

周玉琴, 赵筱青, 冉玉菊, 等. 多情景下喀斯特山区土地利用对碳储量的影响[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(8): 205–216. Zhou Yuqin, Zhao Xiaoqing, Ran Yuju, et al. Impact of land use on carbon storage in karst mountainous areas under multiple scenarios[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(8): 205–216.

多情景下喀斯特山区土地利用对碳储量的影响

周玉琴¹, 赵筱青^{1*}, 冉玉菊², 徐逸飞¹, 普军伟¹,
叶显民¹, 汪小宝¹, 王越男^{2,3}, 瞿国寻⁴

(1. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500;

3. 西南联合研究生院, 云南 昆明 650092;

4. 云南省国土资源规划设计研究院, 云南 昆明 650500)

摘要:喀斯特地区生态系统脆弱, 对气候变化响应敏感, 碳汇潜力巨大。其生态治理对土地利用格局的改变, 使生态系统碳储量的变化显著, 对陆地生态系统碳循环和区域生态安全具有深远影响。该研究以滇东南典型喀斯特地区文山壮族苗族自治州为例, 运用InVEST模型和混合元胞自动机(MCCA)模型, 预测了自然发展、耕地保护以及生态保护3种情景下2035年碳储量的分布状况, 并采用全局Moran's *I*指数以及敏感性指数, 分别研究碳储量的时空演变规律和土地利用变化对碳储量的影响。结果表明: (1)文山州土地利用以耕地、林地、草地为主, 占研究区总面积的90%以上。地类转换集中在林地、草地、耕地以及建设用地之间。(2)研究区整体碳储量较高, 但随着土地利用方式变化, 造成固碳效果和潜力均出现一定程度的降低。2000–2020年, 碳储量共减少了0.66 Tg。Moran's *I*指数均通过90%的置信度, 表明碳储量在空间上呈现出空间集聚效应。(3)2035年, 在自然发展、耕地保护以及生态保护3种情景下的碳储量分别为192.40、192.00、193.13 Tg。3种情景下, 碳储量分别变化了0.11、–0.29、0.84 Tg。根据敏感性指数发现碳储量对土地利用变化敏感, 林地变化是造成碳储量变化的主要原因。相比可知在生态保护的情景下, 区域碳汇能力较强。建议研究区科学提高林地面积和优化现有用地的空间格局, 控制建设用地等措施提升碳储量。

关键词:土地利用变化; 碳储量; MCCA模型; 情景模拟; 滇东南喀斯特地区

中图分类号: X171 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.0174.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)08-0205-12

Impact of Land Use on Carbon Storage in Karst Mountainous Areas Under Multiple Scenarios

ZHOU Yuqin¹, ZHAO Xiaoqing^{1*}, RAN Yuju², XU Yifei¹, PU Junwei¹,
YE Xianmin¹, WANG Xiaobao¹, WANG Yuenan^{2,3}, QU Guoxun⁴

(1. College of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China;

3. Southwest United Graduate School, Kunming 650092, China;

4. Yunnan Institute of Land Resources Planning and Design, Kunming 650500, China)

Abstract: The ecosystem in karst areas is fragile, sensitive to climate change, and has huge carbon sink potential. Its ecological management changes the land use pattern, causing significant changes in ecosystem carbon storage, and has a profound impact on the carbon cycle of terrestrial ecosystems and regional ecological security. Using the Wenshan Zhuang and Miao Autonomous Prefecture, a representative karst region in the southeastern Yunnan Province, as a case study, the study used the InVEST model and the hybrid cellular automaton (MCCA) model to predict the distribution of carbon stocks in 2035 under three scenarios: natural development, cultivated land protection, and ecological protection. The global Moran's *I* index and sensitivity index were used to study the spatiotemporal evolution of carbon stocks and the impact of land use changes

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-01-24; 修回 2024-04-20

基金项目: 云南省西南联合研究生院科技专项-基础研究和应用基础研究重大项目(202302AO370007); 云南省产教融合研究生联合培养基地项目(CZ22622203-2022-29); 云南大学研究生科研创新基金项目(KC-23235375)

作者简介: 周玉琴(1999–), 女, 硕士研究生, 研究方向为低碳发展与土地利用管理, (电子信箱) wzyq0120@163.com; *通讯作者, 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地利用环境效应及国土空间开发与保护, (电子信箱) xqzhao@ynu.edu.cn。

on carbon stocks respectively. The results show the land use in Wenshan Prefecture is mainly cultivated land, forest land and grassland, accounting for more than 90% of the total area of the study area. Land conversion is concentrated between forest land, grassland, cultivated land and construction land. The study area boasts a substantial carbon storage, yet as land use patterns shifted, its carbon sequestration capacity and potential underwent a decline. Over the span of 2000 to 2020, the carbon storage reduced by 0.66 Tg. Moran's I index all passed 90% confidence level, indicating that carbon storage shows a spatial agglomeration effect in space. In 2035, forestland change is the main cause of carbon storage changes. The carbon storage under the three scenarios of natural development, ecological protection and cultivated land protection was 192.40 Tg, 192.00 Tg and 193.13 Tg respectively. Under the three scenarios, carbon storage changed by 0.11 Tg, -0.29 Tg and 0.84 Tg, respectively. According to the sensitivity index, it was found that carbon stocks are sensitive to land use changes. By comparison, it can be seen that under the scenario of ecological protection, the regional carbon sequestration capacity is stronger. It is suggested that the study area should scientifically increase the forest area, optimize the spatial pattern of existing land use, and control construction land to enhance carbon storage.

Key words: land use change; carbon storage; MCCA model; scenario simulation; southeast Yunnan karst region

温室气体过度排放会加速全球气候变暖,打破生态系统平衡,对人类经济社会的可持续发展产生严重影响。目前,“碳排放、碳减排”已成为当前的研究热点^[1]。近年来,许多研究表明土地利用变化是一系列区域和全球环境问题的重要驱动因素,其对陆地碳循环的影响已成为气候变化研究的重要内容^[2,3]。研究表明土地利用变化中产生了大量的碳交换,影响了陆地生态系统的碳储量^[4]。工业革命以来,土地利用变化引起的碳排放量约占人类活动引起的总碳排放量的1/3,已成为第二大碳排放源^[5,6]。提升生态环境质量,有效提高陆地生态系统的碳汇功能,是实现二氧化碳减排既经济又环保的重要手段。因此,定量评估区域土地利用变化及其对碳储量的影响,从而探寻土地利用结构优化途径以提高区域生态系统碳储量,对认识区域生态系统碳储量特征及实现“双碳”目标具有重要现实意义。

