

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.049.

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.

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

许进龙^{1,2}, 卢新海¹, 黄天能³, 温雪³, 覃云¹

(1.华中师范大学 公共管理学院, 武汉 430079; 2.广西财经学院

海上丝绸之路与广西区域发展研究院, 南宁 530007; 3.广西财经学院 经济与贸易学院, 南宁 530007)

摘要:[目的]探究特殊生态脆弱区——滇桂黔石漠化片区的生态系统碳储量时空演变规律及其驱动因子,为科学评估其生态治理效果、优化土地利用格局、提高生态系统碳储量、提升生态系统碳汇能力等提供理论参考。[方法]综合运用土地利用转移矩阵、InVEST模型和地理探测器等方法,分析滇桂黔石漠化片区1990—2018年土地利用变化特征、生态系统碳储量时空演变规律及空间分异驱动因子。[结果]滇桂黔石漠化片区城市建设蓬勃发展,石漠化治理效果良好。研究期内,建设用地和水域面积分别增加116.38%和76.40%,以石漠化裸岩石质地为为主的未利用地则减少47.45%并主要转化为草地和林地;滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量呈波动下降趋势,2018年降至30.61亿t,较1990年减少了0.52%。建设用地扩张对耕地和林地的侵占是碳储量减少的主要原因;滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量空间分布差异明显,始终维持西南较高、南部次之、北部较低的空间分异特征,整体依次对应云南片区、广西片区以及贵州片区;滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量空间分布差异受自然地理要素和社会经济要素共同作用,但人类活动影响最为显著。“距离县中心”始终是影响力最强的单因子,且所有具备较强影响力的交互因子均包含“距离县中心”因子。[结论]滇桂黔石漠化片区的生态系统碳储量呈波动下降趋势,受自然地理、社会经济多重因素影响,其空间分布呈西南较高、南部次之、北部较低的特征。

关键词:滇桂黔石漠化片区; 生态系统碳储量; 时空演变; 驱动因子

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)06-0406-09

Temporal and Spatial Evolution of Ecosystem Carbon Storage and Its Driving Factors in the Yunnan-Guizhou-Guangxi Rocky Desertification Area

Xu Jinlong^{1,2}, Lu Xinhai¹, Huang Tianneng³, Wen Xue³, Tan Yun¹

(1.School of Public Administration, Central China Normal University, Wuhan 430071, China; 2. Institute for Maritime Silk Road and Guangxi Regional Development, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530004, China; 3.Economic and Trade College, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530004, China)

Abstract:[Objective] The aim of this study is to explore the temporal and spatial evolution of ecosystem carbon storage and its driving factors in rocky desertification area of Yunnan, Guangxi and Guizhou, which is a special ecologically fragile area, so as to provide theoretical reference for scientifically evaluating the ecological management effect, optimizing land use pattern, improving ecosystem carbon storage and enhancing ecosystem carbon sink capacity.[Methods] Land use transfer matrix, InVEST model and geographical detector were used to analyze the characteristics of land use change, the temporal and spatial evolution of ecosystem carbon storage and the driving factors of spatial differentiation in rocky desertification areas of Yunnan,

收稿日期:2022-09-18

修回日期:2022-10-26

资助项目:国家自然科学基金项目“滇桂黔石漠化片区脱贫农户返贫抑制与可持续生计研究”(72004037);国家自然科学基金项目“国家安全视角下我国中越边境土地利用系统安全预警及优化配置研究”(42161046);广西自然科学基金资助项目“广西边境土地利用与管控对国家安全的影响评价及优化调控”(2021JJJB150070)

第一作者:许进龙(1991—),男,广西百色人,博士研究生,助理研究员,主要从事土地资源管理与区域发展研究。E-mail:943448263@qq.com

通信作者:黄天能(1986—),男,广西百色人,博士,副教授,主要从事土地经济与管理。E-mail:505362152@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Guangxi and Guizhou from 1990 to 2018. [Results] Yunnan-Guizhou-Guangxi Rocky Desertification Area was booming with urban construction and effective rocky desertification control. Land area for construction and water area increased by 116.38% and 76.40%, respectively during the study period, while the unused land, mainly rocky bare rocky land, decreased by 47.45% and was primarily converted into grassland and woodland. A fluctuating decreasing trend of carbon storage in the ecosystem of Yunnan-Guizhou-Guangxi Rocky Desertification Area was observed, which decreased to 3.061 billion tons in 2018, decreased by 0.52% compared with that in 1990. The encroachment of arable land and forest land by the expansion of construction land was the chief reason for the decrease of carbon stock. The spatial distribution of carbon stocks in the Yunnan-Guizhou-Guangxi Rocky Desertification Area ecosystem varied significantly, maintained the spatial differentiation characteristics of being higher level in the southwest, followed by the south and lower level in the north, corresponding to the Yunnan Area, Guangxi Area and Guizhou Area in overall order. Differences in the spatial distribution of carbon stocks in ecosystems in the Yunnan-Guizhou-Guangxi Rocky Desertification Area were influenced by both physical and socio-economic factors, but human activities contributed most significantly. Distance to county center was always the single factor with the greatest influence, and all interactive factors with significant influence included distance to county center. [Conclusion] The carbon storage in the rocky desertification area of Yunnan, Guangxi and Guizhou was fluctuating and decreasing, and it was affected by multiple factors of physical geography and social economy, its spatial distribution was characterized as higher level in the southwest, followed by the south, and lower level in the north.

