

晏红波, 曾金钊, 卢献健, 等. 近30年岩溶地区碳储量时空变化分析及预测——以红水河流域为例[J]. 中国岩溶, 2025, 44(1): 100-112, 123.

DOI: 10.11932/karst20250107

近30年岩溶地区碳储量时空变化分析及预测 ——以红水河流域为例

晏红波^{1,2}, 曾金钊¹, 卢献健¹, 赵凤阳¹

(1. 桂林理工大学测绘地理信息学院, 广西桂林 541004; 2. 广西空间信息与
测绘重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要: 岩溶地区具有生态脆弱、环境容量小、土地承载力低、抗干扰能力差等特征, 了解岩溶地区生态系统碳储量变化的原因对于预防和控制生态系统退化和支持可持续发展至关重要。本研究以红水河流域为例, 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型评估其 1990 年至 2020 年的岩溶地区碳储量, 并预测了 2030 年不同情景下岩溶地区碳储量的变化。研究结果表明: (1) 1990—2020 年 30 年间红水河流域岩溶地区碳储量总体呈递增趋势, 空间分布特征由东南向西北逐渐升高, 总体的碳源/汇效应为汇大于源, 总增加量为 71.59×10^6 t; (2) 相较于 2020 年, 在自然发展情景和生态保护情景下, 2030 年红水河流域的岩溶地区碳储量分别将增加 7.69×10^6 t 和 10.74×10^6 t; 而城镇发展情景下碳储量将减少 5.14×10^6 t, 城镇发展会导致岩溶地区固碳能力较强的林地减少, 导致岩溶流域固碳能力失衡; (3) 根据地理探测器结果显示土地利用对碳储量的空间异质性解释力最强, 解释力 q 值为 0.833, 以及土地利用与年均 NDVI 因子之间的相互作用对红水河流域碳储量的变化影响最显著, 交互作用解释力为 0.848, 土地利用变化是使得岩溶碳储量升高主要原因。此研究结果可为红水河流域实现岩溶地区生态系统服务碳储量的可持续性发展、为土地利用管理优化提供科学指导提供理论和数据支持。

关键词: 碳储量; 驱动因素; InVEST 模型; 岩溶地区; 红水河流域

创新点: 通过 InVEST 模型和 PLUS 模型估算了典型岩溶地区近 30 年来红水河流域碳储量, 并预测了未来 2030 年三种不同情景下该地区的碳储量时空变化, 深入探讨了自然系统和人类活动对红水河流域碳储量空间异质性的影响, 揭示了土地利用变化是导致岩溶地区碳储量增加的主要原因这一规律。

中图分类号: X171.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)01-0100-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩石圈是地球最大的碳库, 岩溶地区碳汇是与陆地生态系统的生产力和气候调节能力密切相关的重要影响因素^[1]。岩溶生态系统碳储存可以降低全

球碳循环中 CO_2 含量, 达到缓解温室效应和气候变化的效果^[2]。随着中国致力于实现“碳达峰、碳中和”的目标, 提高岩溶生态系统碳储存和碳循环越来越受到各学科研究人员的关注^[3]。近 20 年来, 岩溶地区生态系统在维持自然界生态系统完整性和生物多

基金项目: 国家自然科学基金项目(42361052); 广西自然科学基金项目(2022GXNSFBA035639); 国家自然科学基金项目(42064003)

第一作者简介: 晏红波(1983—), 女, 博士, 教授, 主要从事遥感数据智能处理及地表参数变化监测研究。E-mail: 2009019@glut.edu.cn。

通信作者: 卢献健(1982—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事遥感影像智能处理与应用。E-mail: 2008056@glut.edu.cn。

收稿日期: 2024-04-30

样性以及支撑人类社会经济发展等方面起着至关重要的作用。

岩溶区风化过程中会引起全球的碳排放及碳浓度等多方面变化,研究进程对于解决缓解全球气候变暖和温室效应有着重要作用^[4-5]。目前对于岩溶区碳源/汇研究的传统方法有溶蚀试片估算岩溶地区的土壤有机碳通量^[6-7]、同位素揭示不同季节时期地下水与碳酸盐岩之间的关系^[8-9]、利用碳酸盐岩溶蚀速率与净出级生产力等构建回归方程估算碳酸盐岩石中的CO₂碳通量^[10-11]。而遥感模型在评估岩溶地区碳源/汇的差异和优势主要表现在其具有更广泛的空间覆盖及更高的时空分辨率^[12]。Zeng^[13]等采用改进的MPD,探讨了气候变化对中国西南地区岩溶碳汇的影响,以及全球碳酸盐岩风化碳汇通量对气候和土地利用变化的敏感性。Li^[14]等基于InVEST模型的碳储量和封存模块计算了南明河流域20年来的碳储量,并揭示碳储量的时空扩散特征和演化规律。InVEST模型碳储量模块可以综合评估生态系统服务与权衡的生态经济学模型,可用于评估岩溶区中碳的贮存和流动情况^[15]。

中国西南地区地形复杂,植被茂盛,是典型的岩溶地貌集中分布区,其中广西的岩溶区9.63万km²,占广西总面积的40.7%^[16]。此外,红水河流域的独特性在于其多样的岩溶地貌和高密度人口承载,且红水流域主要由石灰岩、白云岩等溶蚀性岩石组成,同时也是广西岩溶地区的一部分,占据广西约三分之一的面积^[17]。在近百年来,该地区经历了严重的人类干扰、水土流失、土地和植被退化以及岩石荒漠化,这使得红水河流域的岩溶生态系统碳储量更易受到气候变化影响,且频繁的人类活动导致植被覆盖度显著减少,加剧了中国西南岩溶地区的碳流失^[18]。当前一些学者研究了流域生态问题,但他们主要关注流域的水质、污染和管理^[19-20],对自然系统和人类活动对岩溶流域的影响以及驱动力分析的研究仍然不足。鉴于人类活动、全球碳循环和气候变化的相互作用,迫切需要阐明岩溶地区土地利用变化下碳储量的时空演化,并研究相关的驱动力。

因此,以红水河流域为研究区,基于InVEST模型评估1990年、2000年、2010年和2020年研究区生态系统碳储量的变化情况;采用PLUS模型模拟自然发展、城镇优先和生态保护这3个未来情景下的研究区碳储量变化趋势;并利用地理探测器探究自

然系统和人类活动等因子对红水河流域的影响以及影响岩溶地区碳储量空间异质性的主要驱动因子和交互作用类型,为流域岩溶区碳储提供理论依据和数据支持。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

红水河流域位于广西壮族自治区的西北部和中部地区,位于106°08'E~110°23'E, 22°52'N~25°36'N之间,地势西北部高,东南部低。红水河流域是珠江流域的主要支流,是占比广西最大的连片岩溶地区,面积为50479.745 km²。其中,区内岩溶地貌面积为33942.048 km²,占区内总面积的67%^[21]。红水河流域属于中国西南部典型的岩溶流域,由于岩溶地貌分布面积较广,海拔差异显著,区内各类植被中土壤一般土层薄、肥力低,且持水性差,生态环境极为脆弱,岩溶流域碳储功能、水土流失等自然属性的脆弱性和人类活动相互作用导致了岩溶地区严重的生态退化(图1)^[22]。研究区的地质岩性分布图来源于航空物探遥感中心制作发布的“西南岩溶石山地区碳酸盐岩分布图”(https://geocloud.cgs.gov.cn/)。

1.2 数据来源

本研究所采用的红水河流域研究区内的土地利用/覆盖类型数据包括1990年、2000年、2010年和2020年的土地利用数据,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30 m×30 m,并将研究区的土地利用类型分为耕地、草地、林地、湿地、建设用地及水域6类。