在陆地生态系统碳储量研究中,InVEST模型是一种依据土地利用类型及其变化来评估碳储量的当量因子模型。与传统的CASA^[7]、FORCCHN^[8]、LPJ-GUESS^[9]、DNDC^[10]等碳储量估算方法相比,InVEST模型具有数据需求少,运行速度快等优点^[11,12]。其准确性已在全球、区域等尺度得到了验证^[13]。尽管当前模型难以动态评估土地利用转变对碳储量变化的影响,但结合土地利用动态模拟模型可有效弥补这一局限。因此,越来越多的学者将目前最广泛使用的土地利用模拟模型CA-Markov^[14]、CLUE-S^[15]、FLUS^[11]、PLUS^[16]等与InVEST模型耦合用于评估土地利用变化的碳储量效应。然而,目前使用的土地利用模拟模型将每个栅格单元视作有且仅有一个地类信息,忽略了实际单元通常是混合的,无法反映土地利用单元内土地利用组成之间的竞争和相互作用^[17]。而混合元胞自动机(MCCA)模型优势正在于每个栅格

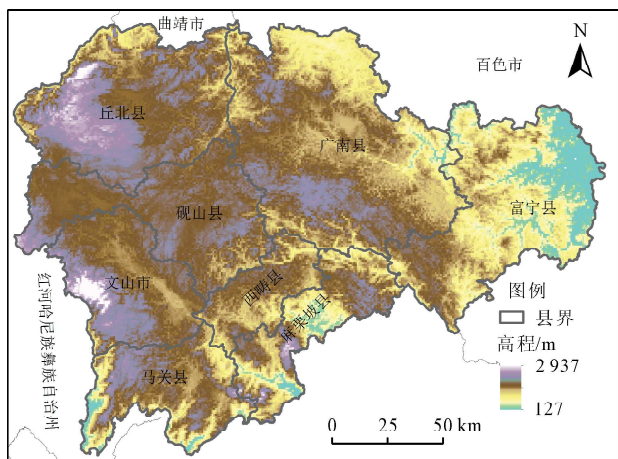
内包含丰富的地类信息^[18],减少了人为交互模拟过程中的误差^[19],能够预测土地利用单元内多种土地利用类型更高精度的细微变化,提高了土地利用模拟的精度。

云南是中国喀斯特地区石漠化问题最为严峻、分布最广且治理难度极大的地区之一^[20]。其喀斯特作用显著,生态系统稳定性对外界因素变化十分敏感^[20,21],是全国生态修复的重点区域,但也具有巨大固碳潜力,故成为落实“双碳”战略的重要战场。阐明不同历史时期喀斯特地区碳储量时空分布格局,科学预测不同情景下土地利用及其碳储量时空变化特征,探究区域土地利用变化及其对碳储量的影响,对优化喀斯特地区土地利用格局和合理生态决策,推动区域可持续发展是十分迫切的。鉴于此,本研究以云南典型喀斯特山区文山壮族苗族自治州为案例区,结合《文山州国土空间总体规划(2021-2035年)》,以2000、2010、2020年3期土地利用数据以及二次修正得到的碳密度等数据为基础,运用MCCA模型模拟3种情景下预测2035年土地利用变化,并利用InVSET模型探究土地利用变化对碳储量的影响。研究成果有助于落实城市绿色发展理念,加强区域生态治理及促进双碳目标的实现,以期对喀斯特地区实现可持续发展和加强人地系统协调提供理论支持。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

文山壮族苗族自治州(以下简称文山州)(22°40'~24°48'N,103°35'~106°12'E)(图1),位于云南省东南部,国土面积31 391.49 km²。文山州年均降雨量779 mm,年均气温19℃,地势西北高、东南低,最高海拔2 937 m,最低海拔127 m,土壤类型主要为红壤、石灰岩土,属于典型的喀斯特岩溶地貌。虽然文山州雨量充沛,



注：该图基于国家标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822的标准地图制作。

图1 研究区地理位置示意
Fig.1 Geographic location of the study area

但降雨分布不均,主要集中在西南部,而东部相对较少,属低纬高原季风气候。区域内岩溶地貌广泛,岩溶面积占全州面积超过50%,约为16 792.5 km²,其中石漠化问题严重,石漠化面积约占岩溶面积的60%。截至2023年末,全州常住人口为339.7万,地区生产总值为1 462.32亿元,比2022年增长5.1%,三次产业结构占比为17.6:37.0:45.4。

该州是喀斯特地貌发育典型、生态环境敏感、石漠化问题突出、人地矛盾尖锐、社会经济发展面临显著挑战的山区^[22]。因此本研究选择的研究区能够真实反映喀斯特山区的自然环境特点。自提出“质量强州”以来,发展迅速,脆弱的生态环境以及快速发展下的土地利用变化,具有代表性和典型性,能够为喀斯特地区土地利用变化与碳储量之间的关系提供一定的基础。

1.2 数据来源

本文所使用的文山州土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),土地利用/覆被重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6类^[23];DEM数据来自地理空间

数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),坡度、坡向、数据是基于高程数据使用ArcGIS软件计算所得;土壤数据来自OpenLandMap数据集(<https://openlandmap.org/>);社会经济数据来源于中国科学院资源环境与科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)及统计年鉴;基础地理信息数据包括文山州道路、铁路、河流,来源于OSM (Open Street Map, <http://www.openstreetmap.org/>),借助欧氏距离法计算得到。为保证研究的科学性,使用的所有数据统一为30 m精度。

2 研究方法

2.1 碳储量测算

本研究采用InVEST模型中的Carbon模块^[24],基于土地利用与碳密度计算碳储量。另外,由于死亡有机碳储量极低,且数据难以获取,因此本研究不做考虑^[25]。计算公式如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中, C_{total} 为总碳储量; C_{above} 为地上碳储量; C_{below} 为地下碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量。

碳密度数据确定方法根据前人^[26,27]的相关研究,优先选取与本研究相似或临近地区的碳密度值,再结合降水数据经过修正得到文山州碳密度数据,由于死亡有机质碳密度获取困难,故本文不考虑,最后得到文山州不同地类碳密度值(表1)。碳密度修正公式如下:

$$K_B = \frac{e^{0.0054 \times P_A}}{e^{0.0054 \times P_B}} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{3.3968 \times P_A + 3996.1}{3.3968 \times P_B + 3996.1} \quad (3)$$

式中, P_A 、 P_B 分别是区域A和B的年平均降水量,mm;本研究分别选取了全国平均降水和文山州的平均降水量进行计算; K_B 为地上生物碳密度修正因子; K_s 是土壤碳密度修正因子。

表1 文山州各土地利用类型碳密度
Table 1 Carbon density of various land use types in Wenshan Prefecture

土地利用类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	文献来源
耕地	2.68	10.62	38.60	[28,29]
林地	47.83	16.76	42.77	[28,30,31]
草地	35.47	10.12	30.40	[28,32]
水域	0.00	0.00	33.98	[33]
建设用地	0.00	0.00	7.88	[33]
未利用地	8.49	0.77	40.30	[28,31]

2.2 未来土地利用与覆被预测

为了预测未来土地利用的多场景变化,本研究采用了MCCA模型对土地利用结构进行模拟。这是一种基于土地利用定量转化规则挖掘、土地利用混合结构模拟和精度评价而建立的新型CA模型^[34],用

于揭示土地利用结构的多样性,更准确地描述土地利用结构的变化。在确定驱动因素对不同土地利用结构的影响中,从自然环境和社会经济因素2个方面共选取了15个驱动因素。自然环境因素^[32,35,36]包括DEM、坡度、坡向、土壤类型、土壤含水量、平均气温、平

