学喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵阳 550001

2 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001

3 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

摘要:喀斯特地区生态系统脆弱,对气候变化响应敏感,空间异质性强,碳汇潜力大。喀斯特生态治理对土地利用格局的改变,会导致生态系统碳储量的显著变化,对陆地生态系统碳循环和区域生态安全具有深远影响。以喀斯特典型区南北盘江流域为例,运用 InVEST 模型和热点分析评估流域 2000—2020 年土地利用变化对碳储量时空分布的影响,根据碳储量集聚特征使用 FLUS-Markov 模型分区预测生态系统碳储量对不同土地利用模式的响应。结果表明:(1)2000—2020 年,研究区土地利用类型由高碳密度的地类转为较低碳密度的地类,致使生态系统碳储量呈减少趋势,累计损失 $90.36 \times 10^5 \text{ t C}$ 。(2)2000—2020 年碳储量在空间上呈现“西低东高”的格局。热点区集中分布在东部和东南部,冷点区主要分布在西部和西南部,弱显著区大多在北部。(3)各热点分区在不同模式下固碳能力差异显著。热点区在不同模式下的平均碳密度均大于 155.40 t/hm^2 ,显著高于 2020 年南北盘江流域的平均碳密度 143.59 t/hm^2 ,整体固碳功能突出;弱显著区的碳汇能力与研究区平均水平相近,自然发展模式 (NDP) 和经济建设模式 (ECP) 下碳储量损失较少;冷点区在 NDP、ECP 下碳储量损失剧烈,但在生态保护模式 (EPP) 下碳汇增加速率为 $1.38 \times 10^5 \text{ t/a}$,明显高于弱显著区 ($0.30 \times 10^5 \text{ t/a}$),碳汇潜力较大。总体上,EPP 影响下的土地利用格局固碳能力优于 NDP 和 ECP。该研究可为喀斯特地区土地利用格局优化和生态系统管理提供科学依据。

关键词:土地利用变化;生态系统碳储量;InVEST 模型;FLUS-Markov 模型;南北盘江流域

Responses of carbon storage to land use pattern in karst area: A case study of Nanbei Panjiang River Basin

LUO Dan^{1,2}, ZHOU Zhongfa^{1,2,*}, CHEN Quan^{1,3}, ZHANG Lu^{1,2}, WU Lan^{1,2}, WU Tangyin^{1,2}

1 School of Geography and Environmental Sciences/School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China

3 State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China

Abstract: As we all know, karst areas have fragile ecosystems with strongly spatial heterogeneity and large carbon sink potential, which is sensitive to climate change. The change of land use pattern caused by karst ecological governance will lead to significant changes in ecosystem carbon storage, which has far-reaching impacts on the carbon cycle of the terrestrial ecosystem and regional ecological security. Take the Nanbei Panjiang River Basin in the typical karst area as an example, the InVEST model and hotspot analysis were used to assess the impacts of land use change on the spatial and temporal distribution of carbon stocks in the Nanbei Panjiang River Basin from 2000 to 2020. At the same time, the FLUS-Markov

基金项目:贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 302);贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础[2020]Y154);国家自然科学基金(41661088);贵州省自然资源厅项目-贵州省不动产经济运行评审体系建设项目(HXDZB-022)

收稿日期:2022-08-19; 采用日期:2023-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fa6897@163.com

model was used to predict the changes of ecosystem carbon storages under different land use patterns, according to the characteristics of carbon storage agglomeration. Research results showed that: (1) from 2000 to 2020, the land use type in the study area has changed from high carbon density to low carbon density, resulting in a cumulative loss of 90.36×10^5 t in ecosystem carbon storage. (2) Carbon storage presented a spatial pattern of “low in west and high in east” area. Hot spots were concentrated in the east and southeast study area, while cold spots were mainly distributed in the west and southwest and weak significant areas were mostly in the north area. (3) Under different patterns, the carbon fixation capacities of each hot spots were significantly different. The average carbon density of hot spots was more than 155.40 t/hm^2 , which was obviously higher than the average carbon density of Nanbei Panjiang River Basin (143.59 t/hm^2) in 2020. At the same time, the carbon sink capacity of the weakly significant area was close to the average level of the study area, and the carbon storage loss was less under Natural Development Pattern (NDP) and Economic Development Pattern (ECP). On the one hand, the carbon storage loss was severe in cold spot area under NDP and ECP, on the other hand the carbon sink increase rate was $1.38 \times 10^5 \text{ t/a}$ under Ecological Protection Pattern (EPP), which was significantly higher than the weakly significant area ($0.30 \times 10^5 \text{ t/a}$). In general, it means that the carbon fixation capacity of land use pattern under the influence of EPP is better than that of NDP and ECP. This study can provide some scientific basis for the optimization of land use pattern and ecosystem management in karst areas.

Key Words: land use change; ecosystem carbon storage; InVEST model; FLUS-Markov modle; Nanbei Panjiang River Basin

大气 CO_2 浓度升高影响全球气候变化, 由此导致的环境问题, 将给人类的生存和发展带来巨大威胁和挑战^[1]。减少碳源、增加碳汇是实现人类社会可持续发展亟待解决的难题, 引起社会的广泛关注。陆地生态系统具有强大的碳汇功能, 在全球气候变化和碳循环中起着举足轻重的作用^[2]。土地利用变化是影响陆地生态系统碳储量变化的主要驱动因素之一^[3-5], 作用于各生态系统的植被生物量碳库和土壤碳库, 进而影响区域的碳储量及整个生态系统碳循环过程^[6]。然而土地利用变化具有高度不确定性, 因此开展生态系统碳储量对土地利用变化响应的定量化分析, 成为科学认识人类活动对生态系统服务作用机制务必解决的核心问题之一^[7], 也是区域实现生态系统科学管理和可持续发展的前提^[8], 对于缓解全球变暖具有重要意义。

近年来, 国内外学者针对土地利用变化对不同生态系统碳汇功能的影响和耦合关系展开了积极的探究。国际上, Bhan Manan 等量化了全球热带地区植被覆盖度和生物碳储量的经验关系^[9]; Decena 等探讨热带泥炭地土地利用转换对碳储量和泥炭性质的影响^[10]。在国内, 有学者关注到我国西北干旱区土地利用转换的类型和面积不同, 对生态系统固碳功能存在显著差异^[11]。以往研究证明土地利用变化对生态系统碳储量具有重要影响, 且陆地生态系统的碳汇功能存在显著的空间异质性。朴世龙等学者认为我国碳汇主要分布在中国南部^[12], 喀斯特作为中国南方的主要地貌类型之一, 蕴藏着巨大的碳汇潜力^[13-14]。张珍明等采用网格法测得喀斯特小流域不同土地利用类型的土壤有机碳储量和分布特征^[15]; 胡芳等通过样地调查估算了广西喀斯特地区不同林龄森林生态系统的碳储量^[16]。以上研究通过样方法和实验法充分证明了喀斯特地区生态系统具有强大的固碳能力, 但是在在大尺度背景下开展生态系统碳储量时空演变规律和趋势的研究较少。目前, 模拟预测未来土地格局对生态系统碳储量的影响逐渐成为该领域的研究热点, 为估算碳汇潜力提供了数据支撑, 但是部分中大尺度研究未重视区域内部的异质性和深究导致差异的原因, 及其对未来生态系统碳储量造成的影响。

南北盘江流域是珠江的上游, 位于中国南方喀斯特地区, 生态系统脆弱, 石漠化面积高达 $1.46 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 是珠江流域石漠化分布最广、问题最严重的区域^[17], 人类不合理的开发活动, 加剧了人地矛盾。南北盘江流域是珠江的重要生态屏障, 其固碳能力直接影响珠江流域的生态安全。自 2000 年始, 该地区开展了“珠江上游南北盘江石灰岩地区水土保持综合治理试点工程”(以下简称“珠治工程”)、石漠化综合治理专项工程等生

态修复措施^[18],实现了石漠化由增到减的转型^[19],显著提高了土地的碳汇能力^[20];土地格局也发生了较大改变,生态系统碳汇功能的不确定性增加。

流域是一个多功能的综合生态系统,从流域尺度分析并解决环境问题是切实可行的有效途径^[21]。因此本文选择南北盘江流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期土地利用数据,利用 InVEST 模型评估研究区碳储量的大尺度时空演变特征,探讨土地利用变化对生态系统碳储量的影响,对于有效评估我国喀斯特地区生态系统碳汇潜力,制定温室气体减排政策具有重要参考价值 and 意义。喀斯特地形起伏大,发育众多微地貌,内部差异显著,本文使用 FLUS-Markov 模型根据热点分区预测自然发展模式、生态保护模式和经济建设模式下的土地格局和固碳潜力,针对分区特点提出针对性的发展建议,以期通过分区治理提高喀斯特山区生态系统碳储量,为实现区域可持续发展和其他喀斯特地区优化生态系统管理提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