Keywords: Yunnan-Guizhou-Guangxi Rocky Desertification Area; ecosystem carbon storage; temporal and spatial evolution; driving factors

当前,由于CO₂大量排放、温室气体猛增所引发的全球气候问题已严重威胁全人类命运。在此背景下,2020年我国提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的重大战略决策。陆地生态系统(森林、草地和湿地等)通过吸收大气中的CO₂等温室气体来调节区域气候,其碳储量的提高能够有效减少大气中CO₂含量^[1],是缓解温室效应、减缓全球气候变化、实现区域碳中和目标的有效方式之一。受自然地理和人类活动影响,石漠化地区土地过度开垦开发,植被稀疏,生态环境问题严峻,是陆地生态系统碳循环的薄弱部分^[2]。

近年来,随着全球温室效应日益严峻,我国学者逐渐关注陆地生态系统碳储量问题,并主要围绕以下三方面开展了一系列研究:一是土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响机制研究。认为不同的土地利用类型其碳密度之间存在明显差异,土地利用类型之间的转化会引起植被、土壤等一系列变化,造成区域碳密度的增加或减少,最终导致区域生态系统碳储量波动^[3-5];二是生态系统碳储量的时空演变分析。研究尺度涵盖流域、省域、市域和城市群等各类空间单元^[6-8]。受自然环境、社会经济等各方面影响,各地区土地利用时空格局不同,因此生态系统碳储量空间分布差异较大且碳储量演变趋势增减不一,带有明显的地域特征^[9-11];三是生态系统碳储量的驱动因子探

索。探索方法包括地理加权回归、主成分分析、线性回归等,并可将驱动因子归纳为自然地理因子和社会经济因子两大类,自然地理因子包括降水量、气温等,社会经济因子包括GDP、城镇化率等^[12-14]。

滇桂黔石漠化片区地跨珠江、长江两大流域,是珠江、长江流域重要生态功能区,同时集民族地区、革命老区和边境地区于一体,自然条件恶劣、生态环境脆弱。2012年,国务院扶贫办、国家发展改革委联合发布《滇桂黔石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011—2020年)》,提出“扎实推进石漠化综合整治,建设长江流域重要水源涵养区,构筑珠江流域重要生态安全屏障”,2021年《国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》再次强调“科学推进石漠化综合治理,完善生态安全屏障体系”。当前,生态系统碳储量的研究已取得丰硕成果,但仍有以下两方面值得深化和探讨:一是研究区域实证方面,较少关注特殊生态脆弱区——滇桂黔石漠化片区。滇桂黔石漠化片区生态区位重要但生态系统脆弱,是西南地区生态系统碳循环的薄弱部分。但目前鲜有学者针对滇桂黔石漠化片区碳储量展开研究,不利于提升区域生态系统碳储量;二是驱动因子探索方面,侧重于单一层面的自然环境因子或社会经济因子,未能将两者同时纳入分析框架,且研究方法以主成分分析、线性回归等为主,较少考虑驱动因子的时

空差异以及多因子交互影响,不利于准确剖析碳储量变化的深层次原因。

鉴于此,本研究将从以下两方面进行深化和拓展,这也是本研究可能存在的创新点:(1) 研究区域上,聚焦当前研究中较少关注的特殊生态功能区和环境脆弱区——滇桂黔石漠化片区,进一步丰富生态系统碳储量的研究材料,拓展生态系统碳储量研究成果的运用范围;(2) 碳储量驱动因子的探索方法上,将自然环境因子和社会经济因子同时纳入探索框架,利用地理探测器分析单因子以及交互因子对生态系统碳储量的空间分异驱动作用。以期科学评估滇桂黔石漠化片区生态治理效果、优化土地利用格局、提高生态系统碳储量、提升生态系统碳汇能力等提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

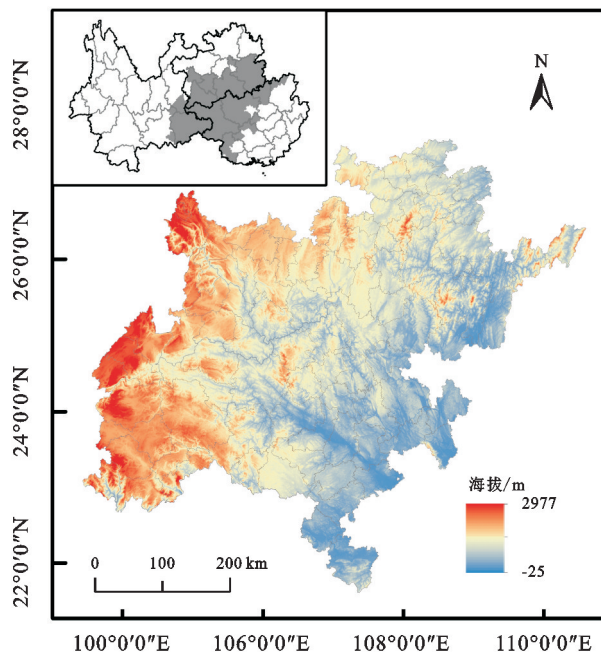
滇桂黔石漠化片区包括云南、广西、贵州三省区的15个地市(市),91个县(区),地跨珠江、长江两大流域,国土总面积为22.8万km²,地形地貌以高原山地为主,碳酸盐类岩石广布,是世界上喀斯特地貌发育最典型的地区之一。气候类型主要为亚热带湿润季风气候,年均降水量880~1991mm。