均降水等7个因子;社会经济因素^[37,38]包括人均GDP、人口密度、距主干道距离、距高速公路距离、距一级道路距离、距二级道路距离、距铁路距离、距河流距离等8个因子。

MCCA模型的空间模拟包括3个方面:(1)利用随机森林(random forest regression, RFR)挖掘土地利用结构与驱动因素之间的转换规则,生成土地利用发展潜力图集;(2)利用轮盘赌机制确定各土地利用类型比例,模拟结构变化,生成各土地利用类型空间分布图,实现土地利用的定量模拟;(3)根据3个精度指标(OA、mcFOM以及平均RE)评价精度。

为了满足不同的发展需求,参考之前研究^[39-41],综

合考虑文山州2000-2020年土地利用转移矩阵,在MCCA模型中设置自然发展、耕地保护和生态保护发展3种情景,模拟文山州2035年的土地利用,情景设置如下:自然发展情景(S1),各类用地的变化将延续当前的趋势,不做任何人为的干预和调整;耕地保护情景(S2),为了确保粮食安全和农业生产的可持续发展,强调对耕地的保护,特别是永久基本农田,这些区域被设置为限制发展区,限制耕地向其他地类的转换;生态保护情景(S3),基于历史发展趋势,将生态红线及自然保护区内的林地、草地、水域和未利用地设为限制区,限制其向其他地类转换。多情景转移矩阵设置见表2。

表2 多情景转移矩阵设置
Table 2 Multi-scenario transfer matrix settings

地类	自然发展情景						耕地保护情景						生态保护情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
d	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1

注:a、b、c、d、e和f分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种地类。1表示地类可以发生转换。0表示地类不可以发生转换。

2.3 碳储量空间分布特征

全局空间自相关可以揭示空间单元分布现象的特征及空间单元相互之间的作用机理^[42,43],揭示整个区域总体的空间关联及其差异的显著性,检验整个区域中各空间单元的属性值是否存在集聚特征。在本研究中全局Moran's I指数反映了研究区碳储量空间相关性的总体特征。公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中, $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$;I为全局Moran's I的值;n为空间单元的数量; x_i 和 x_j 表示第i个和第j个研究对象的观测值; $\bar{x}$ 为所有空间单元属性值的均值; w_{ij} 为空间单元的权重值。

2.4 土地利用对碳储量的影响

通过敏感性指标(SI)分析碳储量对土地利用转型的响应,可以衡量1%土地利用转型对碳储量的影响^[34]。SI绝对值越大,土地利用转型对碳储量的影响越明显。SI为正表明土地利用转型提高了碳储量,而SI为负表明土地利用转型起到了降低碳储量的作用。公式如下:

$$SI = \frac{(C_{\text{end}} - C_{\text{start}}) / C_{\text{start}} \times 100\%}{L_c} \quad (5)$$

式中,SI为敏感度指数,%; C_{start} 为起始年的碳储量总量,Tg; C_{end} 为末年碳储量总量,Tg; L_c 为综合土地利用动态度,%。

3 结果分析

3.1 2000-2020年土地利用及碳储量变化

3.1.1 2000-2020年土地利用变化特征

土地利用动态度反映了文山州2000-2020年土地利用类型的变化面积和变化速率。根据2000年和2020年土地利用现状发现,其土地利用类型以耕地、林地、草地为主,三者占文山州总面积的95%以上,20年间土地利用格局发生了一定变化。表3展示土地利用变化面积与动态度。20年间,林地、建设用地是地类面积变化最明显的,林地面积减少了123.84 km²,建设用地增加了169.42 km²,是6个地类中变化最强烈的土地利用类型。

根据动态度分析,建设用地和水域的土地利用变化显著,其他土地利用类型变化不明显,林地动态变化量较小,是较为平稳的地类。林地面积基本不变的原因是文山州为了石漠化综合治理而实施的一系列林草生态保护与修复工程。水域面积增加是由于湿地保护与修复工程的实施,而建设用地的动态度变化剧烈归因于城市化和工业化的快速发展。

表3 2000–2020年文山州土地利用变化动态度

Table 3 Dynamic degree of land use change in Wenshan Prefecture from 2000 to 2020 (km ²)						
土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000年	6 638.90	18 182.59	6 279.41	86.85	37.23	166.51
2020年	6 571.96	18 058.75	6 334.86	149.94	206.65	69.33
变化面积	-66.94	-123.84	55.45	63.09	169.42	-97.18
变化率/%	-1.01	-0.68	0.88	72.64	455.06	-58.36
动态度/%	-0.050 5	-0.035 4	0.044 5	3.662 3	22.753 9	-2.918 0

土地利用转移矩阵有效揭示了区域土地利用在特定时期内的结构变化特征,清晰反映了各类土地类型之间的转换情况。表4反映了具体土地利用类型的转移流向变化,20年间,草地–林地转化显著,转移面

积为540.63 km²,占总转移面积的18.63%;其次是林地转为草地的面积也基本相同,转移了524.64 km²,占总转移面积的18.08%。耕地–建设用地的转移面积也较大,转移了112.22 km²。

表4 2000–2020年文山州土地利用类型转移矩阵表

Table 4 Land use type transfer matrix of Wenshan Prefecture from 2000 to 2020 (km ²)							
2000年	2020年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	转出总计
耕地	—	414.34	282.72	24.39	112.22	1.11	834.79
林地	479.87	—	524.64	49.39	52.09	1.34	1 107.32
草地	252.75	540.63	—	13.07	16.13	0.84	823.41
水域	14.51	8.83	1.56	—	0.23	0.00	25.13
建设用地	6.03	3.35	0.69	1.34	—	0.00	11.41
未利用地	69.25	0.16	14.69	16.33	0.04	—	100.46
转入总计	822.41	967.31	824.30	104.52	180.71	3.28	—

3.1.2 2000–2020年碳储量变化分析

采用InVEST模型的Carbon模块对文山州2000、2010、2020年碳储量进行计算,其碳储量分别为192.95、192.64、192.29 Tg。

根据图2可知,从土地利用类型看,林地是文山州的主要碳库。2000–2020年文山州碳储量整体呈下降趋势,减少了0.66 Tg。其中2000–2010年下降了0.31 Tg,2010–2020年减少了0.35 Tg。2000–2020年期间,城市化的发展,建设用地的扩张侵占了林地的面积,使得林地的碳储量减少了0.99 Tg。在这20年间,草地、水域面积分别增加了55.45、63.09 km²,其碳储量分别增加了0.21、0.21 Tg。