南北盘江流域发源于云南省曲靖市乌蒙山余脉马雄山,地处珠江流域西江水系上游(102°—106°E, 23°—26°N),其生态系统变化直接影响珠江中下游的生态环境安全。南盘江流至贵州省望谟县双江口纳入北盘江,注入红水河,途经云南、贵州、广西三省,流域全长 1363km,面积 83449km²(图 1)。该流域位于亚热带季风气候区,年均温 16.6℃,年降雨量 1182.4mm,雨热同期的气候特征增强了对地表的侵蚀。南北盘江流域地势西北高、东南低,喀斯特地貌占流域面积的 70.36%^[22],是世界上最为典型的喀斯特景观,岩溶发育强烈,地表破碎,奠定了生态系统脆弱敏感的地质背景。由于人口压力引起的毁林开荒、过度放牧等加剧了流域内石漠化的发生。21 世纪初,珠江流域实施了退耕还林还草等生态治理工程,石漠化面积缩减,土地利用变化显著。

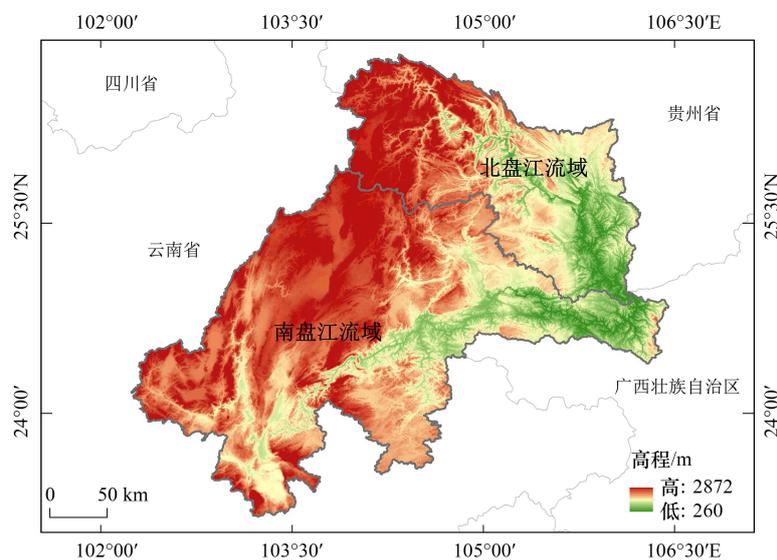


图 1 南北盘江流域位置示意图

Fig.1 Map of Nanbei Panjiang River Basin location

1.2 研究方法

1.2.1 InVEST 模型

InVEST 模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)即“生态系统服务功能与权衡交易综合评价模型”,具有简单、高效、适应性广的特点,在生态系统服务功能和价值评估中得到广泛应用^[23-25]。InVEST 模型的碳储量模块将生态系统碳储量划分为 4 个基本碳库:地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机质碳库。计算公式为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \tag{1}$$

式中 C_{total} 为总碳储量, C_{above} 为地上植被碳储量, C_{below} 为地下植被碳储量, C_{dead} 为死亡有机质碳储量, C_{soil} 为土壤碳储量。

1.2.2 热点分析(Getis-Ord G_i^*)

热点分析是一种局部空间自相关分析方法,可以计算出具有统计显著性高(低)值的空间聚类,反应碳储量在空间上的聚集情况。研究区生态系统碳储量中的热点表示具有高值的数据点被类似的高值点包围,而冷点则表示具有低值的数据点被类似的低值点所包围^[26]。相关公式如下所示^[27]:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \tag{2}$$

$$Z(G_i^*) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2] / (n-1)}} \tag{3}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n-1} - (\bar{x})^2} \tag{4}$$

式中, G_i^* 是栅格 i 的集聚指数, x_j 是栅格 j 的碳储量, w_{ij} 是栅格 i 和 j 之间的空间权重, n 为栅格总数, \bar{x} 为所有栅格碳储量的平均数, Z 为归一化的集聚指数,可表示空间集聚特征。参考赵筱青等人的研究^[27],改进碳储量冷热点分区标准(表 1)。

表 1 碳储量冷热点分区标准

Table 1 Carbon storage cold and hot spot zoning standard

一级分区 First-level zone	热点区 Hot spot		弱显著区 Weakly significant area		冷点区 Cold spot		
二级分区 Secondary zoning	极显著热点区 Very significant hot spot	显著热点区 Significant hot spot	热点区 Hot spot	不显著区 Unsignificant area	冷点区 Cold spot	显著冷点区 Significant cold spot	极显著冷点区 Very significant cold spot
$Z(G^*)$ 值域 Rang	≥ 2.58	[1.96, 2.58)	[1.65, 1.96)	(-1.65, 1.65)	(-1.96, -1.65]	(-2.58, -1.96]	≤ -2.58

$Z(G^*)$: 归一化集聚指数

1.2.3 FLUS-Markov 模型

使用 FLUS-Markov 模型,模拟未来不同模式下土地利用格局。

(1) 模型原理

FLUS 模型主要由人工神经网络(ANN)和元胞自动机(CA)组成。ANN 模型由输入层、输出层、隐藏层构成三层神经网络结构,模仿人类大脑学习,计算出高精度转换规则和参数值^[28]。CA 具有强大的空间模拟能力。FLUS 模型综合 ANN 与 CA 的优势,基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,利用训练数据集迭代最小化网络输出和期望输出上的误差函数^[29],可以拟合影响土地利用变化的自然、社会经济因素的复杂非线性空间关系,而优于传统的回归分析模型^[30]。公式如下^[31]:

$$TP_{p,k}^t = P_{p,k} \times \Omega_{p,k}^t \times I_k^t \times SC_{c \rightarrow k} \tag{5}$$

式中, $TP_{p,k}^t$ 是指在 t 时, p 元胞由原土地利用类型转换为 k 地类的总体转换概率; $P_{p,k}$ 、 $\Omega_{p,k}^t$ 和 I_k^t 分别表示适应性概率、邻域因子参数和自适应惯性系数; $SC_{c \rightarrow k}$ 表示地类 c 转为地类 k 的转换成本。

Markov 模型是一种概率统计模型,基于马尔科夫性质的离散时间随机过程,可根据事件某一时期状态,

预测未来的状态^[32]。因其在预测长时间尺度上的优势,在预测未来土地利用中得到广泛使用。马尔科夫链根据两期土地利用数据计算土地利用转移概率和矩阵,预测未来土地利用数量。该模型公式如下所示^[33]:

$$S_{(t+1)} = S_t \times P_{ij} \quad (6)$$

式中, S_t 为 t 时刻土地利用状态; $S_{(t+1)}$ 为 $t+1$ 时刻土地利用状态; P_{ij} 为土地利用转移矩阵,表示土地利用类型相互转换的概率。

(2) 模式设置

为探究南北盘江流域未来不同土地利用模式对区域碳储量的影响,本文设置三种发展模式:

自然发展模式(Natural Development Pattern, NDP)。该模式根据 2000—2020 年土地利用发展趋势和转移速率,不限制地类转换,首先利用 Markov 模型运算获得 2040 年各土地利用类型的栅格数量,再输入 FLUS 模型模拟其土地利用格局,是其他模式的参考标准。

生态保护模式(Ecological Protection Pattern, EPP)。根据《绿色珠江建设战略规划》的要求,响应生态文明建设,优先保护生态环境,严格限制地类的转化,高碳密度地类不能转为较低碳密度地类。基于 2000—2020 年土地利用转移概率矩阵将林地、草地、灌丛向建设用地转换的概率分别降低 50%,耕地向林地、灌丛、草地转换的概率分别增加 50%。

经济建设模式(Economic Construction Pattern, ECP)。依据《南盘江流域综合规划》、《北盘江流域综合规划》的目标,促进地区经济社会可持续发展,对城市扩张不加限制,基于 2000—2020 年土地利用转移概率矩阵将林地、灌丛、草地、耕地转为建设用地的概率分别增加 30%、40%、50%、50%,将未利用地转为建设用地的概率增加 100%。

各发展模式成本矩阵如表 2 所示。

(3) 精度检验

将研究区 2000 年、2010 年、2020 年土地利用和驱动因子数据根据碳储量冷热点分为热点区、弱显著区、冷点区,分别以 2000 年土地利用为基期数据,将自然驱动因子(DEM、坡度、年均温、年降雨量)和社会经济驱动因子(道路网、GDP、人口密度)归一化处理带入 ANN 模型,与土地利用类型拟合获得研究区的适宜性概率。水资源安全是流域发展的重要保障,2000—2020 年研究区水体没有明显变化,结合《珠江流域综合规划(2012—2030 年)》要求,故将水体作为限制性因素,限制湖泊等水体转为其他地类,并经过多次调试邻域因子参数提高模拟精度(表 3);运用 Markov 模型以 2000 年、2010 年两期数据获得 2000—2010 年转移矩阵和 2020 年的目标栅格数,再以 2010 年为初始年,运用 FLUS 模型模拟 2020 年土地利用格局。利用 Kappa 系数和总体精度验证 2020 年模拟结果和实际土地利用的精度,根据张学儒^[34]等提出的标准可知,本文 Kappa 系数均高于 0.80,总体精度在 0.90 以上,模拟效果较好(表 4)。