土地利用驱动因子数据包括DEM、坡度、降雨、气温、土壤类型、社会经济等数据及矢量道路数据;其中DEM数据来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)平台的SRTMDEM 90 m×90 m分辨率的DEM数据;降雨和气温等气象数据来源于中国气象数据网(https://data.cma.cn/)平台的中国地面气候资料日值数据集(V3.0);社会经济数据包括国内生产总值(GDP)、人口密度(POP)数据和土壤类型数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。为了保证数据坐标投影的一致性,数据集均采用地理坐标系WGS_1984并

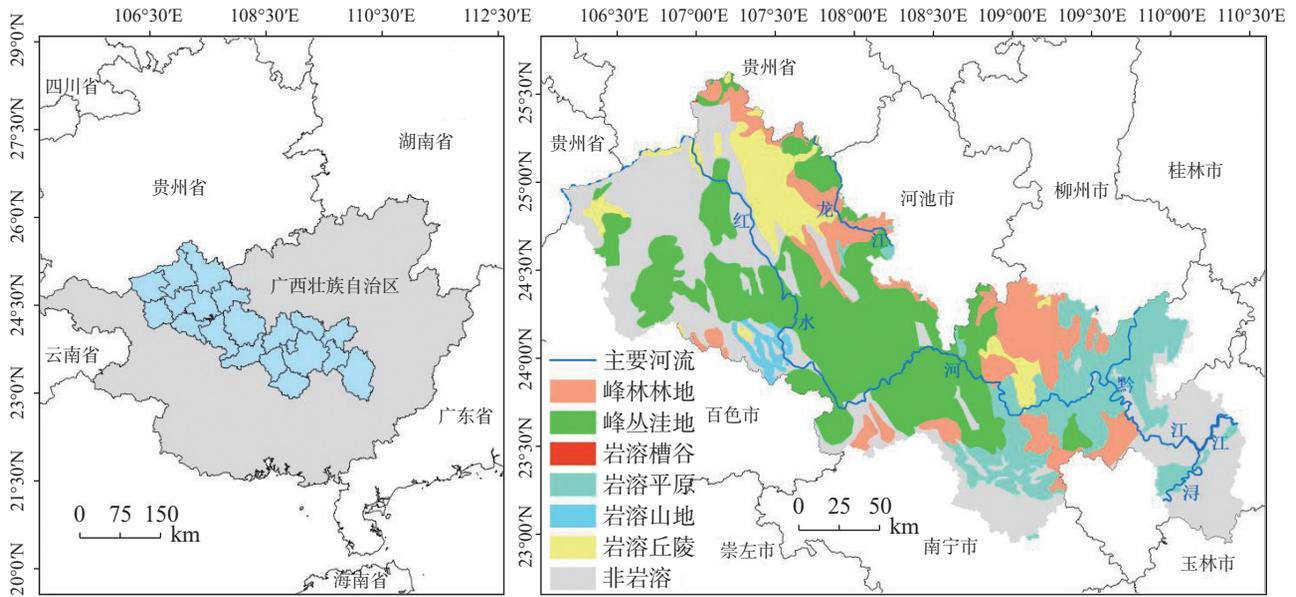


图 1 红水河流域地理位置及岩溶地貌类型分布图

Fig. 1 Geographical location of the Hongshui River Basin and the distribution of its karst landform types

空间分辨率都为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

2 研究方法

2.1 InVEST 模型

本研究基于 InVEST 模型的碳储量模块评估红水河岩溶流域生态系统碳储量的变化情况。该模块的原理基于土地利用类型作为评估单元,并结合各土地类型的碳密度数据计算生态系统中的碳储量^[23]。该模块将生态系统中的碳储量分为四个基本碳库:地上生物碳、地下生物碳、土壤碳以及死亡有机质^[24]。其计算公式如下:

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

式中: C_{total} 、 C_{above} 、 C_{below} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别为岩溶流域总碳密度、地上生物碳密度、地下生物碳密度、土壤碳密度和死亡有机碳密度。为了更清楚地反映红水河流域的碳储量并确保各土地类型碳密度的准确性,选择以广西区内、与广西相邻的研究区碳密度数据作为参考。该研究主要参考了陈曦^[25-28]等研究成果并修正得到红水河流域各土地类型对应的地上部分碳密度、地下部分碳密度、土壤碳密度和死亡有机碳密度(表 1)。

2.2 PLUS 模型

本研究使用 PLUS 模型模拟预测红水河流域 2030 年不同情景下的土地利用类型。PLUS 模型是

表 1 红水河流域各土地利用类型碳密度/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 1 Carbon density of land use types in Hongshui

River Basin				
土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
耕地	13.50	2.70	35.00	1.00
草地	3.01	13.53	10.00	1.00
林地	105.90	67.50	59.40	3.50
湿地	37.00	11.80	56.71	3.00
建设用地	1.20	0.93	12.48	0
水域	1.02	0	0	0

由中国地质大学(武汉)地理及信息工程学院和国家 GIS 工程技术研究中心的高性能空间计算智能实验室(HPSCIL)所开发^[29]。该模型是基于栅格数据的元胞自动机(CA)模型,可用于模拟斑块尺度的土地利用/土地覆盖(LULC)变化^[23]。PLUS 模型整合了基于土地扩张分析策略(LEAS)的挖掘方法和基于多类型随机种子(CARS)机制的 CA 模型^[27]。相比其他模型,PLUS 模型能够确定土地扩张和景观动态的驱动因素。

PLUS 模型结合马尔可夫链(Markov-chain)模型方法预测未来土地利用各类型的像元值(DN 值)总量参数。马尔可夫链方法通过改变转移矩阵随时间分析潜在土地利用的可能性来衡量各种条件下的土地利用需求^[30]。概率转移矩阵的计算公式如下:

$$S_{t+1} + P_{ij} = S_i \quad (2)$$

式中： S_i 表示 t 时刻土地利用的状态； S_{t+1} 表示 $t+1$ 时刻土地利用的状态； P_{ij} 表示土地利用类型 i 转变为土地利用类型 j 的概率，计算方法如下：

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中，邻域权重参数表示各类土地类型在外界驱动因子下使其自身土地类型的扩张能力，参数的取值范围在 0~1，参数值越接近 1，则代表该土地利用类型的扩张能力越强。该研究的土地利用类型的邻域权重参数参考了前人的实验结果^[23-24,27]并对模型参数进行多次调试，最终确定耕地、草地、林地、湿地、

建设用地和水域的邻域权重参数分别设置为 0.2、0.3、0.02、0.4、1 和 0.4。成本矩阵是指是否容许各土地类型之间的相互转换。通过分析 1990—2020 年红水河流域土地利用转移矩阵，除湿地和建设用地外其它土地类型是都可能相互转换。该研究根据三种不同情景设计了三种不同土地利用转移成本矩阵(表 2)。自然发展情景下，限制建设用地土地类型和其它土地类型的相互转换；城镇优先情景下，提高耕地、林地和草地向建设用地转变概率并限制建设用地向其它用地的转换；生态保护情景下，对林地土地类型限制向其它土地类型的转换，同时以林地和生态保护区设置为限制变化区域。

表 2 PLUS 模型转移成本矩阵

Table 2 PLUS model transfer cost matrix

	自然发展情景						城镇优先情景						生态保护情景						
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	
土地利 用类型	A	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0
	C	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
	D	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1
	E	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	F	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

注:A-耕地 B-草地 C-林地 D-湿地 E-建设用地 F-水域

2.3 地理探测器

基于地理探测器模型是用于地理空间分异性的探测，揭示引起空间异质性驱动力的统计方法^[31]。基于地理探测器模型中的因子探测和交互作用探测，探讨影响红水河流域碳储量的驱动力因素。

(1)因子探测：因子探测可以对因变量的空间异质性进行探测，并对不同因子对因变量空间变异性的解释能力进行揭示，使用 q 值表示，其表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中： q 表示因子 X 对自变量的解释强度， q 的范围为 [0-1]， q 值越大则说明解释能力越强； N_h 与 N 分别表示因子在类别 h 乃至全局的样本数； σ_h^2 和 σ^2 分别表示因子在类别 h 或全局的方差。