从碳储量空间变化特征(图3)看,2000–2020年文山州碳储量空间分布无较大差别。碳储量较低的区域

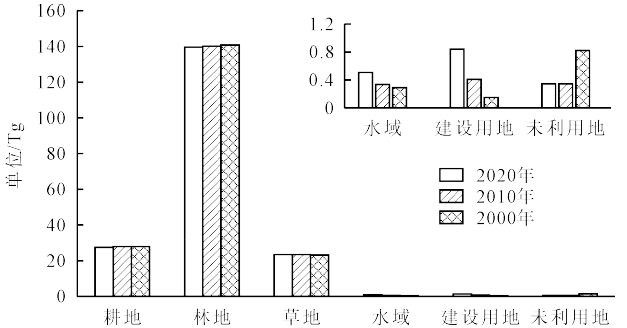


图2 2000–2020年文山州不同土地利用类型碳储量
Fig.2 Carbon storage of different land use types in Wenshan Prefecture from 2000 to 2020

域集中为建设用地,碳储量较高的区域主要为林地;碳储量高值集中在富宁县,较低区域为城市化程度较高的文山市;碳储量明显减少的区域与建设用地扩张区域基本保持一致。因此,建设用地的扩张降低了研究区的碳储量。

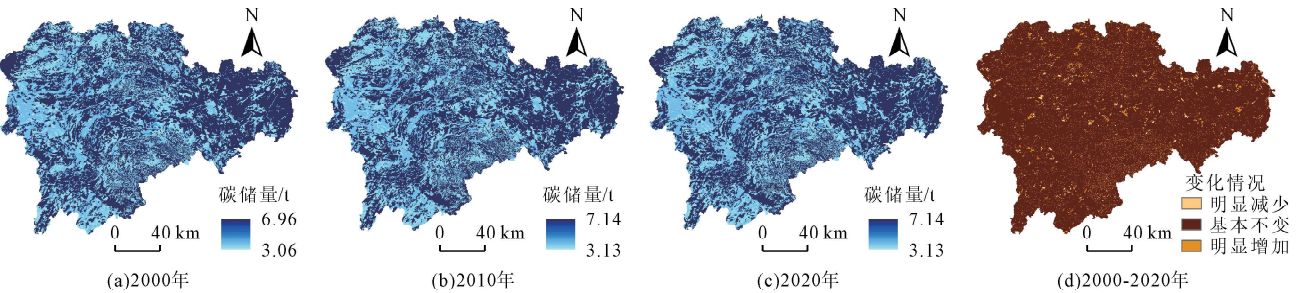


图3 2000–2020年文山州碳储量空间分布及其变化

Fig.3 Spatial distribution and changes of carbon storage in Wenshan Prefecture from 2000 to 2020

全局 Moran's *I* 指数能够反映碳储量的全局特征。因此,采用全局 Moran's *I* 指数来分析文山州的碳储量空间特征。如表 5 所示,2000–2020 年 Moran's *I* 指数均为正值,表明文山州碳储量具有正相关性。此外, $P<0.05$, $Z>1.96$,表明研究区碳储量分布具有空间聚集特征。

表 5 碳储量的全局 Moran's *I* 指数
Table 5 Global Moran's *I* index of carbon stock

年份	Moran's <i>I</i> 指数	Z 值	P 值
2000	0.194 4	2.761	0.028 2
2010	0.172 9	2.548	0.019 3
2020	0.192 8	2.448	0.009 3

3.2 2035 年土地利用与碳储量情景模拟

3.2.1 多情景模拟土地利用变化

以 2000 年与 2010 年的数据为基础,采用 MC-CA 模型对 2020 年土地利用数据进行模拟,并与 2020 年真实的土地利用进行对比分析判断,其 OA(0.92)、mcFOM(0.25) 和平均 RE(0.57) 表明 MC-CA 模型模拟精度高、性能稳定,可以用来预测未来的土地利用混合结构。本研究选取了 3 种土地利用类型(耕地、林地、草地)的土地利用混合结构,见图 4。

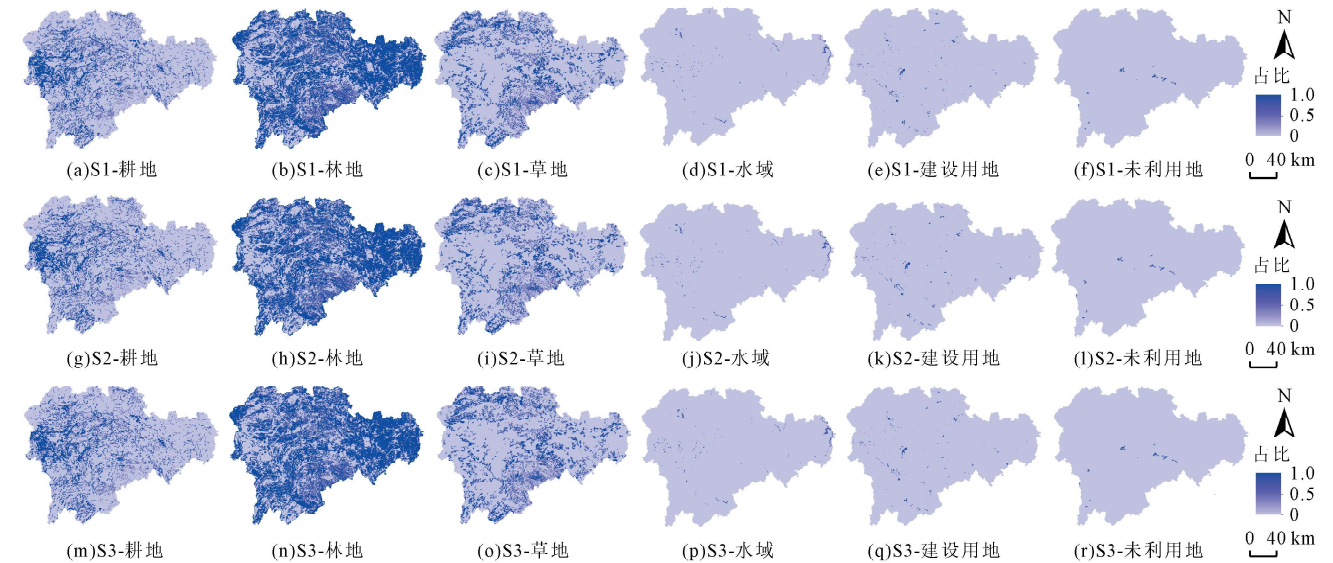


图 4 多情景下土地利用空间结构图
Fig.4 Land use spatial structure map under multiple scenarios

通过设置不同地类间的成本矩阵和邻域因子权重,利用 2000、2010、2020 年土地利用数据模拟文山州 2035 年土地利用混合结构。表 6 表明,在自然发展情景下,建设用地和林地面积增加,分别增加了 97.02、51.34 km²,而耕地和草地面积减少,分别减少了 95.97、54.31 km²。建设用地面积的增加与目前城市化的发展进程保持一致,而耕地的变化趋势与目前农村劳动

力减少而给造成大量耕地闲置而转成其他地类的趋势是一致的;而在耕地保护情景下,耕地面积增加了 72.36 km²,主要来自于林地向耕地的转换;在生态保护情景下,林地面积增加了 252.49 km²,耕地和草地的面积分别减少了 168.97、139.66 km²。因此,耕地、草地是林地面积增加的主要来源。可以看出,文山州地类转换主要集中在耕地、林地、草地之间。