1.3 数据来源及预处理

1.3.1 土地利用及驱动因子数据

本研究所使用的南北盘江流域 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年土地利用数据来源于地球大数据科学工程数据共享服务系统(<https://data.casearth.cn/>),空间分辨率为 30m,对数据进一步修正,精度优于 85%。根据研究需要将地类重分类为耕地、林地、草地、灌丛、湿地、水体、建设用地、未利用地 8 类土地利用类型。土地利用受自然和社会经济因素多重驱动影响,选取自然因素地形、气候和社会经济因素道路网、GDP、人口密度等 9 种主要驱动因子(表 5)。道路网数据利用 ArcGIS 10.2 欧氏距离分析并做归一化处理,将分辨率统一为 30m,地理坐标均为 CGCS_2000。

1.3.2 碳密度数据

本研究植被碳密度和土壤碳密度来源于国家生态科学数据中心资源共享服务平台(<http://www.cnern.org.cn/>),参考《2010 年中国陆地生态系统碳密度数据集》^[35]。基于碳密度的空间异质性,本文筛选出研究区

表 3 邻域因子参数

Table 3 Neighborhood factor parameters

土地利用类型 Land use type	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	灌丛 Shrubland	湿地 Wetland	水体 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
邻域权重 Neighborhood weight	0.3	0.9	0.5	0.9	0.7	0.8	1	0.8

表 4 精度验证

Table 4 Precision validation

分区 Partition	Kappa 系数 Kappa coefficient	总体精度 Overall accuracy
热点区 Hot spot	0.89	0.94
弱显著区 Weakly significant area	0.94	0.96
冷点区 Cold spot	0.88	0.92

表 5 土地驱动因子数据来源

Table 5 Land driving factor data sources

数据类型 Data type	数据名称 The name of the data	数据来源 The source of the data
自然因素 Physical factor	地形因素	DEM 地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)
	气候因素	坡度 基于 DEM 提取
		年均温 年降水量 资源环境科学与数据研究中心 (http://www.resdc.cn/)
社会经济因素 Socioeconomic factor	社会因素	人口密度
	经济因素	到铁路的距离
		到高速的距离
		到公路的距离 GDP

及周边共 695 个样本数据,按照土地利用类型,将样本碳密度平均值作为最终的碳密度。由于水体、建设用地、未利用地及植被死亡有机质对碳储量的贡献较少^[36],故忽略不计,默认为 0(表 6)。

表 6 研究区各土地利用类型的碳密度/(t/hm²)

Table 6 Carbon density of land use types in the study area

土地利用类型 Land use type	植被地上碳密度 Aboveground carbon density of vegetation	植被地下碳密度 Subsurface carbon density of vegetation	死亡有机物碳密度 Carbon density of dead organic matter	土壤碳密度 Soil carbon density
耕地 Cropland	0.00	0.00	0.00	104.20
林地 Forest	50.61	12.13	0.00	112.06
草地 Grassland	0.95	9.00	0.00	119.61
灌丛 Shrubland	15.01	9.41	0.00	89.93
湿地 Wetland	0.65	0.26	0.00	190.64
水体 Water	0.00	0.00	0.00	0.00
建设用地 Construction land	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地 Unused land	0.00	0.00	0.00	0.00

1.3.3 碳密度值的精度验证

通过与喀斯特生态系统碳储量的现有研究对比分析,本文主要土地利用类型的碳密度值均在已有研究范围内,因此具有较高的精度和可靠性,可用于研究区碳储量估算(表 7)。

表 7 本研究与现有研究的碳密度对比/(t/hm²)

Table 7 Comparison of carbon density between this study and existing research

土地利用类型 Land use type	研究区 Research area	方法 Method	碳密度 Carbon density (t/hm ²)	来源 Source
耕地 Cropland	南北盘江	模型法	104.20	本研究
	贵州	样方法	112.26—115.31	[37]
	滇黔桂	文献法	110.87	[38]
林地 Forest	南北盘江	模型法	174.80	本研究
	贵州	样方法	190.53	[37]
	广西	样方法	179.08	[39]
	广西	样方法	140.45	[16]
草地 Grassland	南北盘江	模型法	129.56	本研究
	贵州	样方法	105.30	[40]
	西南地区	样方法	113.09	[41]
	广西	样方法	133.84	[39]
灌丛 Shrubland	南北盘江	模型法	114.35	本研究
	云南	样方法	106.14	[42]
	贵州	样方法	88.34	[43]
	广西	样方法	160.79	[39]

2 结果与分析

2.1 土地利用和碳储量变化特征

2000—2020 年,南北盘江流域土地利用类型以林地为主,占流域总面积的 52%以上。其次为耕地(24%以上)和草地(14%以上),其他土地利用类型所占比例均小于 10%。20 年间,“珠治工程”、“西部大开发”等生态工程促进了流域内土地利用类型的转换。林地、灌丛、湿地、水体、建设用地、未利用地的面积持续增加。由于城市扩张,建设用地增加最多(1046.32km²),增幅达 94.46%,主要由耕地、草地、林地转入。其次为林地和灌丛,分别增加 312.71km²、230.84km²,林地主要由耕地、草地、灌丛转入,灌丛主要由耕地和林地转入。耕地和草地的面积持续减少,耕地减少最多(1276.93km²),主要转出为林地和建设用地;草地减少 374.85km²,主要转为耕地、建设用地和林地(图 2)。

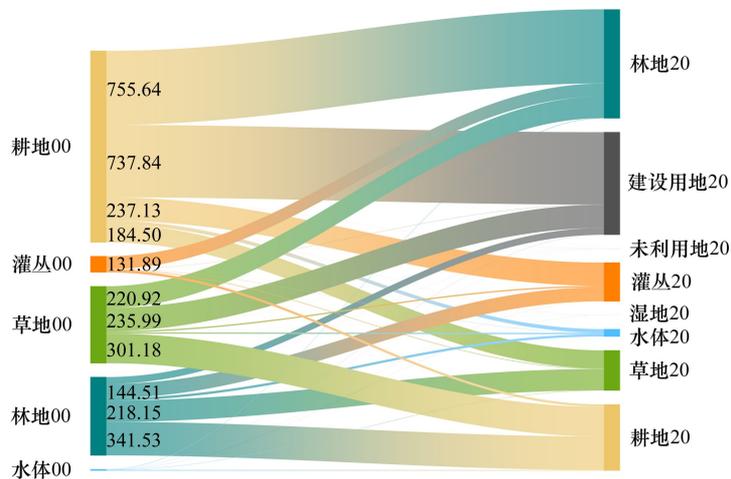


图 2 2000—2020 年南北盘江流域土地利用转移矩阵/km²

Fig.2 Transfer matrix of land use in Nanbei Panjiang River Basin from 2000 to 2020

南北盘江流域 2000—2020 年的碳储量由 11831.01×10⁵t 降至 11740.65×10⁵t,总下降幅度为 90.36×10⁵t。2000—2005 年碳储量减少较快,平均速度达到 6.32×10⁵t/a; 2015—2020 年减少较慢,平均速度为 3.15×

10⁵t/a。在各碳库中,土壤碳库对总碳储量贡献最大,占总碳储量的 75.93%,地上碳库次之(18.64%),地下碳库贡献最少(5.43%)。在时间变化上,2000—2020 年土壤碳储量逐渐减少,降幅为 107.99×10⁵ t。2000—2005 年下降速度最快(6.13×10⁵t/a),主要因为建设用地扩张,地面硬化,降低土壤固碳能力,导致总碳储量减少。地上碳储量持续增加,增幅为 16.47×10⁵ t C,其中 2005—2010 增幅最大(6.84×10⁵ t);地下碳储量表现出“先减少后增加”的趋势,2000—2005 年减少 0.77×10⁵ t C,2005—2020 年呈现递增趋势,2015 年后趋于稳定,累计增加 1.93×10⁵ t C。地上和地下碳库受到退耕还林还草工程的影响,植被覆盖度提高,固碳能力增强(图 3)。

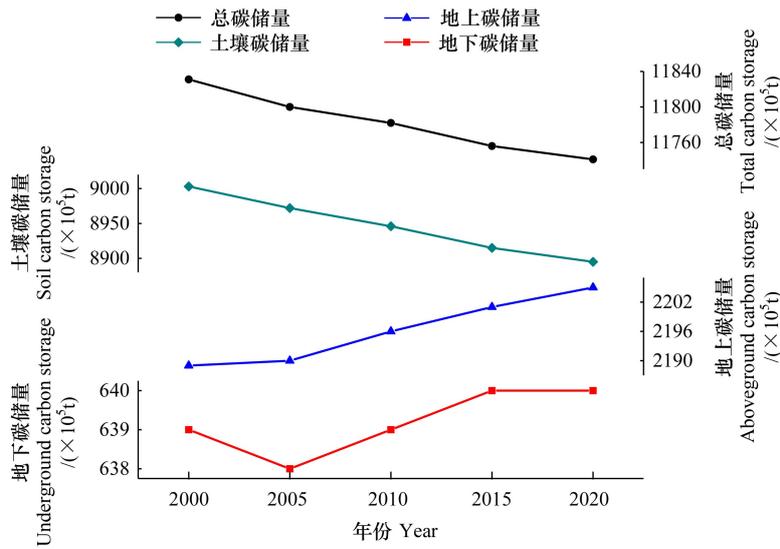


图 3 2000—2020 南北盘江流域各碳库碳储量变化

Fig.3 Carbon storage change of carbon pools in Nanbei Panjiang River Basin from 2000 to 2020