滇桂黔石漠化片区生态区位和地理位置特殊,地跨珠江、长江两大流域,属国家重点生态功能区,南与越南接壤,少数民族众多,有83个民族自治地方县(区)(图1)。但同时,该片区社会经济发展落后,脱贫攻坚时期有67个国家扶贫开发工作重点县,自然环境脆弱,土层浅薄,可利用土地资源匮乏,且人口数量庞大,2020年总人口3581万人,人地矛盾突出,过度开垦、过度樵采等不合理的人类活动对片区生态系统造成巨大破坏,导致片区土地利用结构失衡、水土流失严重、石漠化问题严峻,有80个县属于国家石漠化综合治理重点县。因此,探究该片区生态系统碳储量的时空演变特征及其空间分异驱动因子,对于改善区域生态系统碳循环、筑牢生态珠江—长江上游安全屏障、加强人地系统协调、推动区域可持续发展、稳固边疆安宁、促进各民族共同繁荣等,均具有十分重要和特殊的意义。

1.2 数据来源

行政区划界线来源于《滇桂黔石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011—2020年)》;1990年、2000年、2010年、2018年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,空间分辨率为30m×30m,并根据中国科学院土地利用分类体系及研究区特点等,将滇桂黔石漠化片区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地六大一级地类;高

程数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),坡度、坡向数据则基于高程数据通过ArcMap中的Slope和Aspect工具计算得到;与高速公路、县城中心以及铁路的距离,原始数据来源于国家基础地理信息系统,并通过ArcMap中的欧式距离工具计算得到。同时,为保证研究数据的权威性、准确性及统计口径的一致性,社会经济数据来源于《中国县域统计年鉴》以及各省市统计年鉴,个别缺失值采用线性插值法补齐。



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作,底图无修改。

图1 滇桂黔石漠化片区地理区位

Fig. 1 The geographical location of the Yunnan Guangxi Guizhou Rocky Desertification Area

2 研究方法

2.1 土地利用动态测度

本研究借助ArcGIS 10.8软件,运用土地利用转移矩阵探究滇桂黔石漠化片区各地类之间的面积转移情况,其公式为:

$$F_{ij} = \begin{vmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{n1} & F_{n1} & \cdots & F_{nn} \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中: F_{ij} 为研究期内土地利用类型*i*转换为土地利用类型*j*的面积;*n*为土地利用类型的数量。

2.2 生态系统碳储量计算

本研究运用InVEST模型计算滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量,其公式为:

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}} \quad (2)$$

$$C_{i-total}=C_i\times A_i$$

(3)

式中: C_i 表示地类*i*的总碳密度; $C_{i-above}$, $C_{i-below}$, C_{i-soil} 和 C_{i-dead} 分别表示地类*i*的地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度和死亡有机质碳密度; A_i 表示地类*i*的面积; $C_{i-total}$ 表示地类*i*的总碳储量。

处于同一气候带的地类其碳密度差异较小^[10],故本研究参考借鉴相关学者研究成果,遵循以下原则获取碳密度数据^[15-16]:优先使用前人对滇桂黔石漠化片区不同地类碳密度的实地测量数据;若实地测量数据不全,则使用滇桂黔石漠化片区不同地类碳密度的

文献整理汇总数据;若实测数据以及文献整理汇总数据均缺失的情况下,则采用全国数据并基于陈光水等学者提出的生物量碳密度和土壤碳密度与气温、降水量的关系模型进行修正^[17]。若同一区域出现不同值,则取其平均数。根据以上优先次序原则最终得出滇桂黔石漠化片区各地类碳密度(表 1)。此外,本研究还与由徐丽等^[18]创建的《2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集》进行验证,结果表明本研究中滇桂黔石漠化片区各地类碳密度值均在其范围之内,片区各地类碳密度数据基本符合区域实情。

表 1 滇桂黔石漠化片区各地类碳密度

Table 1 The carbon density in various regions of the Yunnan Guangxi Guizhou rocky desertification area					t/hm ²	
地类	碳密度				参考文献	
	地上生物 碳密度	地下生物 碳密度	土壤 碳密度	死亡有机质 碳密度	文献来源	文献研究区域
耕地	8.43	1.63	104.10	0.50	包承宇等 ^[19] 、张明阳等 ^[20] 、黄先飞等 ^[21]	云南、广西、贵州
林地	39.33	41.04	71.77	5.65		
草地	1.92	7.20	69.80	0.50		
水域	1.40	1.20	64.03	0.25	林世伟 ^[22] 、朱鹏飞 ^[23] 、杨静怡等 ^[24]	
未利用地	0.74	0.07	43.71	0.00		
建设用地	0.00	0.47	28.42	0.00		

2.3 驱动因子探索

本研究运用地理探测器中的单因子探测和交互因子探测,揭示滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量时空演变背后的驱动力,其公式为:

$$q=1-\frac{1}{N}\frac{\sum_{h=1}^L N_h\sigma_h^2}{\sigma^2}$$

(4)