(2)交互作用探测：交互作用探测用于评估两个因子在共同作用下对因变量的解释能力是否加强或

减弱，或者用于判断不同因子对因变量的影响是否独立于其他因子。判断标准如表 3：

表 3 两个因子对因变量的交互作用

Table 3 Interaction of two factors on dependent variables

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}(q1, q2)$	非线性减弱
$\text{Min}(q1, q2) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q1, q2)$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q1, q2)$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q1 + q2$	独立
$q(X1 \cap X2) > q1 + q2$	非线性增强

*表中 $\text{Min}(q1, q2)$ 表示取 $q1, q2$ 中的最小值， $\text{Max}(q1, q2)$ 表示取 $q1, q2$ 中的最大值， $q1 + q2$ 表示取 $q1, q2$ 的和。

3 结果

3.1 1990—2020 年碳储量时空演变

由红水河流域碳储量分布图 2 所示，流域 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年总碳储量分别为 848.38×

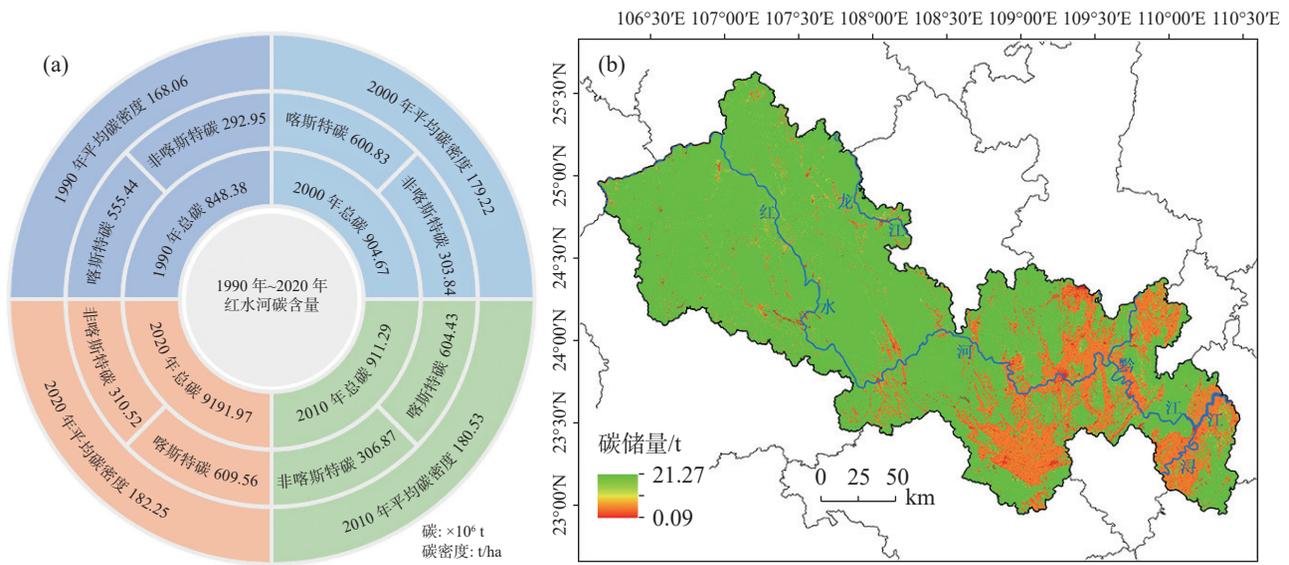


图2 1990-2020年碳储量含量及空间变化
Fig. 2 Carbon storage content from 1990 to 2020

10^6 t、 904.67×10^6 t、 911.29×10^6 t、 919.97×10^6 t, 红水河流域碳储量增加了 71.59×10^6 t。单位土地面积平均碳密度分别为 $168.06 t \cdot hm^{-2}$ 、 $179.22 t \cdot hm^{-2}$ 、 $180.53 t \cdot hm^{-2}$ 、 $182.25 t \cdot hm^{-2}$ 。在 1990-2020 年期间呈现逐渐递增趋势, 岩溶地区的固碳能力占比处于主导地位, 总体的碳源汇效应为汇大于源, 岩溶地区碳储量增加 54.02×10^6 t, 岩溶地区平均碳储占总体的 66%, 单位土地面积平均碳密度增加 $14.19 t \cdot hm^{-2}$, 增长率为 8.44%。其中在 1990—2000 年期间增幅较为显著, 增加 56.29×10^6 t, 单位土地面积平均密度增加 $11.16 t \cdot hm^{-2}$, 增幅为 6.63%。

3.2 土地利用变化对碳储量的影响

红水河流域的土地利用面积占比从大到小分别为林地、耕地、建设用地、水域、草地和湿地(表4), 流域的主要优势地类是林地和耕地, 其中林地主要

分布在西北部, 耕地主要集中在东南区域, 四个时期的占比分别为 98.454%、97.672%、97.008%、96.542%。

根据 1990—2020 年的土地利用转移矩阵(表5), 土地类型变化中林地的变化最为显著, 至 2020 年, 林地面积增加了 $4096.621 km^2$ 。其次, 在此期间建设用地面积增加了 $706.449 km^2$, 主要是由耕地向建设用地的转变所致。在这段时期内, 耕地和其他土地类型向林地的转变率最高, 导致了固碳能力较强的林地面积增加, 使得流域的碳储量增长最为迅速。同时, 耕地面积减少了 $5062.098 km^2$ 。因此, 可以说明流域西北部的高密度林地覆盖使得该地区具有较强的固碳能力, 进而导致了较高的碳储存能力。而耕地和建设用地主要集中在流域的东南部, 其中耕地属于固碳能力较弱的土地类型, 使得研究区的东南部地区的固碳能力较低。

表4 1990、2000、2010 和 2020 年各土地类型面积及占比
Table 4 Area and proportion of each land type in 1990, 2000, 2010 and 2020

土地类型	1990年		2000年		2010年		2020年	
	面积/ km^2	占比/%						
耕地	17751.434	35.165	14210.221	28.150	13505.526	26.754	12689.366	25.138
草地	12.246	0.024	54.542	0.108	56.851	0.113	61.225	0.121
林地	31947.882	63.289	35094.401	69.522	35514.595	70.354	36044.503	71.404
湿地	0.149	0.000	1.923	0.004	2.094	0.004	2.374	0.005
建设用地	500.090	0.991	684.471	1.356	930.969	1.844	1206.539	2.390
水域	267.944	0.531	434.187	0.860	469.709	0.930	475.737	0.942

表 5 1990 年~2020 年土地利用转移矩阵
Table 5 Land use transfer matrix from 1990 to 2020

		2020年土地利用面积/km ²						总面积
		耕地	草地	林地	湿地	建设用地	水域	
1990年土地利 用面积/km ²	耕地	10896.853	13.354	6032.528	1.598	624.868	182.234	10896.853
	草地	0.439	9.961	1.803	0.002	0.030	0.012	0.439
	林地	1772.772	37.847	30002.547	0.074	80.328	54.315	1772.772
	湿地	0	0	0	0.149	0	0	0
	建设用地	0	0	0	0	500.090	0	0
	水域	19.301	0.063	7.626	0.553	1.224	239.177	19.301
	总面积	10896.853	13.354	6032.528	1.598	624.868	182.234	10896.853

3.3 未来不同情景下碳储量时空分布预测

3.3.1 未来土地利用模拟及预测

采用 PLUS 模型并有效地结合马尔科夫链模型方法,对未来各土地利用类型的像元值总数进行预测,模拟结果可以避免仅使用单一模型进行模拟所带来的不确定性^[32]。基于红水河流域 2000 年和 2010 年土地利用数据,利用 PLUS 模型模拟得到 2020 年的土地利用,使用 Kappa 系数评估模拟的 2020 年土地利用数据与实际的 2020 年土地利用数据做精度验算,结果显示 Kappa 系数为 0.912,证明 PLUS 模型的模拟结果具有可靠性,可用于模拟未来 2030 年红水河流域不同情景下的土地利用变化。利用 PLUS 模型模拟不同情景下土地利用变化结果如下图 3。

