

朱柏露, 邓艳, 谢运球, 等. 桂林典型岩溶峰丛洼地碳储量功能研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 785-794.

DOI: 10.11932/karst20230413

桂林典型岩溶峰丛洼地碳储量功能研究

朱柏露^{1,2,3}, 邓艳⁴, 谢运球^{1,3}, 柯静^{1,3}, 吴松^{1,3,5}, 黄静², 侯萌萌²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林, 541004; 2. 深圳市源清环境技术服务有限公司, 广东深圳 518071; 3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西平果 531406; 4. 广西师范大学环境与资源学院, 广西桂林 541004; 5. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西桂林 541006)

摘要:为了揭示不同发展模式下土地利用变化对碳储量的影响,以桂林市阳朔县兴坪镇西塘村的岩溶峰丛洼地为对象,采用InVEST模型对岩溶峰丛洼地的碳储量进行评估,并模拟2种情境(生态保护模式、经济发展模式)下植被类型对碳储量的影响。结果表明:研究区碳储量总量是16 641.68 t,碳密度是221.30 t·hm⁻²,经济总价值是1 997.00万元,单位面积价值是26.56万元·hm⁻²;人工林、自然林、经济林生态系统碳储量分别是339.38 t·hm⁻²、261.79 t·hm⁻²、150.34 t·hm⁻²,经济价值分别是40.72万元·hm⁻²、31.42万元·hm⁻²、18.04万元·hm⁻²,且土壤碳储量是生态系统中最大碳库;自然林和经济林中土壤是最大的碳汇,而人工林中土壤和地上植被的碳汇较大;生态保护模式下研究区碳储量经济价值是2 252.14万元,相比于现状增加了254.89万元;经济发展模式下研究区碳储量经济价值是1 595.30万元,相比于现状损失了401.95万元。该研究成果为桂林漓江风景名胜区核心景区和桂林喀斯特世界自然遗产地确定未来发展模式和石漠化治理提供参考。

关键词:碳储量; InVEST模型; 岩溶峰丛洼地; 情景模拟; 土地利用

中图分类号: Q948 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0785-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

全球气候变暖对生态系统、植物种群、乃至整个生物圈都产生巨大影响^[1-3],是人类社会可持续发展面临的长期、严峻的挑战^[4]。国际科学界认为目前所观测到的全球变暖现象,90%以上的可能性来自于温室气体排放^[5],而CO₂作为温室气体重要组成部分,因此,有效地控制CO₂排放对减缓气候变暖具有重要意义。

岩溶生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分^[6-7],在全球碳循环中发挥着重要的作用^[8-10]。石漠

化发生发展造成了生物碳库和土壤碳库流失量巨大,近年来已由碳“汇”区逐渐转为碳“源”区,成为我国的碳“欠账”区^[11]。为了保护生态环境,遏制石漠化,国内学者开展了一系列的石漠化研究,史晨璐^[12-17]等研究表明,植被恢复能增加岩溶区碳汇;张斯屿^[18-20]等利用InVEST模型的情景模拟功能,研究不同发展模式下岩溶区碳储量的变化。研究土地利用与土壤碳储量的响应关系较多^[21-23],而土地利用与生态系统碳储量响应关系研究较少。因此,本文采用InVEST模型评估碳储量服务功能,模拟不同发展模式的碳储量,进一步分析土地利用变化对碳储量功

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB19110004); 广西重点基金(2022GXNSFDA035067); 国家自然科学基金(41877206)

第一作者简介: 朱柏露(1995—), 硕士, 研究方向: 岩溶生态。E-mail: Zhubailu2019@163.com。

通信作者: 邓艳(1978—), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 岩溶环境学。E-mail: dydesk@163.com。

收稿日期: 2021-10-20

能的影响。研究结果为科学治理石漠化和相关部门管理与规划提供科学依据。

1 研究区概况和方法

1.1 研究区概况

研究区位于桂林市阳朔县兴坪镇西塘村青头厄附近(图 1),由 6 座峰丛和 1 个洼地组成的典型岩溶峰丛洼地地貌单元,最高海拔 732 m,最低海拔 354 m,面积 0.75 km²。研究区域属于亚热带季风气候,雨季集中在 5-9 月,年均降雨量 1 887.8 mm,年均气温 21.03 ℃。该区域地层属于泥盆系融县组下段,为浅海相碳酸盐沉积,以灰白色、浅灰色厚层灰岩为主。研究区是典型的峰丛洼地,山高坡陡,平地

少,当地居民为了维持生计,在山坡、垭口、坡麓、洼地种植桉树、砂糖桔、夏橙、沃柑等经济作物,品种比较单一,经济效益不佳,还造成水土流失、冠岩地下河景观遭到破坏、植被覆盖率降低、地下河污染、土地石漠化等生态环境问题。