表 6 2020–2035 年土地利用变化
Table 6 Land use changes from 2020 to 2035

土地利用类型	面积				面积变化		
	2020 年	2035 年					
		S1	S2	S3	S1	S2	S3
耕地	6 571.96	6 475.99	6 644.32	6 402.99	−95.97	72.36	−168.97
林地	18 058.75	18 110.09	18 002.86	18 311.24	51.34	−55.89	252.49
草地	6 334.86	6 280.55	6 316.00	6 195.20	−54.31	−18.86	−139.66
水域	149.94	151.96	151.37	196.74	2.02	1.43	46.8
建设用地	206.65	303.67	207.59	216.06	97.02	0.94	9.41
未利用地	69.33	69.23	69.35	69.25	−0.10	0.02	−0.08

3.2.2 土地利用多情景模拟下碳储量变化

基于 MCCA 模型得到文山州 2035 年 3 种情景(自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景)

下的土地利用混合结构格局。利用 InVEST 模型对文山州未来 3 种情景下碳储量进行计算,见表 7。

表7 3种情景下文山州不同地类碳储量变化
Table 7 Carbon storage changes in different land types in Wenshan Prefecture under three scenarios (Tg)

土地利用类型	不同情景下碳储量变化		
	S1	S2	S3
耕地	-0.40	0.30	-0.70
林地	0.31	-0.52	1.86
草地	-0.21	-0.08	-0.52
水域	0.01	0.00	0.16
建设用地	0.40	0.01	0.04
未利用地	0.00	0.00	0
总计	0.11	-0.29	0.84

2000–2020年,文山州的碳储量呈下降趋势。根据 InVEST 模型得到 2035 年文山州碳储量数据(图 5)。与 2020 年碳储量相比,在耕地保护情景下碳储量呈现减少趋势,而在自然发展以及生态保护情景下呈现上升趋势。主要是由于林地是文山州的主要碳汇,建设用地为主要碳源。而在自然保护情景下,

建设用地的面积分别增加了 97.02、51.34 km²,来源于耕地(较高碳密度)向建设用地(较低碳密度)以及草地(较低碳密度)向林地(较高碳密度)的转换,林地面积增加的碳储量大于建设用地增加减少的碳储量,故碳储量增加了 0.11 Tg。目前,中国的粮食安全面临巨大的挑战,耕地是实现粮食安全战略的基础,保障耕地数量是当前的头等大事。在耕地保护情景下,文山州耕地面积增加了 72.36 km²,是 3 种情景下的唯一的正向增长。其主要为林地(较高碳密度)向耕地(较低碳密度)的转换,林地面积减少了 55.89 km²,因此在耕地保护情景下碳储量减少了 0.29 Tg。而在生态保护情景下,由于草地造林和退耕还林促进了林地面积的增长,提高了文山州的碳储量和固碳能力。

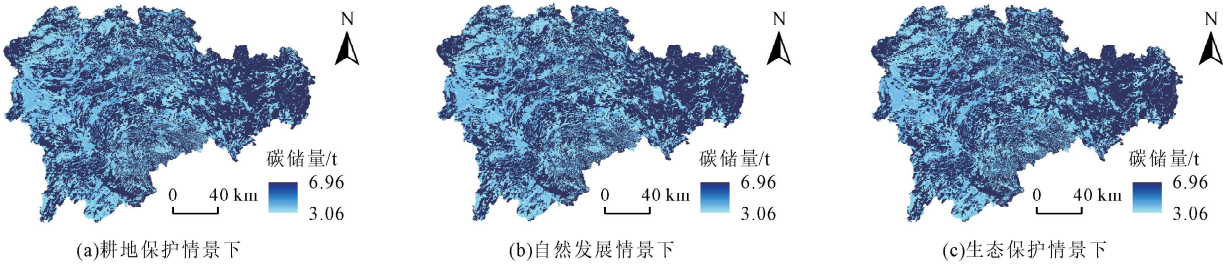


图5 多情景下碳储量空间分布图
Fig.5 Spatial distribution map of carbon storage under multiple scenarios

3.3 土地利用变化对碳储量的影响

InVEST 模型模拟碳储量时,各地类碳密度被视为恒定值,从而地类间的转变成为碳储量变化的关键因素。

由表 8 可知,草地和林地是文山州碳库的主要来源,其碳储量占总碳储量的 80% 左右。2000–2020 年,各地类碳储量变化状况与地类面积变化一致。相比于 2020 年,在自然发展情景下,2035 年建设用

地和林地面积增加明显,因而碳储量增加明显;在耕地保护情景下,耕地面积增加了 72.36 km²,其主要为林地向耕地的转换,林地面积减少了 55.89 km²,因而碳储量减少了 0.29 Tg;生态保护情景下,由于实施了水源保护等生态保护措施,在该情景下,作为主要碳汇的林地面积增加了 252.49 km²,因此,与另外 2 种情景相比较,其碳储量增加的最多,增加了 0.84 Tg。

表8 2000–2035年文山州不同土地利用类型下的碳储量
Table 8 Carbon storage under different land use types in Wenshan Prefecture from 2000 to 2035 (Tg)

土地利用类型	2000年	2010年	2020年	2035年		
				S1	S2	S3
耕地	27.80	27.79	27.51	27.11	27.82	26.81
林地	140.66	140.26	139.67	139.98	139.15	141.53
草地	23.21	23.49	23.42	23.21	23.34	22.9
水域	0.30	0.34	0.51	0.52	0.51	0.67
建设用地	0.15	0.41	0.84	1.24	0.85	0.88
未利用地	0.82	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
总计	192.94	192.64	192.29	192.40	192.00	193.13

通过土地利用转移矩阵得到碳储量损益表(表 9)。结果表明:2000–2020 年耕地转林地以及草地转林地是导致碳储量增加的主要类型;林地转草地、耕地以及建设用地是导致碳储量损失的主要类型。20

年间,草地转林地的面积为 540.63 km²,碳储量增加了 1.92 Tg;林地向草地转换了 524.64 km²,碳储量减少最大,有 1.86 Tg。总体而言,林地和草地的相互转换使得这 20 年期间增加了 0.06 Tg 碳储量。2000–

2020年期间,其他地类向建设用地转换减少了0.19 Tg 碳储量;耕地、草地、水域等其他地类向林地转换增加了3.28 Tg 碳储量,其中草地向林地转换增加的碳储量占了58.54%,耕地向林地转换增加的碳储量占比38.41%;而林地-耕地的转换面积为479.87 km²,减少了碳储量1.49 Tg。通过预测2035年不同情景下碳储量发现:在自然发展情景下,草地向林地的

转换时碳储量增加的主要原因,增加了0.31 Tg;耕地保护情景下,耕地面积主要来源于林地,而林地作为主要的碳汇,故在此种情景下碳储量减少了0.29 Tg;在生态保护情景下,由于实施了退耕还林、还草等一系列生态保护措施,使得低碳密度地类向高碳密度地类转换,故在该情景下碳储量增加了0.84 Tg。