式中: q 为驱动因子对生态系统碳储量的影响力; L 为变量 Y 或因子 X 的分层(分类或分区); N , σ^2 分别为样本量和方差; N_h , σ_h^2 分别为 h 区域的样本量和离散方差。

q 的取值范围为 $[0,1]$, q 值越大说明驱动因子对生态系统碳储量的影响力越强。生态系统碳储量同时受人类活动和自然环境双重影响,自然环境决定了陆地生态系统的原始形态,人类活动则直接影响陆地生态系统的转化方向。本研究借鉴相关学者研究成果^[12-14],并综合考虑研究区域特点以及指标数据的可获取性等,将城镇化率、人均生产总值等社会经济因子以及坡度、气温等自然地理因子,列为滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量空间分异的待检验驱动因子(表 2)。

表 2 滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量空间分异驱动因子

Table 2 The driving factors of spatial differentiation of carbon storage of ecosystem in Yunnan Guangxi Guizhou Rocky Desertification Area				
驱动因子类型	驱动因子	具体涵义	数据获取方式	单位
社会经济因子	城镇化率	城镇人口/总人口	统计年鉴	%
	人均生产总值	GDP 总值/总人口		元
	人口密度	总人口/区域总面积		人/km ²
	人均财政支出	政府财政总支出/总人口		元
	农业劳动力人均农机总动力	农机总动力/农业劳动力总数		kW
	人均粮食产量	粮食总产量/总人口	ArcMap 欧式距离工具	kg/人
	与高速公路的距离	某点到高速公路的直线距离		m
	与县城中心的距离	某点到县城中心的直线距离		m
	与铁路的距离	某点到铁路的直线距离		m
	年降雨量	全年降雨量总和		mm
自然地理因子	年均气温	全年各日的日平均气温	统计年鉴	℃
	高程	某点沿铅垂线方向到基准面的距离	地理空间数据云 DEM	m
	坡度	某点所处平面与水平面之间的夹角	ArcMap Slope 工具	(°)
	坡向	坡面法线在水平面上的投影方向	ArcMap Aspect 工具	

3 结果与分析

3.1 滇桂黔石漠化片区土地利用变化分析

由表 3 可得出,从土地利用面积变化率看,1990—2018 年,变动率较大的地类依次为建设用地、水域以及石漠化裸岩石质地为主的未利用地,建设用地和水域面积分别增加 116.38%和 76.40%,未利用地减少 47.45%,耕地、林地和草地总面积变化率均在 2%之内。表明滇桂黔石漠化片区城市建设蓬勃发展,石漠化治理效果良好。近年来,国家高度重视片区社会经济发展,颁布了《滇桂黔石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划》等系列规划,水利部和国家林业局牵头组建了由 30 多个中央部委参加的片区部际联席会议制度,从资金、重大项目、用地保障、产业扶贫等多方面扶持片区脱贫攻坚,滇桂黔石漠化片区社会经济得到快速发展,2018 年人均 GDP 提高至 26 505 元,平均城镇化率提升至 42.09%,分别是 1990 年的 51.47 倍和 3.87 倍,随之而来的是建设用地需求急速增加,城市规模迅速扩大;针对片区水资源匮乏等问题,水利部制定实施了《全国水利扶贫规划滇桂黔石漠化片区水利扶贫实施方案》,通过加强水源涵养、加快水利设施建设等一系列措施,切实解决了片区用水、饮水问题,水土保持工程成效显著,水域面积持续扩大;片区坚持脱贫攻坚与石漠化治理同步推进,先后颁布《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》等专项规划,因地制宜在石漠化片区推广种植火龙果、刺梨、金银花等经济作物,将生态脆弱劣势转化为经济发展优势,探索出了生态效益与经济

效益相统一的多种石漠化治理模式,以石漠化裸岩石质地为主的未利用地面积,由 1990 年的 22 112.73 hm² 减少至 11 620.08 hm²,减少幅度高达 47.45%。

从土地利用面积净增减量看,研究期内,净面积减少量最大的地类为耕地、其次为林地,再次为未利用地。虽然耕地面积变化率仅为-1.90%,但减少面积高达 86 842.35 hm²,减少部分主要转化为林地。受退耕还林政策影响,滇桂黔石漠化片区在坡度较高、地力贫瘠、不宜耕作的耕地大范围实施退耕还林政策,也有部分原因是片区水热条件优越,适合种植苗木、速生桉等经济林,受经济利益驱动,该区域大量耕地被转用为经济林地;林地面积变化率仅为-0.59%,但减少面积高达 83 542.14 hm²,减少部分主要转化为耕地和草地。部分林地被开垦成耕地,或者经砍伐后退化成草地;以石漠化裸岩石质地为主的未利用地面积变化率为-47.45%,减少面积为 10 492.65 hm²。减少部分主要转化为林地和草地。同时,减少的耕地和林地也是主要转化为其他生态用地,再次证明片区石漠化治理效果良好。