2.2 碳储量对土地利用变化的响应

土地利用类型的固碳能力存在显著差异。数量上,2000—2020 年,林地的固碳量逐年增加,占总碳储量的 60%以上,固碳能力突出,是流域内最大的碳库;其次为耕地,碳储量虽然呈现下降趋势,但占比仍达 18%左右;草地、灌丛、湿地碳储量依次降低。湿地的土壤碳密度最大,但是面积较小,碳汇功能不具优势(图 4)。从图 5 可知,土地利用变化对碳储量具有重要影响,其影响程度根据地类的转移方向、转移面积、碳密度差值等存在差异。2000—2020 年,耕地、草地转为建设用地导致固碳量减少 107.46×10⁵ t,占总损失量的 61.20%,表明建设用地是碳储量流失的主要地类,由林地、草地等高碳密度的地类转为建设用地等较低碳密度的地类

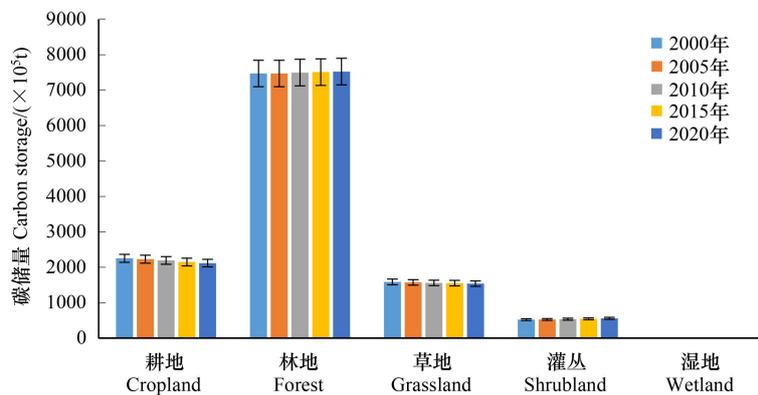


图 4 2000—2020 年南北盘江流域各土地利用类型碳储量变化

Fig.4 Carbon storage change of land use types in Nanbei Panjiang River Basin from 2000 to 2020

将会造成碳损失。流域 20 年来,耕地转为林地和灌丛增加了 $66.00 \times 10^5 \text{ t C}$,占碳汇增量的 77.42%,说明由低碳密度的地类向高碳密度的生态用地转换,有利于增强生态系统碳汇功能(图 5)。

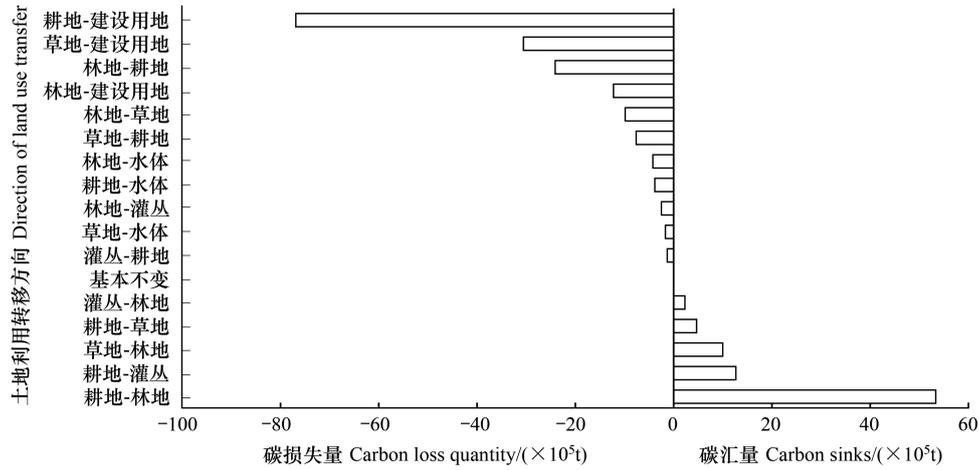


图 5 2000—2020 年南北盘江流域土地利用转化引起的碳储量变化

Fig.5 Carbon storage changes caused by land use conversion in Nanbei Panjiang River Basin from 2000 to 2020

空间上,南北盘江流域的碳储量呈现自西向东递增的分布格局。在西部的云南地区主要分布的地类是草地和建设用地,固碳能力较弱;东部的广西地区拥有大面积的林地和灌丛,碳汇功能较强。2000—2020 年间碳储量变化较为复杂,由于流域多山地,地类破碎狭小,所以碳储量变化的区域分布较散乱,部分地区表现出显著变化。本文将碳储量变化小于 -30 t/hm^2 视为下降,处于 -30 t/hm^2 至 30 t/hm^2 之间设为基本不变,大于 30 t/hm^2 视为增加。2000—2020 年,南盘江西部由于城市扩张,耕地开发为建设用地,碳储量显著下降;南盘江东部和北盘江因退耕还林还草工程实施效果较好,大量坡耕地转换为林地和灌丛,碳储量显著增加,由于生态工程效益的滞后性,2010—2020 年的变化比 2000—2010 年更加明显(图 6)。

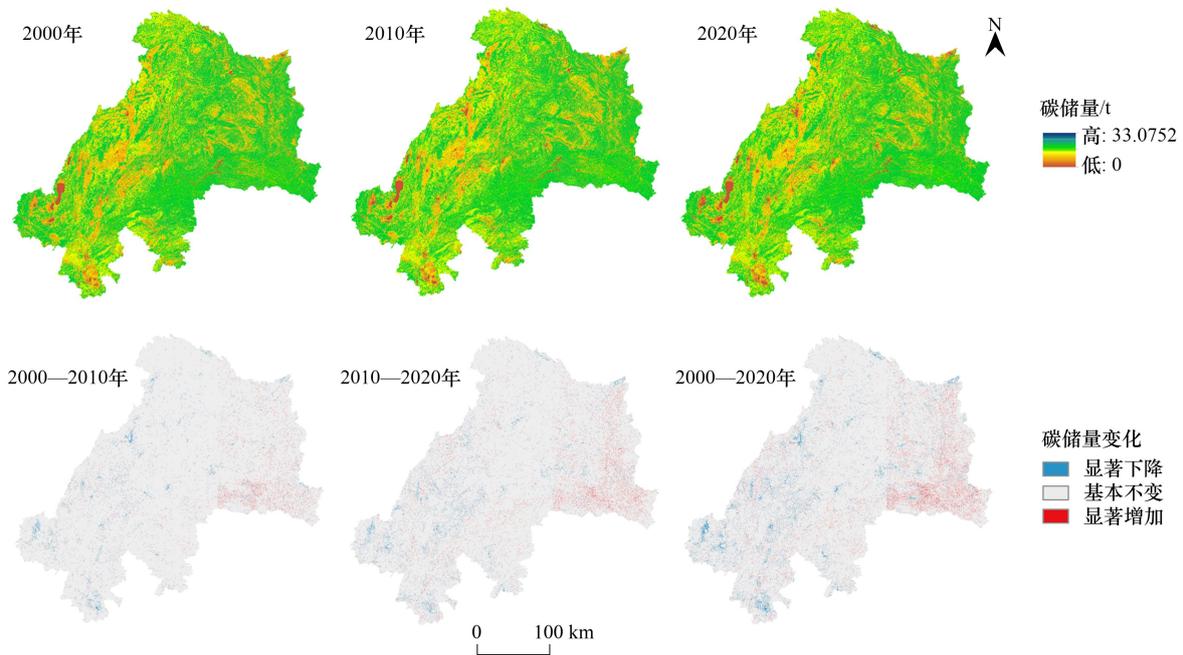


图 6 2000—2020 年南北盘江流域碳储量及变化量空间分布

Fig.6 Spatial distribution of carbon storage and variation in Nanbei Panjiang River Basin from 2000 to 2020

2.3 生态系统碳储量的热点空间格局

2000—2020年,南北盘江流域生态系统碳储量的冷热点区范围均不同程度缩小。热点区主要分布在广西境内的西林县、隆林各族自治县、田林县,贵州境内的册亨县和望谟县,云南境内的师宗县、广南县、丘北县;该区域开展“珠治工程”等生态修复措施,重点治理水土流失和石漠化,改造坡耕地,实施退耕还林还草^[18],主要地类林地和灌丛面积增加,对于修复南北盘江流域生态系统碳汇功能起到了积极的作用。冷点区集中分布在云南的中西部,该区域建设用地较多,占冷点区总面积的4.60%,碳汇功能较弱。北部的贵州由于多山地,地形破碎,热点区和冷点区分布较为零散,整体表现为弱显著。2000—2020年流域内碳储量冷热点基本保持“西低东高”的分布格局,按照因地制宜、分区治理的原则,为探讨不同地区适宜的发展模式,根据子流域和碳储量在空间上的聚集情况将研究区大致划分为北部弱显著区、东南部热点区、西南部冷点区,分别模拟估算碳储量对未来土地利用模式的响应(图7)。