表 9 2000-2020 年文山州土地利用转移和碳储量损益矩阵
Table 9 Land use transfer and carbon storage profit and loss matrix in Wenshan Prefecture from 2000 to 2020

土地利用类型	项目	2020 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	耕地	碳储量损益/Tg	-	1.26	-0.13	-0.019	-0.011 4
		转移面积/km ²	-	414.34	282.72	24.39	112.22
	林地	碳储量损益/Tg	-1.491 5	-	-1.861 42	-0.211 68	-0.188 72
		转移面积/km ²	479.87	-	524.64	49.39	52.09
	草地	碳储量损益/Tg	0.113 5	1.924 9	-	-0.003 9	0.006 2
		转移面积/km ²	252.75	540.63	-	13.07	16.13
	水域	碳储量损益/Tg	0.010 9	0.036 9	0.000 4	-	0.000 1
		转移面积/km ²	14.51	8.83	1.56	-	0.23
	建设用地	碳储量损益/Tg	0.000 6	0.012 2	-0.000 3	-0.000 9	-
		转移面积/km ²	6.03	3.35	0.69	1.34	-
	未利用地	碳储量损益/Tg	-0.011	0.043 3	-0.087 3	0.000 0	-0.000 1
		转移面积/km ²	14.69	16.33	69.25	0.04	0.16

为了进一步揭示土地利用变化对碳储量的影响,本研究根据公式(5)计算了不同情景情景下SI值(表10)。SI值越大,土地利用对碳储量的影响越大;SI值越小,土地利用对生碳储量的影响越小。从时间变化上看,在耕地保护情景下,SI为负数,表明在该情景下土地利用变化对碳储量具有负向作用;在自然发展和生态保护情景下,SI为正数,表明在该情景下土地利用变化对碳储量皆具有正向作用,且在生态保护情景下,土地利用变化对碳储量的促进作用更为明显。

表 10 2020-2035 年不同情景下 SI 变化值
Table 10 SI changes under different scenarios from 2020 to 2035

情景类型	SI
S1	1.2
S2	-7.5
S3	4.4

空间分布如图6所示,在自然发展、耕地保护以及生态保护情景下,土地利用动态变化引起碳储量变化的SI值空间分布基本保持一致。其负向极敏感值空间分布较为分散,主要集中在研究区东部的文山市和丘北县;负向敏感性主要分布在广南县;正向极敏感性主要集中在研究区东部的富宁县。

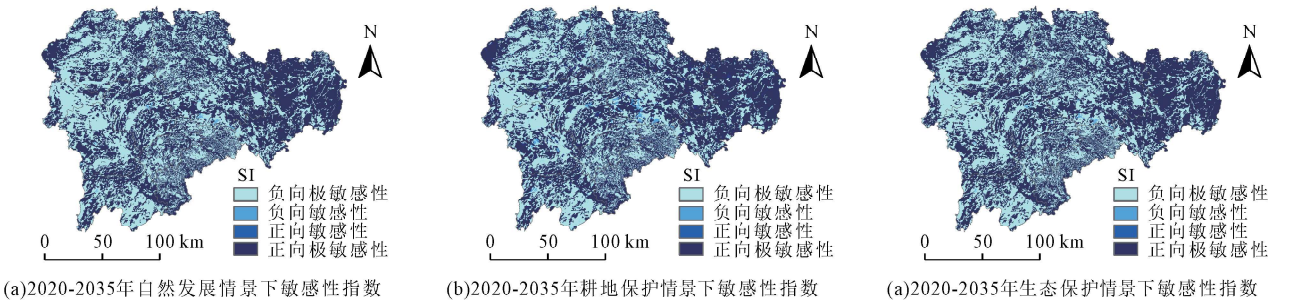


图6 2000-2035年碳储量对土地利用变化的敏感性指数
Fig.6 Sensitivity index of carbon stocks to land use changes from 2000 to 2035

4 讨论与结论

4.1 结论

以云南典型喀斯特地区文山州为例,基于2000、2010和2020年3期土地利用数据,采用MCCA模型模拟了2035年文山州多情景下土地利用混合结构格

局。在此基础上,运用InVEST模型,估算了研究区不同情景下碳储量变化,并探讨了土地利用类型转换对碳储量的影响。

(1)土地利用变化:2000–2035年耕地、林地、草地是文山州主要土地利用类型。2000–2020年以林地、草地两者之间的相互转换为主,耕地向建设用地次之。

(2)土地利用变化对碳储量的影响:2000–2020年碳储量呈持续下降趋势,总体下降0.66 Tg,呈现空间聚集特征。林地、草地、耕地是碳储量的主要来源,高碳密度–低碳密度的转换是造成碳储量减少的主要原因。

(3)多情景下碳储量变化趋势:至2035年,自然发展情景和生态保护情景下碳储量呈上升趋势,分别增加了0.11 Tg和0.84 Tg;在耕地保护情景下呈下降趋势,减少了0.29 Tg。造成碳储量在不同情景下不同变化趋势的主要原因是林地面积的增减变化。生态保护情景下,林地面积变化引起碳储量增加1.86 Tg,占总碳储量增加的90%以上;在耕地保护情景下,林地向耕地面积的转换,是造成此情景下碳储量减少的主要原因。

4.2 讨论

4.2.1 预测未来碳储量的新方法 with 不确定性

为弥补单一模型的不足,本研究耦合MCCA模型与InVEST模型来定量评估3种情景下文山州土地利用变化及其对碳储量的影响,为探讨土地利用变化下的碳储量提供了一种新的可能。与FLUS、PLUS等传统模型在通常假设每个像元在每次迭代上都只含有一种土地利用类型不同,MCCA模型是基于混合像元运行的,混合像元由多种土地利用类型的覆盖比例组成,可以更好地表达土地利用的连续变化,能为土地利用混合结构的时空动态建模提供新视角,充分发挥了MCCA模型在土地利用模拟以及InVEST模型在碳储量评估上的优势。

但这2种模型在耦合过程中还存在以下的不确定性:(1)碳密度是InVEST模型准确评估碳储量的重要输入参数,本研究在进行密度修正时,由于数据的可获取性,未考虑光合速率以及微生物活动2个重要因素对碳密度的影响;(2)未考虑碳密度的年际变化;(3)MCCA模型在模拟不同情景未来的土地利用状况与现实发展需求仍存在一定的差距。

4.2.2 土地利用变化及其对碳储量的影响

土地利用变化对生态系统碳储量具有重要影响,当碳密度高的土地类型向碳密度低的土地类型转化时,将会导致碳储量减少,反之会造成碳储量增加,这与张玥等^[44]研究结果一致。本研究发现,2000–2020