值得注意的是,减少的建设用地中,高达 50.01% 的比例转化为耕地,原因可能是滇桂黔石漠化片区作为脱贫攻坚战的重要战场,受生态环境恶劣影响,易地扶贫搬迁、生态移民搬迁等工程较多,大量农村低效旧宅基地被复垦成耕地。净面积增加量最大的地类为建设用地和水域,分别增加了 116 623.89 hm², 68 286.33 hm²,进一步佐证了片区城市建设蓬勃发展,建设用地快速扩张,石漠化治理效果良好,水土保持效果显著,水域面积逐年增加。

表 3 1990—2018 年滇桂黔石漠化片区土地利用转移矩阵

Table 3 The land use transfer matrix in the rocky desertification area of Yunnan Guangxi Guizhou from 1990 to 2018

		2018 年					
土地利用方式		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1990 年	耕地	4 124 382.75	237 178.26	116 975.70	23 176.35	75 813.93	189.36
	林地	234 088.83	13 598 224.65	348 309.99	38 229.93	29 834.46	315.09
	草地	121 099.68	323 944.56	3 219 230.43	13 288.50	19 967.31	208.89
	水域	3 519.81	2 321.91	1 060.11	82 214.73	258.66	6.21
	建设用地	6 219.45	1 425.33	926.37	700.38	90 942.21	0.00
	未利用地	1 563.48	2 366.10	7 203.69	57.87	21.06	10 900.53
	增加量	366 491.25	567 236.16	474 475.86	75 453.03	125 895.42	719.55
	减少量	453 333.60	650 778.30	478 508.94	7 166.7	9 271.53	11 212.20
	净增减	-86 842.35	-83 542.14	-4 033.08	68 286.33	116 623.89	-10 492.65
土地利用面积变化率/%		-1.90	-0.59	-0.11	76.40	116.38	-47.45

3.2 滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量时空演变分析

从时间尺度上看,由表 4 可得出,1990—2018 年,滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量呈波动下降趋势,1990 年生态系统碳储量为 30.77 亿 t,2000 年降

至 30.71 亿 t,2010 年升至 30.78 亿 t,达到研究期内最高值,但 2018 年再次下降,并降至研究期内最低值 30.61 亿 t,较 1990 年减少了 0.52%,表明虽然片区石漠化治理成效良好,但生态系统碳储量并未得到有效

提高。主要原因包括以下两方面:首先,固碳能力较高的林地和耕地两大地类总面积均呈减少态势。林地和耕地作为六大地类中碳密度最高和次高的地类,其碳密度分别高达 157.79 t/hm²,114.66 t/hm²,固碳能力均较高,对区域生态系统碳储量具有较大影响。但研究期内,林地和耕地面积分别减少了 83 542.14 hm²,86 842.35 hm²,由此导致片区碳储量减少了 0.23 亿 t。耕地和林地面积的双双减少削弱了片区吸收 CO₂ 的能力;其次,总面积呈增加态势的建设用地和水域,其固碳能力均较低。研究期内,建设用地和水域面积大幅增加,增加幅度分别高达 116.38%和 76.40%,但同时,建设用地和水域在六大地类中碳密度分别为最低和第三低,仅为 28.89

t/hm²,66.88 t/hm²,建设用地和水域面积的增加,仅给片区碳储量带来了 0.08 亿 t 的增量,远远低于林地和耕地面积减少造成的碳储量损失。尤其是建设用地面积增加幅度最大,增加了 116 623.89 hm²,而这部分增加的面积主要来源于耕地和林地,建设用地扩张对耕地和林地的侵占造成的碳储量减少应引起足够重视。2000—2018 年,土壤碳储量对于整个片区碳储量的贡献率均保持在 57%以上水平,生物碳储量历年贡献率也均保持在 39%以上水平,土壤和生物固碳效应对区域碳储量具有重要作用,未来滇桂黔石漠化片区应继续有序推进水土保持工作,促进片区植被恢复,增加物种多样性。

表 4 1990—2018 年滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量

Table 4 The carbon storage of ecosystem in rocky desertification area of Yunnan, Guangxi and Guizhou from 1990 to 2018					
亿 t					
生态系统碳储量		地上生物碳储量	地下生物碳储量	土壤碳储量	死亡有机质碳储量
1990 年	碳储量	6.06	6.19	17.67	0.85
	贡献率	19.70	20.12	57.42	2.75
2000 年	碳储量	6.04	6.16	17.67	0.84
	贡献率	19.65	20.07	57.53	2.74
2010 年	碳储量	6.08	6.20	17.65	0.85
	贡献率	19.74	20.15	57.35	2.76
2018 年	碳储量	6.02	6.16	17.59	0.84
	贡献率	19.68	20.11	57.46	2.75

从空间尺度来看(图 2),1990—2018 年期间,滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量空间分异相对稳定,总体维持西南较高、南部次之、北部较低的空间分异特征,整体依次对应云南片区、广西片区以及贵州片区,内部差异较为明显。云南高度重视石漠化治理和生态植被恢复,先后制定出台《云南省岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》等文件政策,通过采取封山育林、荒山造林、坡改梯等措施进行生态综合治理,创造了著名的“六子登科”世界石漠化治理经验。石漠化面积大幅减少,植被恢复迅速,森林覆盖率由“十一五”末的 31%提高到 2018 年的 48.87%,森林面积的大幅增长,有效提高了生态系统碳储量;近年来,广西出台实施了《石漠化综合治理工程工作方案》等指导性文件,从制度供给和资金支持等方面保障石漠化治理的投入,全区范围内积极推广石漠化治理林业建设,并建立了 100 多个治理示范点,据全国第二次、三次石漠化监测结果,监测期内广西石漠化面积减少 38.72 万 hm²,减少率为 20.2%;贵州石漠化治理力度虽然也逐年加大,石漠化治理效果也日益显现,但生态系统碳储量整体水平在三大片区中始终处于末位水平,原因主要有以下两方面:一是石漠化治理效果稳定性较差。贵州省石漠化程度深,在治理过程中恢复的植被以灌木草为主,生态稳定性较差,研究期内以石漠化裸岩石质地