根据表 6 可知,在自然发展情景下延续 1990—2020 年的土地利用变化趋势。在该情景下,林地和建设用地的面积均有增加,分别增加了 472.174 km² 和 262.158 km²。从土地利用面积转移方向来看(图 4(a)),耕地面积大幅减少,主要转向林地和建设用地,减少的面积为 733.218 km²。在城镇优先情景下,由于对社会经济建设的优先发展,建设用地面积迅速扩张。这导致城市周边的耕地和林地大量转变为建设用地。从图 4(b)可以发现,主要是耕地和林地向建设用地转变。在该情景下,建设用地面积增加了 314.584 km²,而林地面积减少了 215.033 km²。在生态保护情景下,采取了退耕还林、草地造林等生态环境保护措施,并限制和适度控制了林地、草地和耕地向建设用地的转变。在该情景下,林地面积增加了 620.998 km²,从图 4(c)可以发现主要是耕地向林地转变。与其他情景相比,建设用地的扩张趋势

得到了限制,建设用地面积增加了 183.519 km²。在自然发展情景和生态保护情景下,水域的面积略有增加,草地和湿地的面积呈现小幅减少的趋势。

3.3.2 不同情景下的碳储量时空演变分析

根据 2030 年红水河流域不同情景下的碳储量时空分布特征及变化图 5 可知,流域碳储量呈现出由东南部向西北部逐渐升高的趋势。在 2020—2030 年的自然发展情景和生态保护情景下,红水河流域的碳储量总体呈增长趋势,表明未来自然发展情景和生态保护情景的碳汇能力强于碳源。其中,自然发展情景延续了 1990—2020 年流域内碳储量的变化趋势,岩溶平原和峰丛洼地碳储量变化减少,但峰丛林地的碳储量变化增加以及在流域的西北部地区的林地面积相较于 2020 年有所增加,使得该区域的碳储量增加。在生态保护情景下,从 2030 年的生态保护变化图可知,由于对生态环境进行优先保护发展,岩溶流域的峰丛林地和岩溶平原以及西北部地区的林地面积增加,使得流域整体固碳能力增强,在此情景下,流域的碳储量增加了 10.74×10^6 t,碳储存能力达到最高峰。与自然发展情景相比,生态保护情景下整体碳储量空间分布增加的区域具有优势。在城市优先情景下,从 2030 年的城镇优先变化分布图可以看出,流域整体碳储量变化为减少趋势,碳储量减少的分布主要集中在峰丛洼地、峰丛林地和岩溶平原地区。随着城市社会经济的发展需要扩张建设用地面积,城市开发导致岩溶地区固碳能力较强的林地减少,使得岩溶地区的生态系统平衡遭受失衡,进一步影响流域的固碳能力,使得流域的碳源汇效应由碳汇逐渐转变为碳源,导致在此情景下该地区的碳储量减少了 5.14×10^6 t。

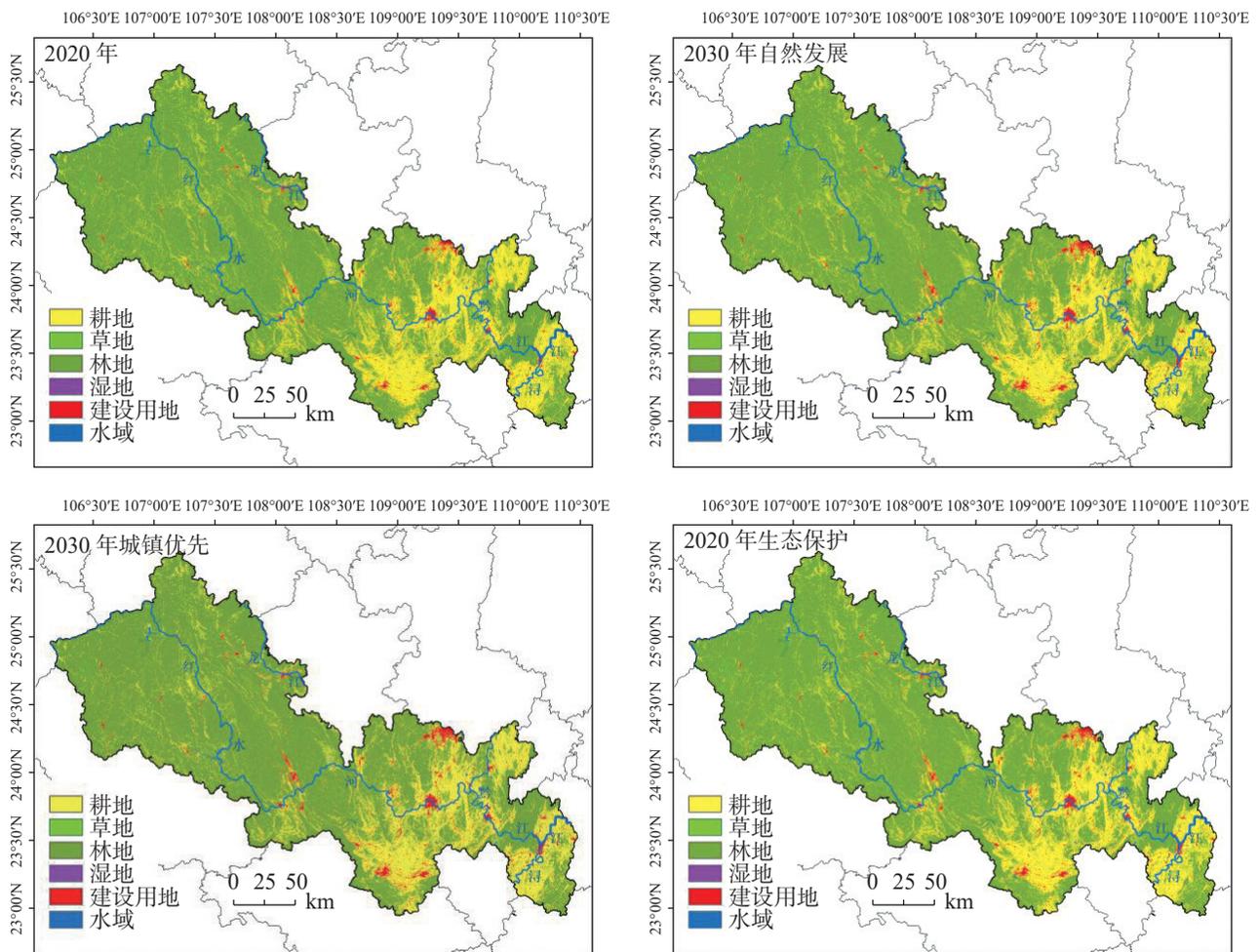


图3 2020-2030年不同情景下土地利用时空变化

Fig. 3 Spatio-temporal changes in land use under different scenarios from 2020 to 2030

表6 未来各情景土地利用面积

Table 6 Future land use area under different scenarios

	2020年	2030年自然 发展情景	2030年城镇 优先情景	2030年生态 保护情景
耕地	12689.366	11956.148	12591.183	11887.438
草地	61.225	55.096	59.988	53.656
林地	36044.503	36516.677	35829.470	36665.501
湿地	2.374	2.093	2.238	2.348
建设用地	1206.539	1468.697	1521.123	1390.058
水域	475.737	481.033	475.743	480.744

4 讨论

4.1 岩溶地区碳储量驱动力分析

基于地理探测器模型的因子探测和交互作用探测,选取 DEM(X1)、GDP(X2)、人口密度(X3)、坡向(X4)、坡度(X5)、土地利用(X6)、年均降雨(X7)、年均 NDVI(X8)、年均气温(X9)、土壤类型(X10)因