年文山州耕地面积减少,建设用地面积增加。一种可能的解释是文山州城市化和工业化水平不断提高^[45]。根据文山州“十二五”以及“十三五”发展规划,文山州的交通、水利等基础设施得到极大的发展,可在一定程度上促进文山州城市化的发展。因此,与2000–2010年相比,2010–2020年土地利用类型转换更加明显。另外一种可能是,根据《云南省统计年鉴》,从2007–2020年,企业数量从4 933变成了30 565,扩大至6倍。2000–2020年建设用地增加了169.42 km²,城镇化率由27.3%增加至37.2%。文山州作为我国的沿边城市之一,面临着巨大的发展机遇。自2015年发改委提出《推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动》以来,根据《文山壮族苗族自治州统计年鉴》,就业人数从2015的3.06×10⁵人增长到2020年的3.35×10⁵人。因此,工厂建设用地和工人住宅用地可能是研究区建设用地增加的一种可能。已有的研究结果也证实了这一可能^[19]。此外,本研究发现文山州碳储量分布呈现东边高、低值零散分布的格局,低储区主要以西畴县文山市为中心,该区城镇化进程较快,碳储量较低。同时,高储量区主要分布在富宁县、广南县等地,这些地区主要土地类型为林地,碳储量较强。Zhu等^[46]研究了西北干旱区碳储量的空间分布,结果表明,高储量区主要集中在草地、林地和耕地,碳储量低储量区主要集中在荒漠地区,这与本研究结果一致。

从碳储量潜力预测看,不同发展情景下碳储量呈现出不同的变化趋势。在自然发展情景下,延续2000–2020年土地利用变化趋势,碳储量上升0.11 Tg,尽管耕地(碳密度较高)向建设用地(碳密度较低)的转换使碳储量有所下降,但由于森林面积的增加带来了更大幅度的碳储量上升,最终抵消了这种负面影响。因此,在此情景下,碳储量变化并不显著。粮食安全一直是关注的热点话题,耕地是实现粮食安全战略的基础,确保耕地数量至关重要。在耕地保护情景下,文山州耕地面积增加72.36 km²,是3种情景下唯一的正增长。这是因为采取了一系列措施加大了对耕地的保护,同时适当提高其他土地利用类型转为耕地的比例,导致耕地面积增加。在此情景下,文山州耕地面积主要来源于高碳密度(林地、草地)的补充。因此,碳储量呈现下降趋势。生态文明建设为国之根本,必须坚定践行绿水青山即金山银山的核心理念。生态保护情景下,林地面积增加252.49 km²,碳储量增加1.86 Tg。其原因在于,生态保护情景下通过草地造林、退耕还林等措施促进了林地面积的增加,由于林地碳密度较高,提高文山州碳固存能力,生态系统

服务功能提升的同时一定程度上限制了人类活动和经济发展。这种方式被认为是增强城市碳储存和促进绿色、可持续发展的重要路径。随着城市化加快,在确保耕地红线和耕地占补平衡的前提下,建设用地主要源于耕地的转化,而林地则成为补充耕地的重要来源。国土空间规划通过划定“三区三线”,有效保护了林地、耕地、草地,并遏制了建设用地的无序扩张,降低了非建设用地向建设用地的转换速度。因此,应加强对“三区三线”的管理与控制,适度控制建设用地的增加。其次,挖掘低效用地潜力,增加城市公共空间和生态空间。加强高碳密度区域的生态保护引导城市林草可持续发展,实现生命生态和谐共生格局,营造健康稳定的城市生态系统与和谐人居环境。最后,要注重土地利用复合功能,完成由单一土地类型向生产、生活、生态复合功能的转变,加大生态保护参与力度,推行土地合理布局,减少二氧化碳排放,通过资源综合利用和土地规模经营提高生态效率。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4021-4026.
- [3] Homer C, Dewitz J, Jin S M, et al. Conterminous United States land cover change patterns 2001-2016 from the 2016 National Land Cover Database[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020,162:184-199.
- [4] Arneeth A, Sitch S, Pongratz J, et al. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed[J]. Nature Geoscience, 2017,10:79-84.
- [5] Houghton R A, House J I, Pongratz J, et al. Carbon emissions from land use and land-cover change[J]. Biogeosciences, 2012,9(12):5125-5142.
- [6] 石晶,石培基,王梓洋,等. 基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学, 2024,45(1):300-313.
Shi Jing, Shi Peiji, Wang Ziyang, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage in Jiuquan City ecosystem based on PLUS-InVEST model[J]. Environmental Science, 2024,45(1):300-313.
- [7] 吴国伟,赵艳玲,付艳华,等. 复垦矿区土地利用类型变化对植被碳储量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015,23(11): 1437-1444.
Wu Guowei, Zhao Yanling, Fu Yanhua, et al. Impact of reclamation-driven land use change on vegetation carbon store in mining areas[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2015,23(11):1437-1444.
- [8] 赵俊芳,曹云,马建勇,等. 基于遥感和FORCCHN的中国森林生态系统NPP及生态服务功能评估[J]. 生态环境学报, 2018,27(9):1585-1592.
Zhao Junfang, Cao Yun, Ma Jianyong, et al. Evaluation of NPP and ecological service function of China's forest ecosystem based on remote sensing and FORCCHN[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(9):1585-1592.
- [9] Zhao M W, Yue T X, Zhao N, et al. Combining LPJ-GUESS and HASM to simulate the spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(2):249-268.
- [10] 邱建军,唐华俊. 北方农牧交错带耕地土壤有机碳储量变化模拟研究:以内蒙古自治区为例[J]. 中国生态农业学报, 2003,11(4):86-88.
Qiu Jianjun, Tang Huajun. Study on the situation of soil organic carbon storage in ecotone between agriculture and animal husbandry: a case study from Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2003,11(4):86-88.
- [11] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等. 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[J]. 热带地理, 2019,39(3):397-409.
Liu Xiaojuan, Li Xia, Liang Xun, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model[J]. Tropical Geography, 2019,39(3): 397-409.
- [12] 杨激威,赵娟,朱家田,等. 基于PLUS和InVEST模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 自然资源遥感, 2022,34(4):175-182.
Yang Lianwei, Zhao Juan, Zhu Jiatian, et al. Spatial-temporal change and prediction of carbon stock in the ecosystem of Xi'an based on PLUS and InVEST models[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022,34(4):175-182.
- [13] Piyathilake I D U H, Udayakumara E P N, Ranaweera L V, et al. Modeling predictive assessment of carbon storage using InVEST model in Uva Province, Sri Lanka[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022,8(2):2213-2223.
- [14] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型 of 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.