为主的未利用地减少 33.10%,远低于 47.45%的片区平均水平;二是固碳能力较强的耕地和林地被大量侵占用作城市建设。贵州省作为欠发达地区,近年来社会经济快速发展,“十三五”期间,地区生产总值年均增长 8.5%,高于全国同期水平 2.8 个百分点,建设用地需求强盛,旅游、交通、市政等建设用地快速增加。研究期内贵州石漠化片区建设用地增加了 67 295.7 hm²,增加率为 311.05%,远高于 116.38%的片区平均水平,而这部分增加的建设用地主要来自于耕地和林地,导致生态系统碳储量损失量远高于补充量。

3.3 滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量驱动因子分析

由表 5 看出,滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量的空间分布差异受自然地理要素和社会经济要素共同作用。从单因子看,研究期内,历年影响力排行前 5 的因子略有不同,但“距离县中心”始终是影响力最强的因子,q 值始终维持在 0.72 左右,其次为“人口密度”和“年均气温”,q 值始终维持在 0.30 左右,表明社会经济要素始终占主导地位,尤其是人类活动强度具有巨大影响力。县城是人类活动极度频繁的区域,对自然地貌和植被干扰强烈,土地类型以建设用地为主,其固碳能力较低,同时,人口密度越高,人类活动越剧烈,对建设用地的需求越强烈,对生态系统的干预就越强,植被也更容易受破坏,故“距离县中

心”和“人口密度”这两个因子,始终是影响片区生态系统碳储量空间分布的主要因子。“气温”是影响滇

桂黔石漠化片区植被恢复和生长的主要自然地理因子,这与已有的研究文献相吻合^[25]。

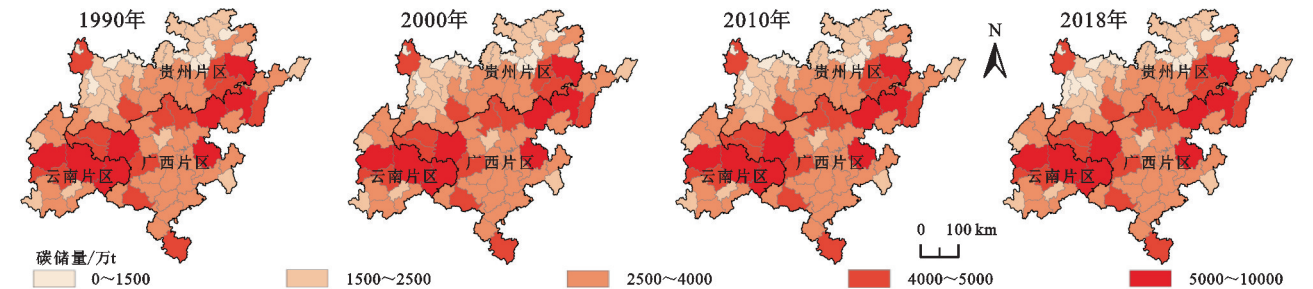


图 2 1990—2018 年滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of carbon storage in the rocky desertification area of Yunnan, Guangxi and Guizhou from 1990 to 2018

从交互探测的结果来看,自然地理要素和社会经济要素两两交互后对生态系统服务价值空间分异的影响力表现为双因子增强型,交互后驱动因子的 q 值均明显大于单因子,表明研究区域生态系统碳储量空间分异是不同驱动因子交互作用的结果,而非单一因子决定。历年影响力排行前 5 的交互因子略有不同,但“距离县中心 \cap 高程”始终是影响力最强的交互因子,其 q 值始终维持在 0.87,滇桂黔石漠化片区主要位于云贵高原,属典型的高原山地构造地形,平原主要分布于低海拔的河谷地带,因此,人类活动最为强烈、对自然生态环境干扰最为剧烈的地区,集中在平原地带的城市区域。同

时,海拔的变化也会造成植被分布类型的差异从而影响碳储量波动。另外,“距离县中心 \cap 年均气温”始终出现在影响力排行前 5 的交互因子中,表明社会经济要素与自然要素之间交互作用影响,大于自然要素与社会经济要素的内部交互作用。值得注意的是,所有具备较强影响力的交互因子中均存在“距离县中心”驱动因子,再次证明人类活动是滇桂黔石漠化片区石漠化问题的最主要原因,对片区生态系统碳储量的空间分异具有巨大影响力^[26],而以石漠化裸岩石质地为主的未利用地以及建设用地,分别是碳密度最低和次低的两种地类,不利于系统碳储量的提高。