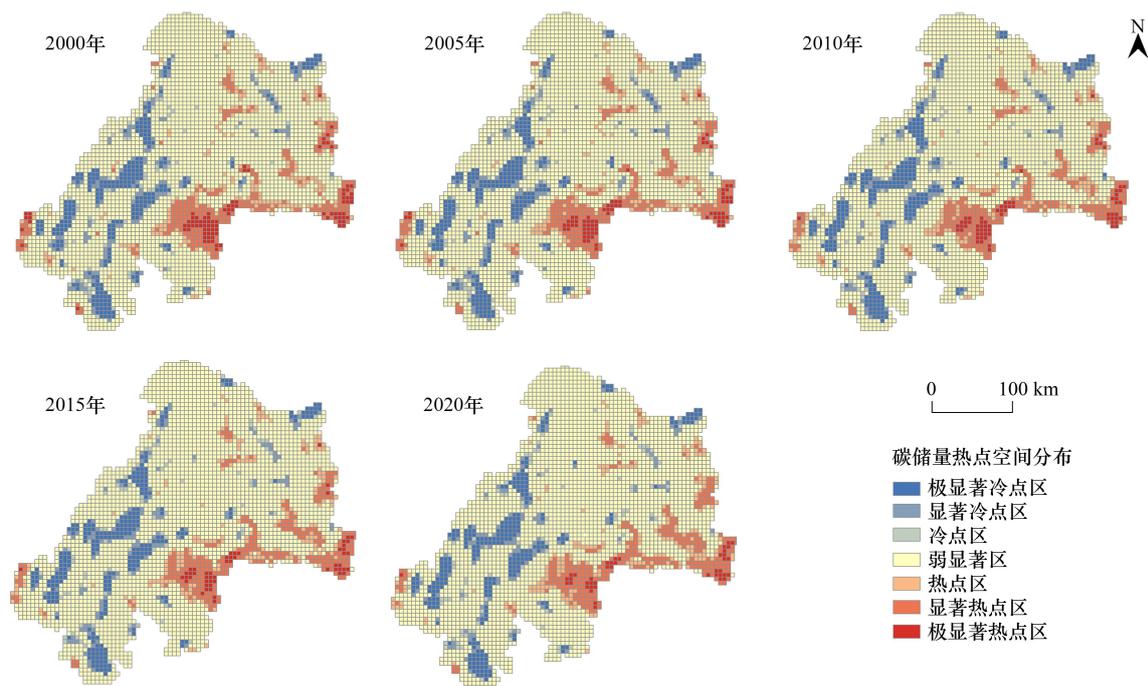


图7 2000—2020年南北盘江流域碳储量热点空间分布

Fig.7 Hotspot analysis of carbon storage in Nanbei Panjiang River Basin from 2000 to 2020

2.4 不同区域碳储量对未来土地利用模式的响应

2.4.1 热点区响应特征

2020—2040年不同模式下热点区的碳储量均较高,呈现增加趋势。在空间上,自然发展和生态保护模式碳储量变化较为复杂,中部地区主要地类为林地和灌丛,且大量耕地转为灌丛、灌丛转为林地使碳储量显著增加;西南和东北局部地区耕地、草地转为建设用地,林地转为灌丛致使碳储量显著下降。经济建设模式下,中部地区碳储量显著增加,而西南部的丘北县建设用地扩张,碳储量显著降低(图8)。在数量上,据估算2040年热点区NDP、EPP、ECP的碳储量分别为 $3691.01 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $3704.24 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $3693.03 \times 10^5 \text{ t}$,EPP增加最多($29.11 \times 10^5 \text{ t C}$),其次为ECP($17.90 \times 10^5 \text{ t C}$)、NDP($15.88 \times 10^5 \text{ t C}$)。主要原因是林地和灌丛面积增加,EPP扩增最为明显,碳储量分别提高了 $67.74 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $23.93 \times 10^5 \text{ t}$ 。ECP建设用地规模最大,主要由耕地转入,碳储量损失较少(图9)。2040年热点区在NDP、EPP、ECP下平均碳密度相近,分别为 155.49 t/hm^2 、 156.05 t/hm^2 、 155.58 t/hm^2 ,均明显高于2020年南北盘江流域的平均碳密度 143.59 t/hm^2 ,表明热点区的固碳能力显著高于流域的平均水平。

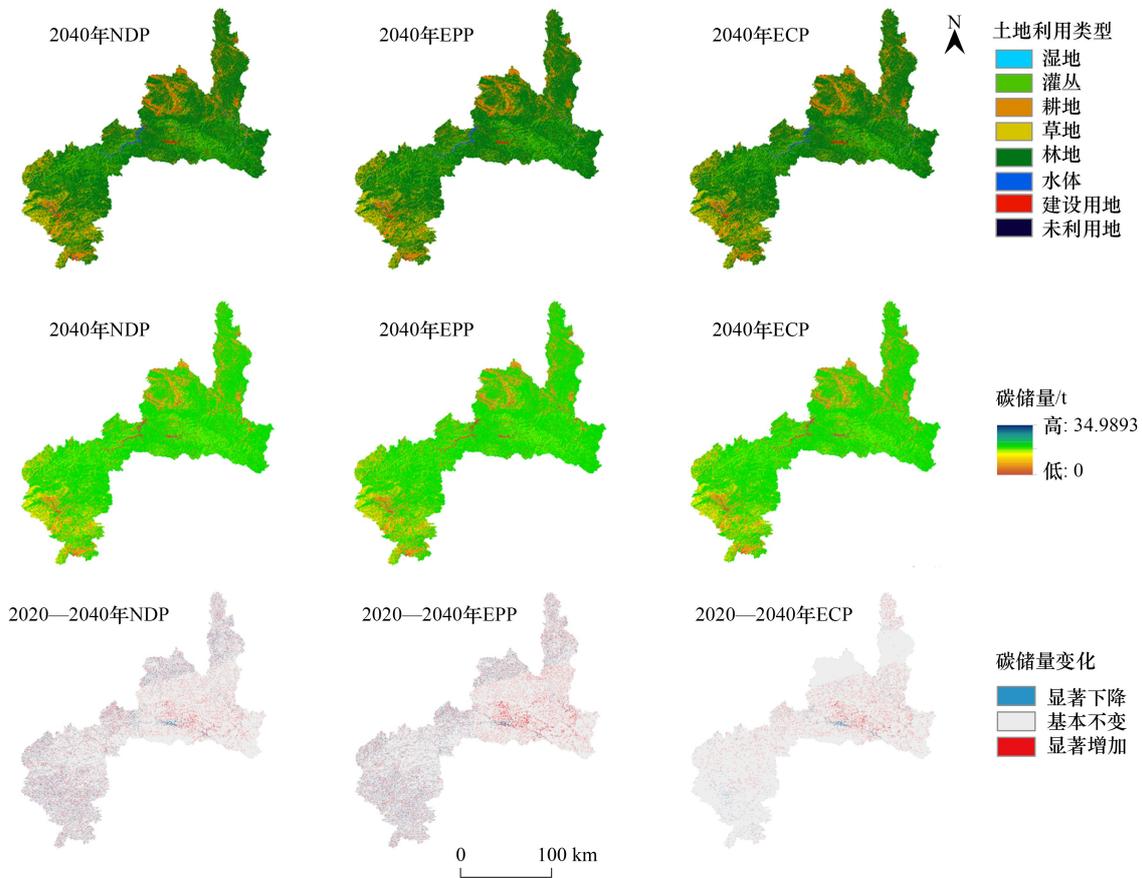


图 8 热点区不同模式下土地利用、碳储量及碳储量变化空间分布

Fig.8 Spatial distribution of land use, carbon storage and carbon storage change under different patterns in hotspots
NDP: 自然发展模式; EPP: 生态保护模式; ECP: 经济建设模式

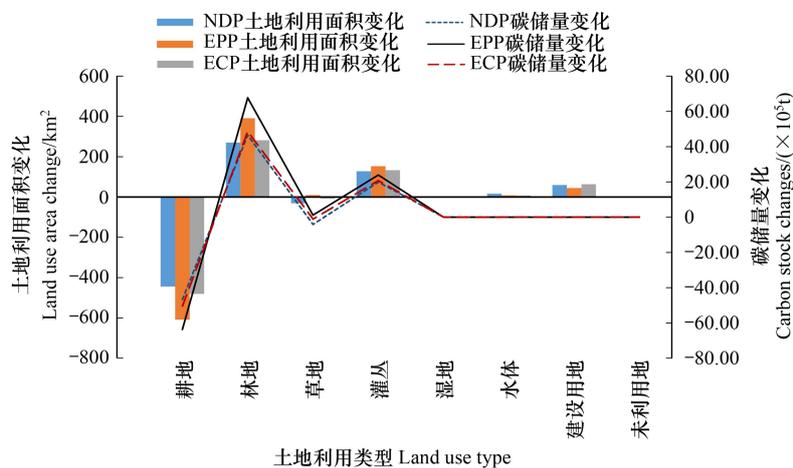


图 9 2020—2040 年热点区不同模式下土地利用面积和碳储量变化

Fig.9 Changes in land use area and carbon storage under different patterns in the hotspots from 2020 to 2040