子对红水河流域碳储量空间分异性驱动力进行分析。驱动因子使用自然间断法进行重分类为6类作为最优选择。因子探测结果由图6可知,各驱动因素对红水河流域碳储量影响程度的解释力由大到小排序为: X6(土地利用)>X8(年均 NDVI)>X1(DEM)>X3(人口密度)>X5(坡度)>X2(GDP)>X10(土壤类型)>X7(年均降雨)>X4(坡向)>X9(年均气温),各因子对红水河流域碳储量的显著性检验指数均小于0.05(p 值均小于0.05),则单因子探测结果解释力(q 值)有效。其中, X6(土地利用)对碳储量空间异质性的解释力最强,即 q 值为 0.833;其次为自然因子 X8(年均 NDVI)对碳储量空间异质具有较强的解释力, q 值为 0.545。交互作用探测结果显示,各驱动因子对红水河流域碳储量的交互作用 q 值均大于单因子作用时的 q 值,即各驱动因子相互作用的关系表现为双因子增强或非线性增强。其中 X6(土地利用)与 X8(年均 NDVI)的交互作用影响红水河流域碳储量

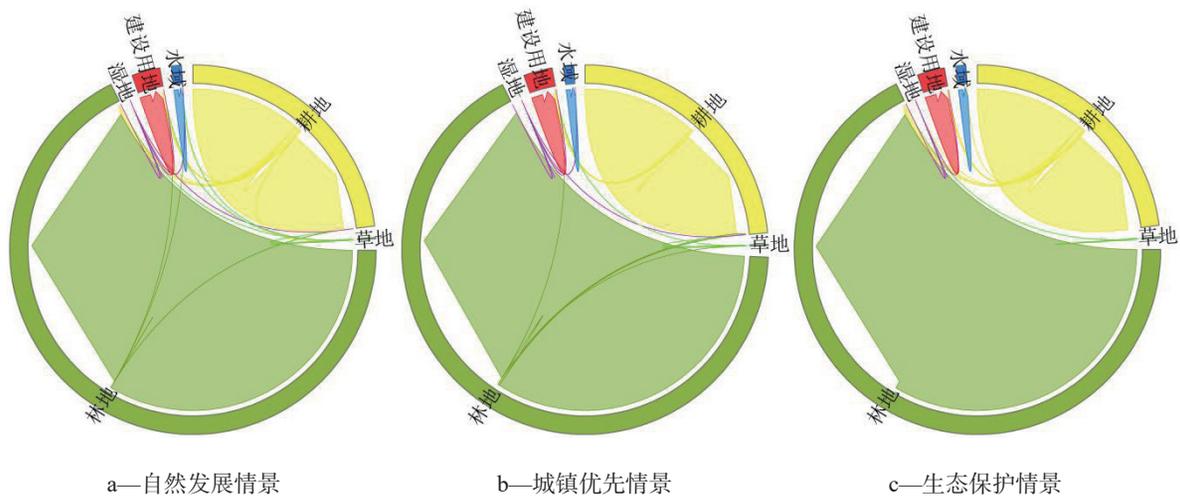


图 4 2020-2030 年三种情景土地利用类型转移图

Fig. 4 Land use type transition under three scenarios from 2020 to 2030

变化的最为显著,解释力为 0.848。从交互作用探测结果来看,土地利用和年均 NDVI 与年均气温、年均降雨、DEM 和人口密度等其它因子在特定的组合相互交互作用下会影响增强对碳储量的空间分布。因此,土地类型是决定红水河流域生态系统碳储量升高主要因素,同时人类活动的土地开发利用对碳储量的分布有重大的影响,且高植被覆盖程度(如林地、草地)也会极大的增强红水河流域固碳能力。长期以来,岩溶碳循环被认为是不受人类活动干扰并保持平衡状态的自然气候调节过程,但土地利用和覆被变化改变了岩溶碳循环的原有平衡,其干扰效应也应当考虑到土地利用调控岩溶作用碳源/汇中^[33]。土地利用作为人类活动的集中和直接体现,主要表现在土壤 CO₂ 的主要来源是植被根系呼吸和微生物对土壤有机碳的分解,同时土地利用变化必然影响土壤的有机碳含量、组分和稳定性,从而影响土壤 CO₂ 的释放,进而调控岩溶作用的方向和碳汇的强度^[34]。土地利用分布主要影响了红水河流域的碳储量分布的空间异质性,高碳储量区域主要聚集在山区的密林地带,而低碳储量区域则主要分布在城市发展区域。这表明碳储量的空间分布与土地利用类型密切相关,与刘晓娟^[35]等的研究结论一致。

4.2 未来不同发展情景碳储量变化

不同情景下的土地利用变化对红水河流域的固碳能力产生显著影响。研究表明,自然发展情景和生态保护情景下的碳储能力增加主要是由于岩溶地区林地面积的增加所致,而城镇优先情景下的

碳储能力下降主要是由于碳储能力较弱的建设用地扩张,导致红水河流域由碳汇逐渐转变为碳源,使得区内碳储存能力减弱。随着岩溶地区碳酸盐岩的溶蚀及植物的光合作用对溶蚀 CO₂ 消耗的增加从而导致碳汇的增加^[10]。林地等植被具有蓄水及滞迟岩溶地区地下水流动的作用,使得流域的枯水径流量增加,从而增加岩溶碳汇量^[36]。在生态保护情景下,林地的碳汇能力最大,部分原因在于造林区森林面积扩大,生态工程将以植树造林为形式的部分裸露地面和农田转为林地,加强了红水河流域地区现有森林的保护强度。特别是岩溶地区,通过有效的人为管理和保护,改善了岩溶地区的生态条件和森林覆盖率,从而增强了岩溶地区的碳汇能力。林地面积的森林密度大幅增加,这可能是由于存在许多具有年轻和中龄树木的森林,这些树木仍然具有较高的碳汇潜力^[32, 37]。因此,继续保护持久性森林可能会继续增加该区域岩溶碳储量。因此,生态项目和植树造林的成功实施不仅有利于当地生计,而且增加了碳储量并缓解了气候变化。生态修复项目,是推动红水河流域岩溶地区的植被生长和碳汇增加的主要因素,从而促进了中国西南岩溶地区碳储量的增加^[30]。

由此可见,根据未来不同情景下的碳储量时空变化结果,生态保护情景对红水河流域岩溶地区的生态系统碳汇稳定具有更积极的影响,而林地是未来红水河流域岩溶地区生态系统碳储存可持续发展的关键。因此,通过提高限制岩溶地区草地退化和建设用地扩张是提高生态系统碳储量的有效途径。然而,虽然 InVEST 模型能处理多种类型和尺度的数