1.2 土地类型分类

现有的土地利用类型在土地调查、土地规划、土地权属管理等方面起到了重要的作用,但存在重视现状、忽视土地利用生态功能、对具有重要生态价值的土地体现的不够充分等不足^[24]。申元村^[25]指出土地类型应更多地从土地自然属性角度进行分类,更能综合反映生态类型,为构建农林牧合理用地布局提供科学依据。本文将研究区分为山坡、坡麓、洼地 3 种微地貌类型;坡度以 35°为界限,分

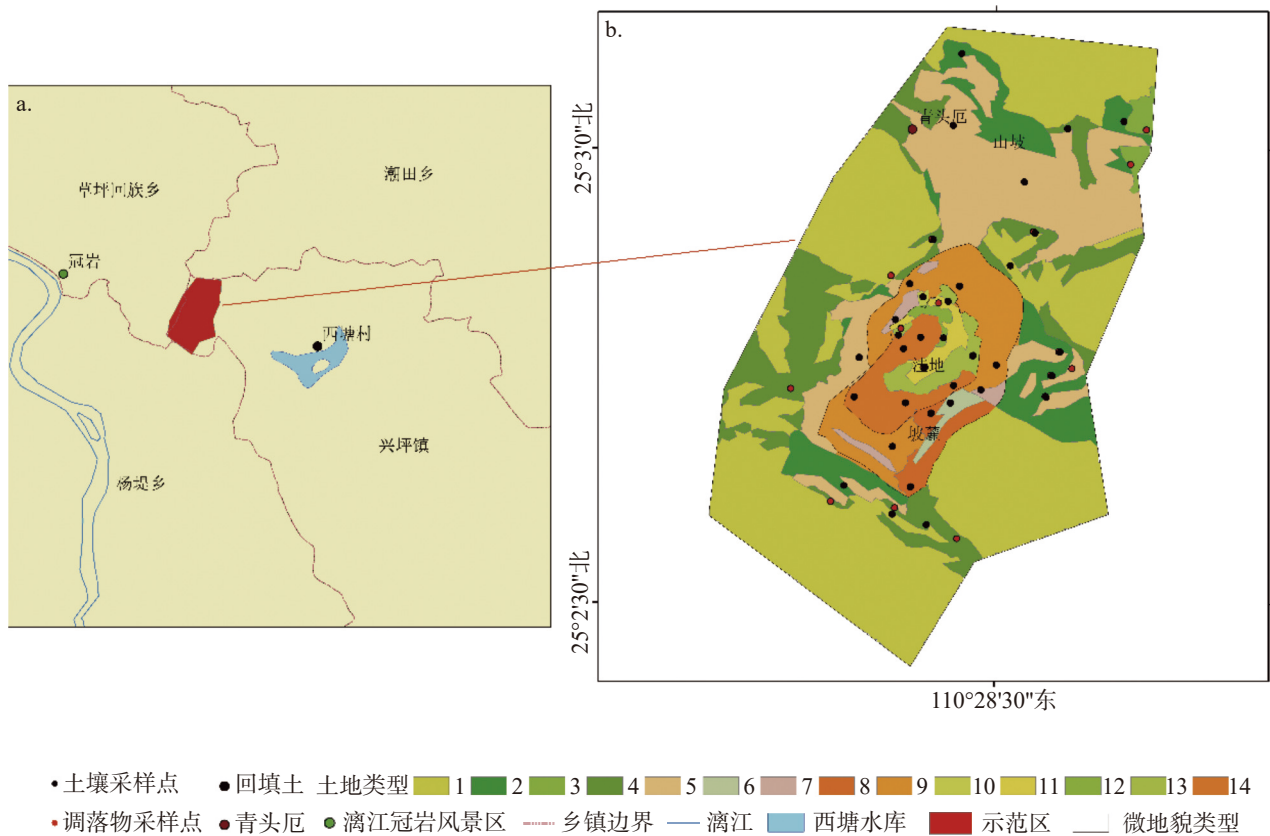


图 1 研究区概况图

- 1-自然林陡坡山坡 2-经济林陡坡山坡 3-人工林陡坡山坡 4-自然林缓坡山坡 5-经济林缓坡山坡 6-自然林陡坡坡麓 7-经济林陡坡坡麓 8-自然林缓坡坡麓
- 9-经济林缓坡坡麓 10-人工林缓坡坡麓 11-自然林陡坡洼地 12-经济林陡坡洼地 13-自然林缓坡洼地 14-经济林缓坡洼地

Fig. 1 Overview of the study area

- 1. steep slope of natural forest 2. steep slope of economic forest 3. steep slope of artificial forest 4. gentle slope of natural forest 5. gentle slope of economic forest 6. steep footslope of natural forest 7. steep footslope of economic forest 8. gentle footslope of natural forest 9. gentle footslope of economic forest
- 10. gentle footslope of artificial forest 11. steep slope depression of natural forest 12. steep slope depression of economic forest
- 13. gentle slope depression of natural forest 14. gentle slope depression of economic forest