2.4.2 弱显著区响应特征

2020—2040 年不同模式下弱显著区碳储量呈现显著差异。从空间变化来看,自然发展和经济建设模式下弱显著区的边缘地区宣威市、兴义市、安顺市、钟山区等的耕地、草地大量转为建设用地,碳储量显著下降;

北部地区草地转为林地、灌丛,碳储量显著增加。生态保护模式限制建设用地扩张,碳储量显著下降区域明显减小;北部地区退耕还林还草,碳储量显著增加(图 10)。从数量变化来看,经济建设模式下大量耕地、草地转为建设用地导致碳储量损失剧烈,累计减少 $40.48 \times 10^5 \text{ t C}$,平均速度高达 $2.02 \times 10^5 \text{ t/a}$ 。自然发展模式下生态系统碳储量损失较少($26.51 \times 10^5 \text{ t C}$)。生态保护模式下林地、草地、灌丛面积增加,固碳量增加 $6.02 \times 10^5 \text{ t}$ (图 11)。自然发展、生态保护和经济建设模式下弱显著区的平均碳密度分别为 143.99 t/hm^2 、 145.12 t/hm^2 、 143.50 t/hm^2 ,与 2020 年南北盘江流域平均碳密度相近,表明弱显著区的固碳能力达到研究区平均水平。

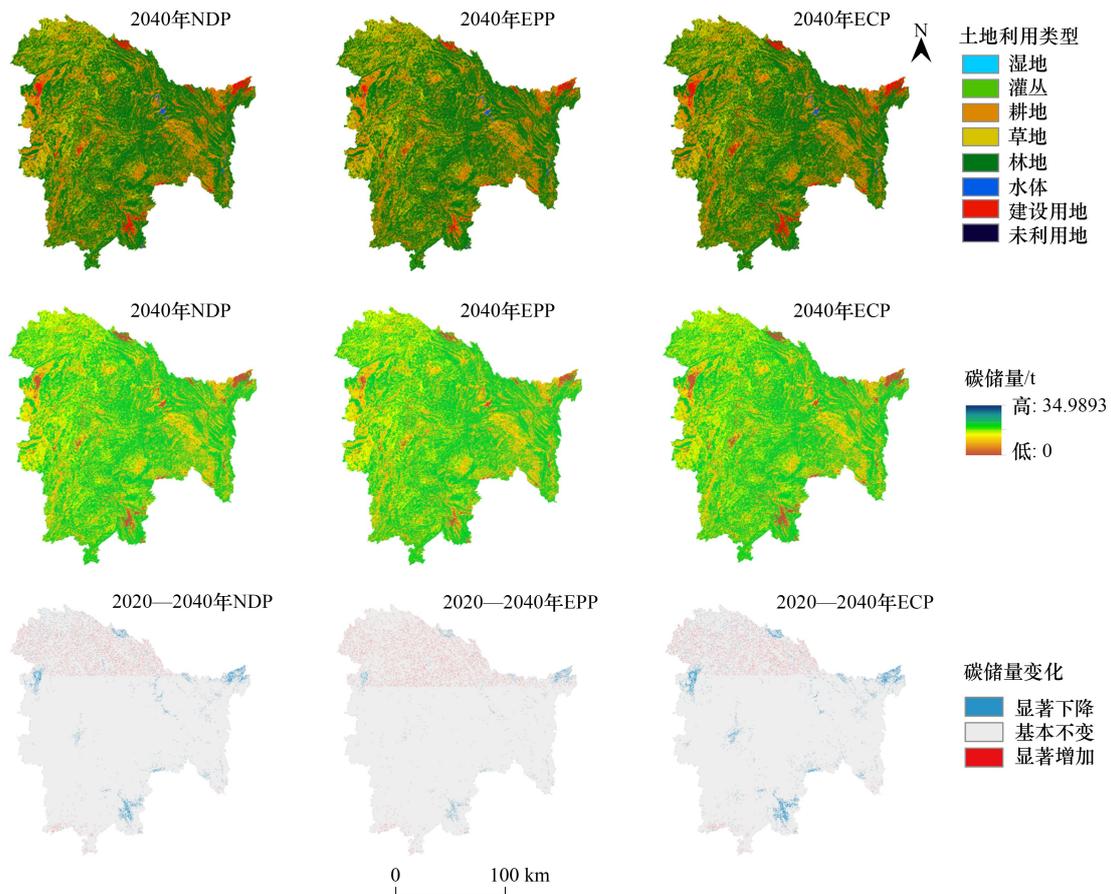


图 10 弱显著区不同模式下土地利用、碳储量及碳储量变化空间分布

Fig.10 Spatial distribution of land use, carbon storage and carbon storage change under different patterns in weakly significant area

2.4.3 冷点区响应特征

2020—2040 年不同模式下冷点区碳汇差距较大。在空间上,2020 年冷点区建设用地较多,自然发展和经济建设模式下,大面积耕地、草地转出为建设用地,建设用地分别增加 607.32 km^2 、 900.72 km^2 ,导致在云南的曲靖市、蒙自县、玉溪市等地碳储量显著下降,显著下降区域分别占总面积的 8.01%、8.82%;中部地区耕地转为草地、草地转为灌丛使碳储量显著增加,显著增加区域分别占总面积的 5.94%、5.81%。生态保护模式下,城市化缓慢,5.51%的地区碳储量显著下降,6.95%显著增加(图 12)。在数量上,自然发展和经济建设模式下生态用地急剧缩减,碳储量累计减少 $85.44 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $117.72 \times 10^5 \text{ t}$,平均速度为 $4.27 \times 10^5 \text{ t/a}$ 、 $5.89 \times 10^5 \text{ t/a}$ 。生态保护模式下林地得到保护,碳储量增加 $27.66 \times 10^5 \text{ t}$ (图 13)。自然发展、生态保护和经济建设模式下冷点区的平均碳密度分别为 130.27 t/hm^2 、 134.13 t/hm^2 、 129.22 t/hm^2 ,明显低于 2020 年南北盘江流域的平均碳密度,表明冷点区的固碳能力较差。

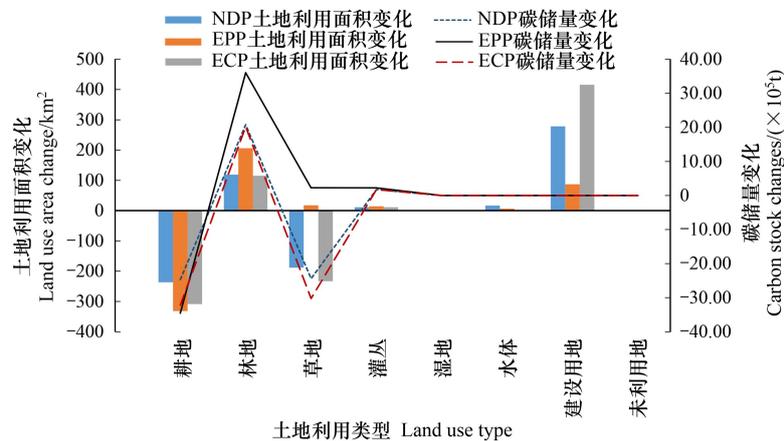


图 11 2020—2040 年弱显著区不同模式下土地利用面积和碳储量变化

Fig.11 Changes in land use area and carbon storage under different patterns in weakly significant regions from 2020 to 2040

3 结论与讨论

3.1 结论

本文结合 InVEST 和 FLUS-Markov 模型,探明 2000—2020 年南北盘江流域土地利用变化与生态系统碳储量的时空演变特征和耦合关系,并根据热点分区预测 2040 年不同模式下的土地利用格局,分析热点区、弱显著区、冷点区碳储量的响应特征。主要结论如下:

(1) 2000—2020 年,南北盘江流域土地利用发生明显变化。林地、建设用地、灌丛和水体的面积不断扩大,耕地、草地的面积持续减少,总趋势为高碳密度的地类转为较低碳密度的地类,致使生态系统碳储量呈减少态势,由 $11831.01 \times 10^5 \text{ t C}$ 降至 $11740.65 \times 10^5 \text{ t C}$,累计损失 $90.36 \times 10^5 \text{ t C}$ 。

(2) 2000—2020 年,研究区碳储量在空间上呈“西低东高”的分布格局。热点区集中分布在东部和东南部的广西、云南境内,冷点区主要分布在西部和西南部的云南境内,弱显著区分布在北部的贵州境内,主要原因是东部的优势地类为碳汇功能较强的林地和灌丛,西部和北部的优势地类为碳汇功能较弱的建设用地和草地。