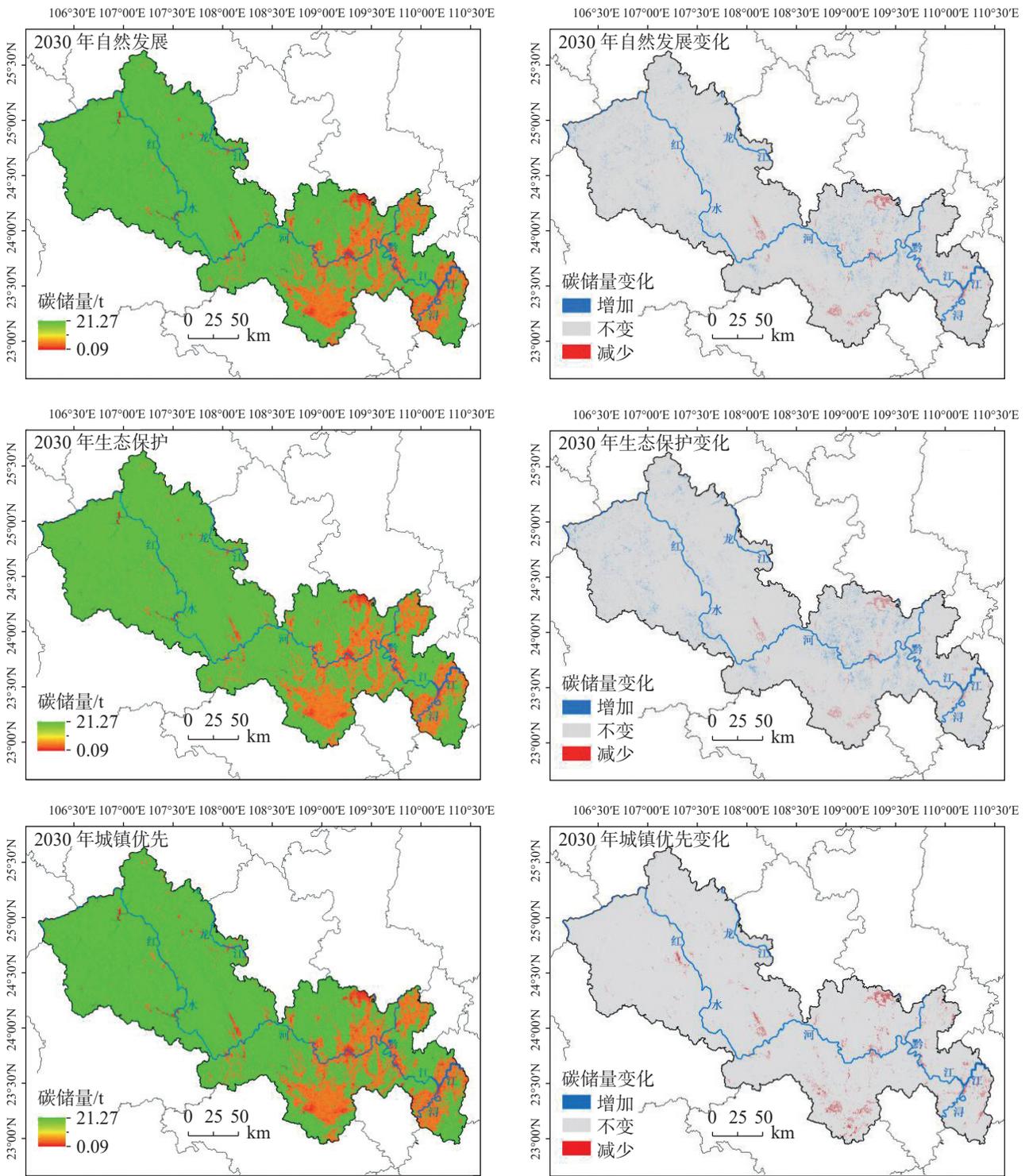


图5 不同情景下2030年碳储量空间分布及变化图

Fig. 5 Spatial distribution and variation of carbon storage in 2030 under different scenarios

据,但数据质量和分辨率可能会影响模拟结果的准确性和可靠性^[38-39]。因此,在后续的研究中,需要进一步优化研究方案,同时考虑岩溶地区林地等植被在时间尺度上的变化对碳储量的影响,并评估模型及其参数的适宜性,以更好地维护流域生态系统的碳平衡。

5 结论

以红水河流域为研究区,基于 InVEST 模型评估 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年区域内岩溶地区生态系统碳储量的变化情况,同时采用 PLUS 模

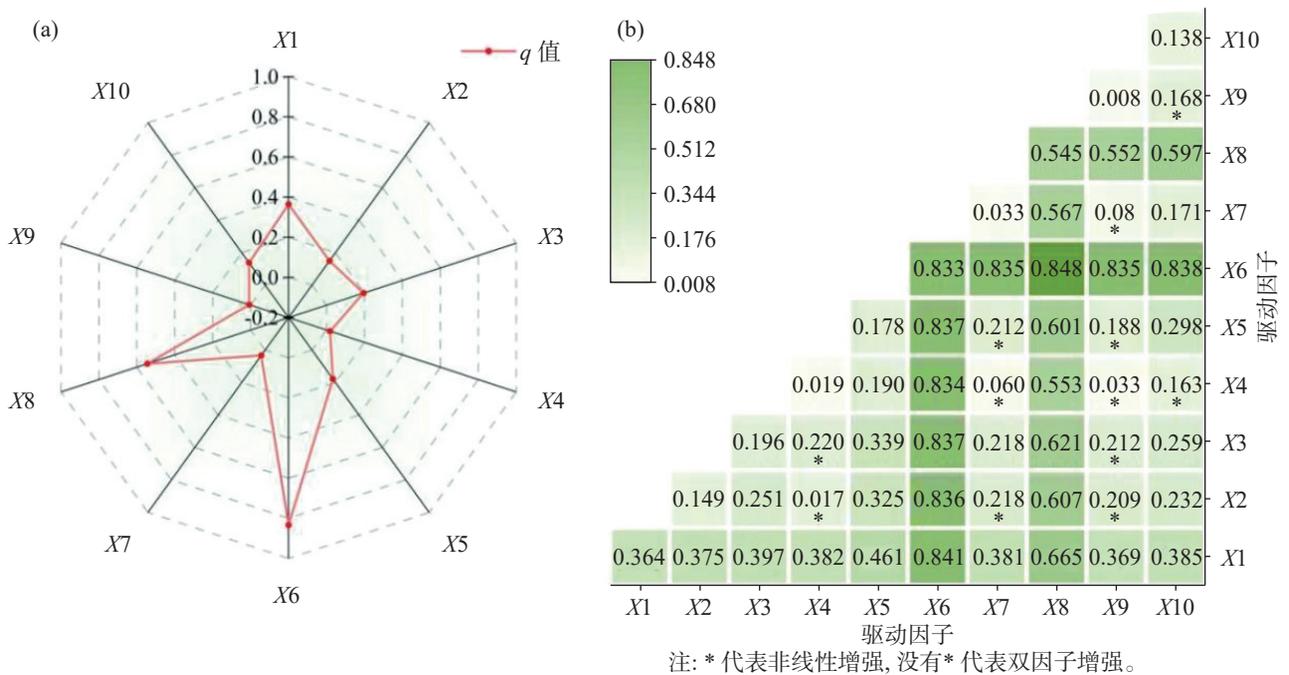


图 6 因子探测和交互作用结果图

Fig. 6 Results of factor detection and interaction

型模拟自然发展、城镇优先和生态保护这 3 个未来情景下的研究区碳储量变化趋势，并利用地理探测器探究土地利用、降水、气温、人口密度等因子影响研究区岩溶地区碳储量空间分异性的主要驱动因素。结论如下：

(1) 1990—2020 年红水河流域碳储量空间分布特征呈现由东南向西北逐渐升高趋势，30 年间流域碳储量整体呈现逐渐递增趋势，共增加了 71.59×10^6 t，在 1990—2000 年流域碳储量递增最为明显，表明红水河流域 30 年内的碳汇能力强于碳源。

(2) 未来 2030 年自然发展情景、城镇发展情景和生态保护情景下红水河流域碳储量分别为 927.67×10^6 t、 914.84×10^6 t 和 930.71×10^6 t。与 2020 年相比，在自然发展情景和生态保护情景下，2030 年红水河流域碳储量将分别增加 7.69×10^6 t、 10.74×10^6 t。在未来 2030 年城镇发展情景下，红水河流域碳储量将减少 5.14×10^6 t。城镇发展导致岩溶地区固碳能力较强的林地减少，使得流域生态系统固碳能力失衡。

(3) 根据地理探测器单因子探测结果表明，土地利用是影响红水河流域碳储量空间分异性的主要驱动因子，q 值为 0.833；交互探测结果显示土地利用与年均 NDVI 因子交互作用影响红水河流域碳储量变化最为显著，交互作用解释力为 0.833，土地利用变

化因子是使得红水河流域碳储量升高的主要原因，其次为年均 NDVI 因子。

参考文献

[1] ZHU Guofeng, QIU Dongdong, ZHANG Zhuaxia, SANG Liyuan, LIU Yuwei, WANG Lei, ZHAO Kailiang, MA Huiying, XU Yuanxiao, WAN Qiaozhuo. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107770.