表 5 1990—2018 年滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量主要驱动因子

Table 5 The main driving factors of carbon storage of ecosystem in rocky desertification area of Yunnan, Guangxi and Guizhou from 1990 to 2018

1990 年				2000 年				2010 年				2018 年			
单因子	q 值	交互因子	q 值	单因子	q 值	交互因子	q 值	单因子	q 值	交互因子	q 值	单因子	q 值	交互因子	q 值
距离县中心	0.73	距离县中心 \cap 高程	0.87	距离县中心	0.72	距离县中心 \cap 高程	0.87	距离县中心	0.72	距离县中心 \cap 高程	0.87	距离县中心	0.72	距离县中心 \cap 高程	0.87
人口密度	0.33	距离县中心 \cap 城镇化率	0.84	人口密度	0.34	距离县中心 \cap 城镇化率	0.83	人口密度	0.34	距离县中心 \cap 人均财政支出	0.86	人口密度	0.34	距离县中心 \cap 人均财政支出	0.86
年均气温	0.31	距离县中心 \cap 距离公路	0.83	年均气温	0.29	距离县中心 \cap 距离公路	0.83	年均气温	0.33	距离县中心 \cap 人均粮食产量	0.84	年均气温	0.30	距离县中心 \cap 年均气温	0.85
距离铁路	0.11	距离县中心 \cap 农业劳动力人均农机总动力	0.82	城镇化率	0.12	距离县中心 \cap 人均财政支出	0.82	年均降雨量	0.15	距离县中心 \cap 年均气温	0.83	城镇化率	0.15	距离县中心 \cap 距离公路	0.82
坡向	0.10	距离县中心 \cap 年均气温	0.79	距离铁路	0.11	距离县中心 \cap 年均气温	0.80	距离铁路	0.12	距离县中心 \cap 距离公路	0.82	距离铁路	0.11	距离县中心 \cap 人均生产总值	0.81

注:受篇幅所限,本研究仅列出影响力前 5 的单因子和交互因子。

4 研究结论与政策启示

本研究以特殊生态脆弱区——滇桂黔石漠化片区为研究区域,综合运用土地利用转移矩阵、InVEST 模型和地理探测器等方法,探究生态系统碳储量时空演变特征及其空间分异驱动因子,得出如下结论:(1)研究期内,滇桂黔石漠化片区城市建设发展较快,建设用地面积 2018 年较 1990 年增加 116.38%;水域面积大幅增加,2018 年较 1990 年增加 76.40 %;以石漠化裸岩石质地为主的未利用地面积则减少了 47.45%并主要转化为

林地和草地,石漠化治理取得良好成效。(2)滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量呈波动下降趋势,2018 年降至 30.61 亿 t,较 1990 年减少了 0.52%。研究区生态系统碳储量空间分布差异明显,总体维持西南部的云南片区较高、南部的广西片区次之、北部的贵州片区较低的空间分异特征;(3)滇桂黔石漠化片区生态系统碳储量空间分布差异受自然地理要素和社会经济要素共同作用,人类活动影响最为关键。单因子探测中,“距离县中心”始终是影响力最强的因子,其次为“人口密度”和“年均气温”;交互因子探测中,“距离县中心 \cap 高程”

始终是影响力最强的交互因子,“距离县中心 \cap 年均气温”亦始终位列影响力排行前5,同时,所有具备较强影响力的交互因子中均存在“距离县中心”因子。

基于本研究的结论以及所发现的问题,可得出如下政策启示:(1) 加大林地保护力度。将滇桂黔石漠化片区连片林地划入生态公益林,实施林地用途管制和定额管控,严禁商业性采伐,探索建立“滇桂黔石漠化片区林草碳汇发展专项基金”,鼓励引导各类主体参与片区碳汇造林。同时,将海绵城市、森林城市建设纳入片区城镇化发展规划,在城市建设中提高公园绿地面积,提高城市碳储量水平;(2) 提高耕地保护能力。在片区全面推广实施全域土地综合整治,增加耕地面积,改善现有耕地利用条件。同时,扩大耕地休耕试点,充分利用滇桂黔石漠化片区部际、省际联席会议,研究编制《滇桂黔石漠化片区耕地休耕行动方案》;(3) 严格控制耕地、林地转为建设用地。严格把控农用地转用的申请条件,城市建设确需占用耕地、林地,应对占用耕地、林地的必要性、合理性进行全面论证。同时警惕农村居民点建设占用耕地,加快推进村庄规划或控制性详细规划编制工作,清晰界定村庄扩张边界,防止村庄无序扩张占用耕地。同时,积极盘活存量建设用地,加快城市低效用地改造、废弃矿场矿坑复垦、加速易地扶贫搬迁旧宅基地复绿等工作;(4) 继续减少人类活动对片区自然生态系统的干扰,通过新型城镇化、劳务输出、生态移民等方式,减轻重点生态保护区的人口压力。同时进一步优化农村能源结构,积极推广沼气、太阳能、电力和液化气,降低薪柴能源比重,减少对林草植被的破坏。

参考文献:

- [1] 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[J].生态学报,2021,41(1):360-373.
Zhang Y, Shi X Y, Tang Q. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1):360-373.
- [2] 白义鑫,盛茂银,胡琪娟,等.西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响[J].应用生态学报,2020,31(5):1607-1616.
B Y X, Sheng M Y, Hu Q J, et al. Effects of land use change on soil organic carbon and its components in karst rocky desertification of southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5):1607-1616.
- [3] 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 P P, Li Y H, Yin H R, 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.
- [4] 赫晓慧,徐雅婷,范学峰,等.中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J].中国环境科学,2022,42(6):2965-2976.
He X H, Xu Y T, Fan X F, et al. Temporal and spatial variation and prediction of regional carbon storage in Zhongyuan Urban Agglomeration[J]. China Environmental Science, 2022, 42(6):2965-2976.
- [5] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. 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.
- [6] 张斌,李璐,夏秋月,等.基于土地利用的武汉城市圈生态系统服务权衡/协同分析[J].水土保持研究,2022,29(4):377-386,393.
Zhang B, Li L, Xia Q Y, et al. 基于土地利用的武汉城市圈生态系统服务权衡/协同分析[J].水土保持研究, 2022, 29(4):377-386, 393.
- [7] 向超.基于社会-自然生态系统的长株潭城市群土地利用优化研究[D].长沙:湖南师范大学,2021.
Xiang C. Study on land use optimization of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on social-natural ecosystem [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2021.
- [8] 王晓萌,潘佩佩,王晓旭,等.基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(1):80-88.
Wang X M, Pan P P, Wang X X, et al. Research on Ecosystem Service Trade-off/Synergy Relationship in Hebei Province Based on Land Use[J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(1):80-88.
- [9] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报,2021,41(10):4052-4065.
Liu Y, Zhang J, Zhou D M, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10):4052-4065.
- [10] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229,239.
Zhu Z Q, Ma X S, Hu H. Spatio-temporal Evolution and Prediction of Ecosystem Carbon Stocks in Guangzhou City by Coupling FLUS-InVEST Models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):222-229, 239.
- [11] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.

- Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005-2014[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1242-1252.
- [12] 赵胤程, 覃盟琳, 庞雅月, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 345-355.
- Zhao Y C, Q M L, Pan Y Y, et al. Evolution Simulation and Driving Factors of Eco-spatial Carbon Sinks in Beibu Gulf Urban Agglomeration Based on FLUS-InVEST Model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 345-355.
- [13] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6786-6799.
- Li M Y, Shangguang Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 6786-6799.
- [14] 孔蕊, 张增信, 张凤英, 等. 长江流域森林碳储量的时空变化及其驱动因素分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 60-66.
- Long R, Zhang Z X, Zhang F Y, et al. Spatial and Temporal Dynamics of Forest Carbon Storage and Its Driving Factors in the Yangtze River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 60-66.
- [15] 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1198-1213.
- Xiang S J, Zhang Q, Wang D, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000-2020[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1198-1213.
- [16] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 672-683.
- Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 672-683.
- [17] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5148-5157.
- Cheng G S, Yang Y S, Xie J S, et al. Total below-ground carbon allocation in China forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5148-5157.
- [18] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. *中国科学数据: 中英文网络版*, 2019, 4(1): 90-96.
- Xu L, He N P, Yu G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s)[J]. *China Scientific Data*, 2019, 4(1): 90-96.
- [19] 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 C Y, Zeng H P, Zhang M Y, 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.
- [20] 张明阳, 王克林, 邓振华, 等. 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[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3472-3479.
- Zhang M Y, Wang K L, Deng Z H, et al. Factors influencing the spatial distribution of vegetation carbon density in karst landscapes of Northwest Guangxi: a case study based on radial basis function network model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3472-3479.
- [21] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素: 以后寨河喀斯特小流域为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 1056-1067.
- Huang X F, Zhou Y C, Zhang Z M. Characteristics and Affecting Factors of Soil Organic Carbon under Land Uses: A Case Study in Houzhai River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 1056-1067.
- [22] 林世伟. 三江并流”区生态系统服务空间权衡与协同关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- Lin S W. Spatial trade-offs and synergies among ecosystem services in the Three Parallel Rivers Region[D]. Kunming: Yunnan University, 2016.
- [23] 朱鹏飞. 基于 InVEST 模型的广西沿海地区土地利用/覆被变化的生态效应研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2018.
- Zhu P F. Study on Ecological Effect of Land Use/Cover Change in Coastal Area of Guangxi based on InVEST Model[D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2018.
- [24] 杨静怡, 吴峰. 贵阳市 1980—2018 年土地覆盖类型及碳储量变化研究[J]. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2020, 40(4): 115-121.
- Yang J Y, Wu F. Study on Change of Land Cover Type and Carbon Storage During 1980—2018 in Guiyang[J]. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*, 2020, 40(4): 115-121.
- [25] 李坤龙, 郭跃. 2000—2014 年贵州省安顺市 NDVI 变化及其与气温、降水的关系[J]. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 35(5): 120-126.
- Li K L, Guo Y. The Variation of NDVI and Its Relationship with Temperature and Precipitation in Anshun City, Guizhou Province from 2000 to 2014[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2018, 35(5): 120-126.
- [26] 余梦, 李阳兵, 罗光杰. 中国西南岩溶山地石漠化演变趋势[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4267-4283.
- Yu M, Li Y B, Luo G J. Evolution Trend of Rocky Desertification in Karst Mountainous Areas of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4267-4283.