(3) 各热点分区在不同模式下固碳能力差异显著。2040 年热点区在 NDP、EPP、ECP 下碳储量分别增加 $15.88 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $29.11 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $17.90 \times 10^5 \text{ t}$,固碳能力高于研究区平均水平,NDP 与 ECP 的差距较小;弱显著区 2040 年不同模式下的平均碳密度与 2020 年研究区平均碳密度相近,NDP 与 ECP 下分别损失 $26.51 \times 10^5 \text{ t C}$ 、 $40.48 \times 10^5 \text{ t C}$,NDP 下损失量仅为 ECP 的 65.50%,而 EPP 下碳储量增加 $6.02 \times 10^5 \text{ t}$;冷点区在 NDP、ECP 下碳储量损失剧烈,分别为 $85.44 \times 10^5 \text{ t}$ 、 $117.72 \times 10^5 \text{ t}$,但在 EPP 下碳增加速率为 $1.38 \times 10^5 \text{ t/a}$,高于弱显著区 ($0.30 \times 10^5 \text{ t/a}$),碳汇潜力较大。综上,EPP 能有效保护生态用地,减缓建设用地扩张速度,在弱显著区和冷点区生态效益显著;ECP 下城市化发展迅速,导致弱显著区和冷点区生态系统固碳能力明显下降。

3.2 讨论

运用 InVEST 模型估算生态系统碳储量是目前比较常用、可靠的方法,其评价结果精度的关键指标参数是碳密度。由于生态系统碳储量与气温、降水有显著性关系^[44-45],并且为避免不同数据来源导致的误差,研究选取了《2010s 年中国陆地生态系统碳密度数据集》^[35]中研究区附近同纬度的碳密度数据,估算结果能较准确反映 2000—2040 年南北盘江流域碳储量的时空演变特征。本文主要探讨土地利用变化对生态系统碳储量的影响,所以将碳密度视为固定值带入 InVEST 模型中估算碳储量。但是碳密度会因植被、土壤类型等多种因素的影响而变化^[46-47],将碳密度视为固定值,对估算结果会有一定影响。曹军等认为森林碳储量与林龄

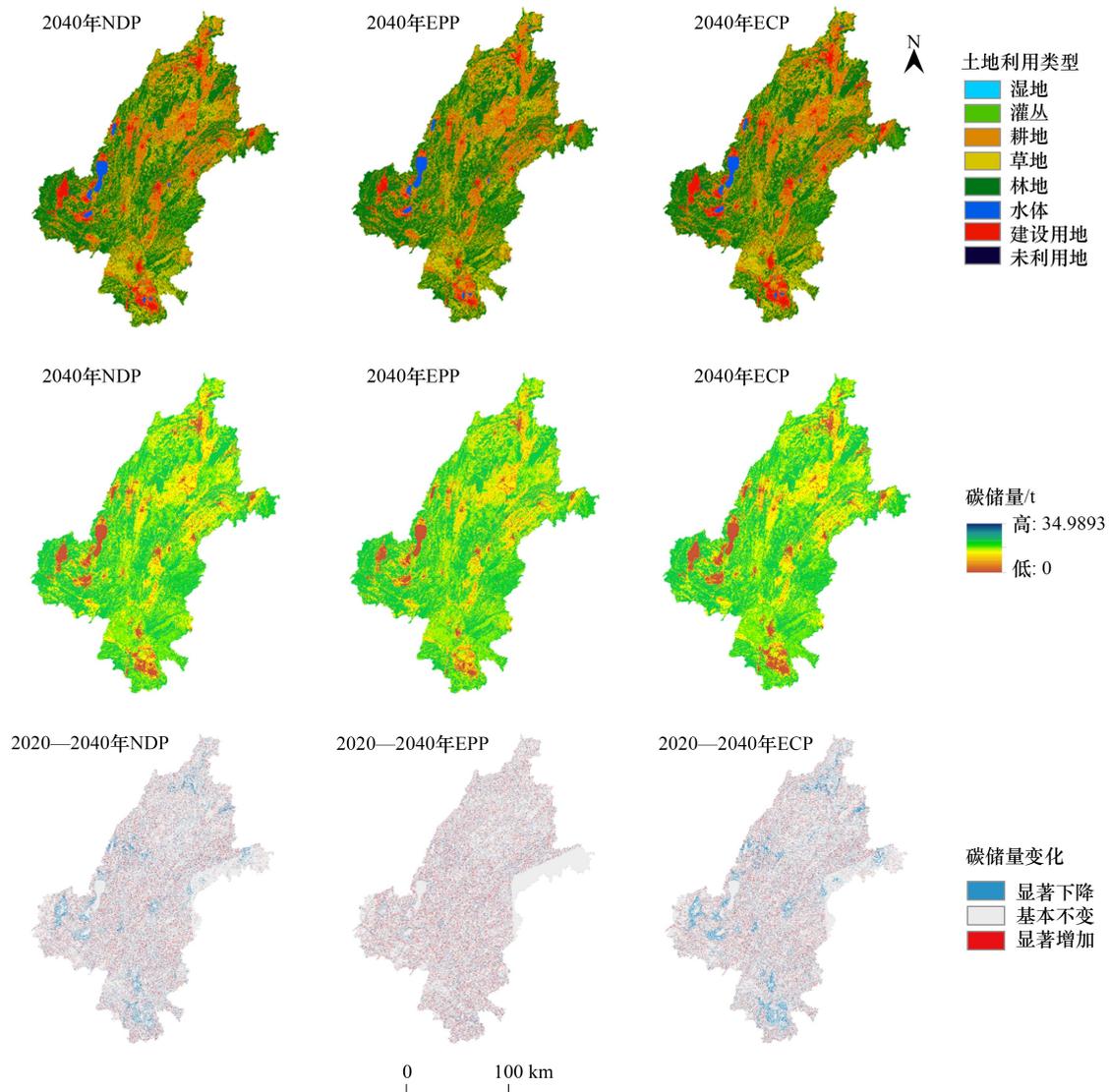


图 12 冷点区不同模式下土地利用、碳储量及碳储量变化空间分布

Fig.12 Spatial distribution of land use, carbon storage and carbon storage change under different patterns in cold spot area

有关,幼林龄固碳能力随时间增大,中龄林固碳能力最强^[48]。南北盘江流域由于石漠化治理,人工林中大多为幼中龄林,用目前的碳密度预测 2040 年的碳储量则可能低估了林地的固碳潜力。为了提高生态系统碳储量评估的精度,在今后的研究中将根据野外调查数据,把土地利用类型更加细化,充分考虑不同植被类型和年龄结构对碳密度的影响。本研究表明土地利用变化对碳储量有显著影响,生态保护对于恢复生态系统碳汇功能具有重要作用,与张明阳基于 RBFN 的研究结果一致^[49]。张远东等研究发现人工恢复的云杉枯落物蓄积量显著高于同龄的自然恢复植被和针阔混交林,说明可通过人工种植优势树种提高生态系统碳储量^[50]。不同树种的生长周期和蓄积量差异较大,经济林树种可选择人工云杉,而生态林恢复则可考虑桦木林^[51],在保护生态时也可兼顾经济效益。

土地利用变化受自然、人文等因素的综合影响^[52-53],本文用 FLUS-Markov 模型模拟未来土地利用时充分考虑量化了主要驱动因子,模拟效果较好。本文依托喀斯特地区空间异质性强的生态特征,分区模拟多模式下土地利用变化,更好地反应了不同发展策略对碳储量的影响。热点区虽然在生态保护模式下生态系统固碳能力最突出,但是一定程度上会阻碍区域经济发展;而经济建设模式能兼顾生态效益和经济效益,所以热点区

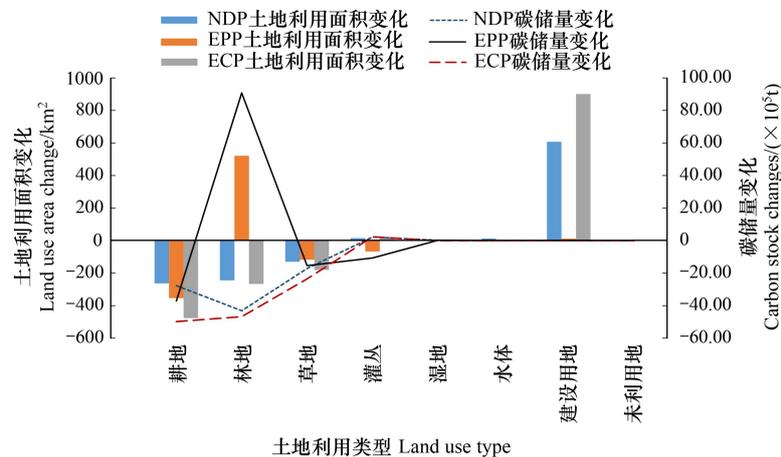


图 13 2020—2040 年冷点区不同模式下土地利用面积和碳储量变化

Fig.13 The changes of land use area and carbon storage under different patterns in cold spot area from 2020 to 2040