[2] LI L, SONG Y, WEI X H, DONG J. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: A case study of Wuhan, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106064.

[3] 王深, 吕连宏, 张保留, 王斯一, 吴静, 付加锋, 罗宏. 基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(9): 2044-2055.

WANG Shen, LV Lianhong, ZHANG Baoliu, WANG Siyi, WU Jing, FU Jiafeng, LUO Hong. Multi Objective Programming Model of Low-Cost Path for China's Peaking Carbon Dioxide Emissions and Carbon Neutrality[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(9): 2044-2055.

[4] 于爽, 蒲俊兵, 刘凡, 杨慧. 岩溶碳汇效应对植被的响应研究进展[J]. *地学前缘*, 2023, 30(4): 418-428.

YU Shi, PU Junbing, LIU Fan, YANG Hui. Effect of vegetation on carbon sequestration in karst systems: a critical review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 418-428.

[5] ZENG S B, LIU Z H, Goldscheider N, Frank S, Goeppert N, Kaufmann G, Zeng C, Zeng Q, Sun H. Comparisons on the

- effects of temperature, runoff, and land-cover on carbonate weathering in different karst catchments: insights into the future global carbon cycle[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(1): 331-345.
- [6] 闫伟, 曾成, 肖时珍, 蓝家程, 代林玉, 邵治钦, 何江湖, 何春, 狄永宁. 湿润亚热带典型白云岩流域不同土地利用下的试片溶蚀速率及岩溶碳汇[J]. *地球与环境*, 2021, 49(5): 529-538.
YAN Wei, ZENG Cheng, XIAO Shizhen, LAN Jiacheng, DAI Linyu, TAI Zhiqin, HE Jianghu, HE Chun, DI Yongning. Dissolution Rate and Karst Carbon Sink of Different Land Use in Typical Dolomite Watershed with Humid Subtropical Weather[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(5): 529-538.
- [7] 孙平安, 肖琼, 郭永丽, 苗迎, 王奇岗, 章程. 混合岩溶流域碳酸盐岩溶蚀速率与岩溶碳汇: 以漓江流域上游为例[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(5): 825-834.
SUN Pingan, XIAO Qiong, GUO Yongli, MIAO Ying, WANG Qigang, ZHANG Cheng. Carbonate dissolution rate and karst carbon sink in mixed carbonate and silicate terrain: Take the upper reaches of the Lijiang river basin as an example[J]. *Carso-logica Sinica*, 2021, 40(5): 825-834.
- [8] 李瑞, 肖琼, 张陶, 李建鸿, 李丽. 人类活动影响下岩溶地下水-岩作用强度时空差异分析[J]. *地球化学*, 2017, 46(2): 191-204.
LI Rui, XIAO Qiong, ZHANG Tao, LI Jianhong, LI Li. Temporal and spatial variation patterns of water-rock interaction under the impact of human activity in karst underground water[J]. *Geochimica*, 2017, 46(2): 191-204.
- [9] 林云, 梁家乐, 武亚遵, 贾方建, 任华鑫. 许家沟泉域岩溶地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 特征及碳汇效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(1): 146-153.
LIN Yun, LIANG Jiale, WU Yazun, JIA Fangjian, REN Huaxin. Characteristics of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of karst groundwater and carbon sink effect in Xujiagou spring area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(1): 146-153.
- [10] 曹建华, 杨慧, 康志强. 区域碳酸盐岩溶蚀作用碳汇通量估算初探: 以珠江流域为例[J]. *科学通报*, 2011, 56(26): 2181-2187.
Cao Jianhua, Yang Hui, Kang Zhiqiang. Preliminary regional estimation of carbon sink flux by carbonate rock corrosion: A case study of the Pearl River Basin[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(26): 2181-2187.
- [11] LIU J, ZHONG J, CHEN S, XU S, LI S L. Hydrological and biogeochemical controls on temporal variations of dissolved carbon and solutes in a karst river, South China[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2021, 33.
- [12] HAN X K, YAN Z L, LANG YC, DING H, GUO Q J, LI S L. Enhanced sulfide oxidation by monsoon rainfall in a small typical karstic catchment of Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128682.
- [13] ZNG S B, JIANG Y J, LIU Z H. Assessment of climate impacts on the karst-related carbon sink in SW China using MPD and GIS[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 144: 171-181.
- [14] LI Yu, GENG Huacai. Spatiotemporal trends in ecosystem carbon stock evolution and quantitative attribution in a karst watershed in southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110429.
- [15] ZHANG J Y, BIAN Z H, DAI M H, WANG L C, ZENG C F, SU W C. Differences and influencing factors related to underground water carbon uptake by karsts in the Houzhai Basin, southwestern China[J]. *Solid Earth*, 2016, 7: 1259-1268.
- [16] FENG H Y, Squires Victor. The temporal and spatial scales of arable land loss and its impact in Guangxi, China[J]. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 2022, 9(1): 76-84.
- [17] CHEN R S, YE C, CAI Y L, XING X S. Integrated Restoration of Small Watershed in Karst Regions of Southwest China[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2012, 41: 907-912.
- [18] HUANG Q H, CAI Y L, XING X S. Rocky desertification, antidesertification, and sustainable development in the karst mountain region of Southwest China[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2008, 37(5): 390-392.
- [19] GUO F, JIANG G H, YUAN D X, POLK J S. Evolution of major environmental geological problems in karst areas of Southwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69: 2427-2435.
- [20] SUN H F, CHENG M, SU C X, LI H Y, ZHAO G D, SU M X, LI S C, ZHANG B, ZHANG L W, LI K. Characterization of shallow karst using electrical resistivity imaging in a limestone mining area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76: 767.
- [21] TANG Y M, CHEN L H, SHE S Y. Evaluation of instream ecological flow with consideration of ecological responses to hydrological variations in the downstream Hongshui River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108104.
- [22] HUANG Y, YI L, XIAO W H, HOU G B, ZHOU Y Y. Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation in the upper reaches of the Hongshui River Basin during 1959-2016[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2021, 12(6): 2378-2399.
- [23] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 陈如俊, 何万才. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 378-387.
LI Jun, YANG Dehong, WU Fengzhen, CHEN Rujun, HE Wancai. Dynamic Simulation of Land Use Changes and Assessment of Carbon Storage in Kunming City Based on PLUS and InVEST Models[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 378-387.
- [24] 李琛, 高彬斌, 吴映梅, 郑可君, 武燕. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(1): 84-94.
LI Sen, GAO Binpin, WU Yingmei, ZHENG Kejun, WU Yan. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model[J]. *Journal of Zhejiang A&F Uni-*