- [15] 张沐锋,刘万侠,王健恩,等. 基于Clue-S模型的石马河流域东莞段生态系统服务价值变化情景模拟[J]. 水土保持通报, 2021,41(1):152-160.
- Zhang Mufeng, Liu Wanxia, Wang Jian'en, et al. Scenario simulation of ecosystem service value change in Dongguan section of Shima River Basin based on Clue-S model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 152-160.
- [16] 王子昊,王冰,张宇飞,等. 基于PLUS-InVEST模型的呼和浩特市多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J]. 农业资源与环境学报, 2024,41(2):292-304.
- Wang Zihao, Wang Bing, Zhang Yufei, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024,41(2):292-304.
- [17] Zhang D, Huang Q X, He C Y, et al. Impacts of urban expansion on ecosystem services in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China: a scenario analysis based on the shared socioeconomic pathways[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017,125:115-130.
- [18] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Mixed-cell cellular automata: a new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures[J]. Landscape and Urban Planning, 2021,205:103960.
- [19] Hu J X, Yan D Y, Wang W L. Estimating carbon stock change caused by multi-scenario land-use structure in urban agglomeration[J]. Sustainability, 2023,15(6):5503.
- [20] 吕妍,张黎,闫慧敏,等. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J]. 生态学报, 2018,38(24):8774-8786.
- Lyu Yan, Zhang Li, Yan Huimin, et al. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(24):8774-8786.
- [21] 李玉辉,丁智强,吴晓月. 基于Strahler面积-高程分析的云南石林县域喀斯特地貌演化的量化研究[J]. 地理学报, 2018,73(5):973-985.
- Li Yuhui, Ding Zhiqiang, Wu Xiaoyue. A quantitative study on the karst geomorphic evolution of Shilin County in Yunnan Province based on Strahler hypsometric analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(5):973-985.
- [22] 赵筱青,石小倩,李驭豪,等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. 地理学报, 2022,77(3):736-756.
- Zhao Xiaqing, Shi Xiaoqian, Li Yuhao, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(3):736-756.
- [23] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014,69(1):3-14.
- Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatio-temporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(1):3-14.
- [24] 付玮,夏文浩,樊童生,等. 塔里木河流域生态系统碳储量的情景预测分析[J]. 干旱区地理, 2024,47(4):634-647.
- Fu Wei, Xia Wenhao, Fan Tongsheng, et al. Scenario projection analysis of ecosystem carbon stocks in the Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2024,47(4):634-647.
- [25] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学, 2011,33(10):1932-1939.
- Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Zheng Zeqing, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu Province[J]. Resources Science, 2011, 33(10):1932-1939.
- [26] 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.
- [27] 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[J]. Journal of Arid Environments, 2013,89:67-76.
- [28] 许进龙,卢新海,黄天能,等. 滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量时空演变及其驱动因子[J]. 水土保持研究, 2023,30(6):406-414.
- Xu Jinlong, Lu Xinhai, Huang Tianneng, et al. Temporal and spatial evolution of ecosystem carbon storage and its driving factors in the Yunnan-Guizhou-Guangxi rocky desertification area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):406-414.
- [29] 李月,罗红芬. 黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测:以普定县为例[J]. 环境科学, 2024,45(2):961-973.
- Li Yue, Luo Hongfen. Spatio-temporal evolution and multi-scenario simulation of carbon storage in karst regions of central Guizhou Province: taking Puding County as an example[J]. Environmental Science, 2024,45(2):961-973.
- [30] 包承宇,曾和平,张梦妍,等. 云南省土壤有机碳储量估算及空间分布[J]. 水土保持通报, 2014,34(6):260-266.
- Bao Chengyu, Zeng Heping, Zhang Mengyan, et al. Spatial distribution and estimation of soil organic carbon in Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6):260-266.
- [31] 张靖宙,吴秀芹,肖桂英. 云南省建水县不同石漠化治理模

- 式下碳储量功能评估[J]. 北京林业大学学报, 2018,40(8): 72-81.
- Zhang Jingzhou, Wu Xiuqin, Xiao Guiying. Evaluation on carbon storage function under different rocky desertification control models in Jianshui County of Yunnan Province, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018,40(8):72-81.
- [32] 李井浩,柳书俊,王志杰. 基于FLUS和InVEST模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J]. 水土保持研究, 2024,31(3):287-298.
- Li Jinghao, Liu Shujun, Wang Zhijie. Multi-scenario simulation of spatiotemporal changes of land use pattern and ecosystem services in Yunnan-Guizhou Plateau based on FLUS and InVEST models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):287-298.
- [33] 帕茹克 吾斯曼江,艾东,方一舒,等. 基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学, 2024,45(1):287-299.
- Paruke Wusimanjiang, Ai Dong, Fang Yishu, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon storage in Kunming City based on InVEST and CA-Markov model[J]. Environmental Science, 2024,45(1):287-299.
- [34] Zhang P, Liu L, Yang L W, et al. Exploring the response of ecosystem service value to land use changes under multiple scenarios coupling a mixed-cell cellular automata model and system dynamics model in Xi'an, China[J]. Ecological Indicators, 2023,147:110009.
- [35] Xiang S J, Wang Y, Deng H, et al. Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China[J]. Ecological Indicators, 2022,142:109205.
- [36] Xu C L, Zhang Q B, Yu Q, et al. Effects of land use/cover change on carbon storage between 2000 and 2040 in the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2023,151: 110345.
- [37] 王志远,吴凡,万鼎,等. 多情景模拟区域土地利用变化对碳储量的影响[J]. 中国环境科学, 2023,43(11):6063-6078.
- Wang Zhiyuan, Wu Fan, Wan Ding, et al. Multi-scenario simulation of the impact of regional land use change on carbon reserve[J]. China Environmental Science, 2023,43(11): 6063-6078.
- [38] 黄韬,刘素红. 基于PLUS-InVEST模型的福建省土地利用变化与碳储量评估[J]. 水土保持学报, 2024,38(2):246-257.
- Huang Tao, Liu Suhong. Evaluation of land use change and carbon storage in Fujian Province based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38 (2):246-257.
- [39] 张斌,夏秋月,董捷,等. 大都市郊区土地利用变化对碳储量时空格局影响研究:以武汉市黄陂区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2023,39(6):699-712.
- Zhang Bin, Xia Qiuyue, Dong Jie, et al. Research on the impact of land use change on the spatio-temporal pattern of carbon storage in metropolitan suburbs: taking Huangpi District of Wuhan City as an example[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(6):699-712.
- [40] 朱文博,张静静,崔耀平,等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019,74(3):446-459.
- Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: a case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(3):446-459.
- [41] 陈理庭,蔡海生,张婷,等. 基于Markov-FLUS模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报, 2022,42(10): 3947-3958.
- Chen Liting, Cai Haisheng, Zhang Ting, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(10):3947-3958.
- [42] Song W, Wu K N, Zhao H F, et al. Arrangement of high-standard basic farmland construction based on village-region cultivated land quality uniformity[J]. Chinese Geographical Science, 2019,29(2):325-340.
- [43] 何炬,张雪松. 县·乡镇两级尺度下耕地质量空间自相关分析:以湖北省广水市为例[J]. 安徽农业科学, 2018,46(14): 7-11.
- He Ju, Zhang Xuesong. Spatial autocorrelation analysis of arable land quality at county and township scale: a case study of Guangshui City, Hubei Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018,46(14):7-11.
- [44] 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.
- Zhang Yue, Dai Yaqiang, Chen Yuanyuan, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission[J]. China Land Science, 2022, 36(6):100-112.
- [45] Mamipour S, Beheshtipour H, Feshari M, et al. Factors influencing carbon dioxide emissions in Iran's provinces with emphasis on spatial linkages[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019,26(18):18365-18378.
- [46] Zhu G, Qiu D, Zhang Z, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. Ecological Indicators, 2021,127:107770.