可在巩固生态治理工程的基础上,促进碳汇增收,合理开发,推动地区生态与经济协调发展。弱显著区固碳能力较好,地区可参考自然发展模式,减缓建设用地扩张速度,提高植被覆盖度。冷点区在自然发展和经济建设模式下碳储量损失剧烈,未来发展可参考生态保护模式,加强对坡耕地的改造,增加碳汇;同时合理规划建设用地,减少碳源;冷点区在生态保护模式下林地面积大幅度增加,应提高林业管理水平,防止林地退化。本文研究结果可为区域合理规划土地利用和提升生态系统服务能力提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Cox P M, Betts R A, Jones C D, Spall S A, Totterdell I J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, 408(6809): 184-187.
- [2] 方精云. 碳中和的生态学透视. *植物生态学报*, 2021, 45(11): 1173-1176.
- [3] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Olsen A, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Q C, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S, Arago L E O C, Arneeth A, Arora V, Bates N R, Becker M, Benoit C A, Bittig H C, Bopp L, Bultan S, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Evans W, Florentie L, Forster P M, Gasser T, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Gregor L, Gruber N, Harris I, Hartung K, Haverd V, Houghton R A, Ilyina T, Jain A K, Joetzjer E, Kadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, LaNDPchützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozi D, Marland G, Metzl N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer P I, Pierrot D, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rdenbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Smith A J P, Sutton A J, Tanhua T, Tans P P, Tian H, Tilbrook B, van der Werf Guido, Vuichard N, Walker A P, Wanninkhof R, Watson A J, Willis D, Wiltshire A J, Yuan W P, Yue X, Zaehle S. Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269-3340.
- [4] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus B*, 2003, 55(2): 378-390.
- [5] Vizcaíno-Bravo Q, Williams-Linera G, Asbjornsen H. Biodiversity and carbon storage are correlated along a land use intensity gradient in a tropical montane forest watershed, *Mexico*. *Basic and Applied Ecology*, 2020, 44: 24-34.
- [6] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [7] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. *生态学报*, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [8] 刘纪远, 邵全琴, 延晓冬, 樊江文, 邓祥征, 战金艳, 高学杰, 黄麟, 徐新良, 胡云峰, 王军邦, 匡文慧. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1015-1022.
- [9] Bhan M, Gingrich S, Matej S, Fritz S, Erb K H. Land use increases the correlation between tree cover and biomass carbon stocks in the global tropics. *Land*, 2021, 10(11): 1217.
- [10] Decena S C P, Villacorta-Parilla S, Arribado A O, Macasait D R Jr, Arguelles M S, Salamia S S, Relevo E S. Impact of land use conversion on carbon stocks and selected peat physico-chemical properties in the Leyte sab-a basin peatland, Philippines. *Wetland*, 2022, 42(1): 2.
- [11] 王渊刚, 罗格平, 冯异星, 韩其飞, 范彬彬, 陈耀亮. 近 50a 玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对碳储量的影响. *自然资源学报*, 2013, 28(6): 994-1006.
- [12] 朴世龙, 方精云, 黄耀. 中国陆地生态系统碳收支. *中国基础科学*, 2010, 12(2): 20-22, 65.
- [13] 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 覃小群, 何师意, 章程. 中国岩溶碳汇潜力研究. *地球学报*, 2012, 33(2): 129-134.
- [14] Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, Tan Q, Luo G J, Wu L H, Xi H P, Li C J, Chen F, Ran C, Liu M, Gong S H, Song F J. China's carbon budget inventory from 1997 to 2017 and its challenges to achieving carbon neutral strategies. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 347: 130966.

- [15] 张珍明,周运超,田潇,黄先飞. 喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法. 生态学报, 2017, 37(22): 7647-7659.
- [16] 胡芳,杜虎,曾馥平,宋同清,彭晚霞,兰斯安,张芳. 广西不同林龄喀斯特森林生态系统碳储量及其分配格局. 应用生态学报, 2017, 28(3): 721-729.
- [17] 吴协保,黄俊威,宁小斌,宋进春,吴照柏,但新球,王昊琼,卢立. 珠江流域土地石漠化和河流泥沙含量的动态变化. 水土保持通报, 2021, 41(3): 22-30.
- [18] 水利部珠江水利委员会 广东广州. 珠江上游南北盘江石灰岩地区水土保持综合治理试点工程总结报告. 人民珠江, 2007, 28(2): 1-5.
- [19] 赵青松,兰安军,范泽孟,杨青. 贵州省不同地貌形态类型土壤侵蚀强度变化的定量分析. 地球信息科学学报, 2020, 22(7): 1555-1566.
- [20] 朴世龙,岳超,丁金枝,郭正堂. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(7): 1419-1426.
- [21] 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. 生态学报, 2021, 41(1): 360-373.
- [22] 周家维. 南、北盘江流域(贵州部分)土地退化类型及机理. 贵州林业科技, 2005, 33(4): 6-10.
- [23] 刘洋,张军,周冬梅,马静,党锐,马靖靖,朱小燕. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [24] 刘晓娟,黎夏,梁迅,石洪,欧金沛. 基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟. 热带地理, 2019, 39(3): 397-409.
- [25] 朱文博,张静静,崔耀平,郑辉,朱连奇. 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. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [26] 刘慧,朱国平. 近百年来南极磷虾分布冷热点的时空变动. 应用生态学报, 2020, 31(3): 1015-1022.
- [27] 赵筱青,石小倩,李取豪,李益敏,黄佩. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区. 地理学报, 2022, 77(3): 736-756.
- [28] Li X, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(4): 323-343.
- [29] Rahnama M R. Forecasting land-use changes in Mashhad Metropolitan area using Cellular Automata and Markov chain model for 2016-2030. Sustainable Cities and Society, 2021, 64: 102548.
- [30] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Land Use, Urban and Regional Planning, 2017, 168: 94-116.
- [31] 王旭,马博文,李丹,陈昆仑,姚华松. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
- [32] Anderson T W, Goodman L A. Statistical inference about Markov chains. The Annals of Mathematical Statistics, 1957, 28(1): 89-110.
- [33] 周杰,张学儒,牟凤云,赵瑞一,周伟,李梦梅. 基于 CA-Markov 的土壤有机碳储量空间格局重建研究——以泛长三角地区为例. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1565-1575.
- [34] 张学儒,周杰,李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178.
- [35] 徐丽,何念鹏,于贵瑞. 2010s 年中国陆地生态系统碳密度数据集. Science Data Bank, 2018.
- [36] Wang C, Zhan J Y, Chu X, Liu W, Zhang F. Variation in ecosystem services with rapid urbanization; a study of carbon sequestration in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, 110: 195-202.
- [37] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,曾馥平,杨钙仁,杜虎,鹿士杨,范夫静. 西南峡谷型喀斯特不同生态系统的碳格局. 生态学报, 2014, 34(19): 5579-5588.
- [38] 张勇,史学正,于东升,王洪杰,孙维侠,赵永存. 滇黔桂地区土壤有机碳密度变异的影响因素研究. 土壤学报, 2009, 46(3): 526-531.
- [39] 杜虎,宋同清,曾馥平,王克林,彭晚霞,付威波,李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子. 生态学报, 2015, 35(14): 4658-4667.
- [40] 杨丰,唐文汉,王建立,姚红艳,程巍,刘洪来. 贵州喀斯特山区草地生态系统类型转变对土壤有机碳的影响. 草地学报, 2015, 23(4): 733-737.
- [41] 薛晶月,王丽华,谢雨,高景,贺俊东,吴彦. 西南地区草地群落灌木植物盖度对生态系统碳库的影响. 植物生态学报, 2019, 43(4): 365-373.
- [42] 郭子豪,李瑶珂,巩合德. 滇中地区矮杨梅灌丛碳密度分配格局研究. 西部林业科学, 2020, 49(1): 149-155, 161.
- [43] 宁晨,闫文德,宁晓波,梁小翠,王新凯. 贵阳市区灌木林生态系统生物量及碳储量. 生态学报, 2015, 35(8): 2555-2563.
- [44] Fu Q, Xu L L, Zheng H Y, Chen J H. Spatiotemporal dynamics of carbon storage in response to urbanization; a case study in the Su-Xi-Chang region, China. Processes, 2019, 7(11): 836.
- [45] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 67-76.
- [46] 李克让,王绍强,曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. 中国科学: D 辑; 地球科学, 2003, 33(1): 72-80.
- [47] Li C J, Bai X Y, Tan Q, Luo G J, Wu L H, Chen F, Xi H P, Luo X L, Ran C, Chen H, Zhang S R, Liu M, Gong S H, Xiong L, Song F J, Xiao B Q, Du C C. High-resolution mapping of the global silicate weathering carbon sink and its long-term changes. Global Change Biology, 2022, 28(14): 4377-4394.
- [48] 曹军,张懿锂,刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. 地理研究, 2002, 21(5): 551-560.
- [49] 张明阳,王克林,邓振华,刘会玉,岳跃民,段亚锋. 基于 RBFN 的桂西北喀斯特区植被碳密度空间分布影响因素分析. 生态学报, 2014, 34(12): 3472-3479.
- [50] 张远东,赵常明,刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应. 自然资源学报, 2004, 19(6): 761-768.
- [51] 刘彦春,张远东,刘世荣. 川西亚高山次生桦木林恢复过程中的生物量、生产力与材积变化. 生态学报, 2010, 30(3): 594-601.
- [52] 甘红,刘彦随,王大伟. 土地利用类型转换的人文驱动因子模拟分析. 资源科学, 2004, 26(2): 88-93.
- [53] 李艳华,许月卿,孙丕苓,赵菲菲. 生态脆弱区土地利用变化及驱动力——以河北省张北县为例. 水土保持通报, 2015, 35(5): 239-244.