- versity, 2022, 39(1): 84-94.
- [25] 陈曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J]. 地理科学, 2014, 34(10): 1247-1253.
CHEN Xi. Estimation of Soil Organic Carbon Reserves in Guangxi and Comparison Study with Some Provinces in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(10): 1247-1253.
- [26] 赵胤程, 覃盟琳, 庞雅月, 王政强, 史倩倩. 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(03): 345-355.
ZHAO Yincheng, QIN Menglin, PANG Yayue, Wang Zhengqiang, Shi Qianqian. 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(03): 345-355.
- [27] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晟, 朱望远. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3343-3352.
DING Yue, WANG Liuzhu, GUI Fng, ZHAO Sheng, ZHU Wangyuan. Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3343-3352.
- [28] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 孙嵩松, 赵林峰, 梁迅, 曾莉. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响研究[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4473-4487.
REN Yinming, LIU Xiaoping, XU Xiacong, SUN Songsong, ZHAO Linfeng, LIANG Xun, ZENG Li. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4473-4487.
- [29] LIANG X, GUAN Q F, Clarke K C, LIU S S, WANG B Y, YAO Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation(PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [30] HU Z Y, WANG S J, BAI X Y, LUO G J, LI Q, WU L H, YANG Y J, TIAN S Q, LI C J, DENG Y H. Changes in ecosystem service values in karst areas of China[J]. Agriculture[J]. Ecosystems & Environment, 2020, 30, 107026.
- [31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [32] LI Y H, YAO S, JIANG Z Z, JIANG H Z, WANG H R, RAN Q C, GAO X Y, DING X Y, GE D D. Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage: An Integrated Framework Based on the MOP-PLUS-InVEST Model and an Applied Case Study in Hangzhou, East China[J]. Land, 2022, 11(12): 2213.
- [33] 曾思博, 蒋勇军. 土地利用对岩溶作用碳汇的影响研究综述[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 153-163.
ZENG Sibao, JIANG Yongjun. Impact of Land-Use and Land-Cover change on the carbon sink produced by karst processes: A review[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(2): 153-163.
- [34] 蓝芙宁, 王文娟, 吴华英, 蒋忠诚, 覃小群, 安树青. 不同土地利用方式下土壤 CO₂ 时空分布特征及其影响因素: 以湘西大龙洞地下河流域为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(4): 427-432.
LAN Funing, WANG Wenjuan, WU Huaying, JIANG Zhongcheng, QIN Xiaoqun, AN Shuqing. Temporal and spatial distributions of CO₂ in soil and their influencing factors under different LUCC: A case study of the Dalongdong underground river drainage area[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(4): 427-432.
- [35] 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[J]. 热带地理, 2019, 39(3): 397-409.
LIU Xiaojuan, LI Xia, LIANG Xu, Shi Hong, Ou Jinpei. Simulating the Change of Terrestrial Carbon Storage in China Based on the FLUS-InVEST Model[J]. Tropical Geography, 2019, 39(3): 397-409.
- [36] 孙婷, 邓飞艳, 焦树林. 土地利用空间差异对典型喀斯特泉域化学风化碳汇的影响[J]. 热带地理, 2017, 37(1): 19-24.
SUN Ting, DENG Feiyan, JIAO Shulin. Impact of Land-use Spatial Variability on the Atmospheric Carbon Sequestration of the Rock Weathering Process in Typical Karst Spring Catchments[J]. Tropical Geography, 2017, 37(1): 19-24.
- [37] LI C, Wu Y M, GAO B P, ZHENG K J, WU Y, LI C. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108328.
- [38] 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 Zhiqiang, MA Xiaoshuang, HU Hong. 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.
- [39] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 朱磊, 董通, 何盘星, 杨强军. 基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019.
SHI Mingjie, WU Hongqi, JIA Hongtao, ZHU Lei, DONG Tong, HE Panxing, YANG Qiangjun. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1010-1019.

Analysis and prediction of spatial and temporal variation of carbon storage in limestone area in recent 30 years: A case study of the Hongshui River Basin

YAN Hongbo^{1,2}, ZENG Jinzhao¹, LU Xianjian¹, ZHAO Fengyang¹

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guangxi Key Laboratory of Spatial of Information and Geomatics, Guilin, Guangxi 541004 China)

Abstract The vulnerable ecology of karst areas is characterized by limited environmental capacity, poor soil quality, insufficient water resources, low land carrying capacity, and high yet vulnerable biodiversity. These factors contribute to low ecosystem productivity and a diminished ability to withstand disturbances. Therefore, it is crucial to understand the causes of changes in ecosystem carbon storage to prevent and mitigate ecosystem degradation and to support sustainable development in karst areas. The Hongshui River Basin is located in the northwest and central regions of Guangxi, characterized by high terrain in the northwest and low terrain in the southeast. It is the main tributary of the Pearl River Basin and encompasses the largest contiguous karst area in Guangxi, covering an area of 50,479.745 km². Of this, the karst landform area spans 33,942.048 km², accounting for 67% of the total area. The Hongshui River Basin is a typical karst basin located in Southwest China. It features widely distributed karst landforms, significant altitude variations, and generally thin soil with low fertility and poor water retention capacity. As a result, the ecological environment in this regions is extremely fragile. The vulnerability of natural attributes such as carbon storage function and soil erosion in karst basins, combined with human activities, has led to severe ecological degradation in karst areas.

Based on the InVEST model, this study took the Hongshui River Basin as an example to evaluate changes in ecosystem carbon storage in the karst area for the years 1990, 2000, 2010 and 2020. At the same time, the PLUS model was employed to simulate the trend of carbon storage changes in the study area under three future scenarios: natural development, urban prioritization and ecological protection. A geographical detector was utilized to identify the main driving factors influencing land use, precipitation, temperature, population density, and other elements affecting the spatial heterogeneity of carbon storage in the karst region of the study area. The conclusions are as follows,

(1) From 1990 to 2020, the spatial distribution characteristics of carbon storage in the Hongshui River Basin showed a gradual increase from the southeast to the northwest. Over the past 30 years, the total carbon storage in the basin gradually increased by 71.59×10^6 t. The most significant increase in carbon storage occurred between 1990 and 2000, indicating that the carbon sink capacity of the Hongshui River Basin was stronger than its carbon source over this period. Overall, the carbon sink effect surpassed the carbon source effect in the basin.

(2) In the year 2030, the carbon storage in the Hongshui River Basin is projected to be 927.67×10^6 t, 914.84×10^6 t and 930.71×10^6 t under the scenarios of natural development, urban development and ecological protection, respectively. Compared with 2020, both the natural development scenario and ecological protection scenario for the Hongshui River Basin are expected to demonstrate a generally increasing trend in carbon storage. This indicates that the carbon sink capacity under these scenarios in the future will be stronger than that of the carbon source. In 2030, the carbon storage of the Hongshui River Basin will increase by 7.69×10^6 t and 10.74×10^6 t, respectively. Compared with the natural development scenario, the ecological protection scenario shows advantages in areas where the overall spatial distribution of carbon storage increases. Under the urban development scenario for the year 2030, the carbon storage in the Hongshui River Basin is projected to decrease by 5.14×10^6 t. As urban socio-economic development necessitates the expansion of urban construction land, urban development will lead to a reduction in forest land, which has a significant capacity for carbon sequestration in karst areas. This reduction will disrupt the ecological balance in

(下转第 123 页)

standardization of the carbonate dissolution rate using the rock tablet method, providing data support for conducting global analysis and comparative research, revealing the laws of karst development, and improving the accuracy of karst carbon sink estimation. This study also proposes that methods should be selected based on the characteristics of the study area and research purpose. At the same time, it is of great necessity to strengthen the correlations between various test methods.

Key words carbonate rock, rock tablets method, dissolution rate, karst, problem discussion

(编辑 张玲)

(上接第 112 页)

this regions, further diminishing the carbon sequestration capacity of the basin and gradually shifting its carbon source-sink effect from a carbon sink to a carbon source.(3) The single-factor detection results from the geographic detector indicate that land use is the main driving factor influencing the spatial heterogeneity of carbon storage in the Hongshui River Basin, with a q value of 0.833. Additionally, the average annual NDVI has been shown to explain the spatial heterogeneity of carbon storage, with a q value of 0.545. The interactive detection results show that the interaction between land use and the annual average NDVI factor have the most significant effect on the change in carbon storage within the Hongshui River Basin, with an explanatory power of 0.833. This indicates that the specific combination of the land use interactions, annual average NDVI and other factors—such as annual average temperature, annual average rainfall, digital elevation model, and population density—will influence the spatial distribution of carbon storage. The land use change factor is the main contributor to the increase of carbon storage in the Hongshui River Basin, followed by the annual average NDVI factor. The findings of this study may provide significant theoretical and data support for the sustainable development of carbon storage within ecosystem services in the Hongshui River Basin. Furthermore, they will assist in the formulation of more effective ecological protection and resource management policies aimed at enhancing the carbon sink capacity of the ecosystem and promoting environmental health and sustainable development.

Key words carbon storage, driving factors, inVEST model, karst area, Hongshui River Basin

(编辑 张玲)