为陡坡和缓坡; 植被类型分为自然林、人工林、经济林, 自然林以石山林为主, 人工林包括松树林、杉树林, 经济林包括砂糖桔、夏橙、沃柑、桉树林。参考陈瑶^[26-27]等的土地类型分类, 采用二级土地分级, 第一级以微地貌为主导标志进行划分, 第二级以坡度为主导标志并结合植被进行划分(表 1, 图 1)。

1.3 数据采集与处理

1.3.1 土壤数据

2020 年 7-8 月, 在研究区设置 35 个土壤剖面(图 1), 采集 70 个土壤样品, 每个土壤剖面挖掘深度为 60 cm, 分 2 层(0~30 cm, 30~60 cm)进行土壤样品采集与土壤容重测定, 土壤厚度不足 60 cm 时挖掘与采集至实际深度(基岩)。采集土壤后带回室内, 去除土样中可见的植物和动物残体, 自然风干后过筛, 采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳。

1.3.2 植被数据

在对研究区进行全面踏查的基础上, 选择具有代表性、立地条件基本一致的调查样地共 20 块。利用测树围尺测定样地内胸径 ≥ 5 cm 的树木胸径, 用

测高仪测定树高。基于调查数据, 利用回归方程计算植被碳储量^[28-29]。2020 年 11-12 月, 在每个样地内随机布置 2 个 1 m \times 1 m 样方, 果林除外。收集样品, 带回实验室烘干, 采用重铬酸钾外加热法测定凋落物有机碳。

1.3.3 计算方法

土壤碳密度计算公式为:

$$\text{SOC} = C \times D \times E \times \frac{(1-G)}{100} \quad (1)$$

式中: SOC 为某一土层的有机碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); C 为有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); D 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); E 为土层厚度(cm); G 为直径大于 2 mm 的砾石所占的体积百分比。

凋落物碳密度计算公式为:

$$\text{LOC} = \frac{c \times w \times 1000000}{S \times 10000} \quad (2)$$

式中: LOC 表示一个样方内凋落物单位面积的碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-1}$); c 表示实验室测试凋落物有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); w 表示在样方内收集到的凋落物的干重(kg); S 表示土地类型内样方面积(m^2); 1000000 表示从克(g)到吨(t)的单位换算; 10000 表示从 m^2 到 hm 的单位换算。

表 1 土地类型分类

Table 1 Classification of land types

一级分类	二级分类		土地类型	面积/ hm^2
微地貌	坡度	植被		
山坡	陡坡	自然林	自然林陡坡山坡	34.14
		经济林	经济林陡坡山坡	6.02
	缓坡	自然林	自然林缓坡山坡	9.03
		经济林	经济林缓坡山坡	13.20
坡麓	陡坡	自然林	自然林陡坡坡麓	0.45
		经济林	经济林陡坡坡麓	0.64
一级分类	二级分类		土地类型	面积/ hm^2
微地貌	坡度	植被		
洼地	缓坡	自然林	自然林缓坡坡麓	1.13
		经济林	经济林缓坡坡麓	5.33
		人工林	人工林缓坡坡麓	0.06
	陡坡	自然林	自然林陡坡洼地	0.76
		经济林	经济林陡坡洼地	0.25
		自然林	自然林缓坡洼地	1.15
	缓坡	经济林	经济林缓坡洼地	2.38

1.3.4 数据处理

采用Excel2017、SPSS24、Origin2018、ArcGIS10.8软件对数据进行处理和作图。应用单因素方差分析法分析不同土地利用方式间各指标差异的显著性。

1.4 研究方法

1.4.1 碳储量评估

在InVEST模型中根据不同土地类型地上、地下、土壤、凋落物四种碳库的平均碳密度乘以各土地类型的面积来计算生态系统的碳储量,然后根据《森林生态服务功能评估规范(LY/T1721-2008)》计算碳储量价值,如下公式(3)、(4)。

$$C_{total}=C_{soil}+C_{above}+C_{below}+C_{dead} \quad (3)$$

$$U=C_{total} \times M \quad (4)$$

式中: C_{total} 是研究区的总碳储量($t \cdot hm^{-2}$); C_{soil} 土壤碳储量(t); C_{above} 是地上植被碳储量(t); C_{below} 是地下植被碳储量(t); C_{dead} 是凋落物碳储量(t); M 是市场碳价格, $1200 \text{元} \cdot t^{-1}$, 参考国家林业局发布的《森林生态服务功能评估规范(LY/T1721-2008)》; U 是研究区的碳储量功能的总经济价值(元)。

1.4.2 情景模拟

情景模拟是基于对将来可能方案的假设。情景

模拟可以帮助管理者预判研究对象未来变化趋势,避免错误地估计造成决策失误。应用情景模拟有效克服生态系统服务功能评估过程和评估方法自身的局限性,分析时空演变特征,实现高精度、可视化、动态的评估,对比分析不同情景的结果,选择最佳的发展方案,为管理者决策提供依据。

2 结果分析

2.1 生态系统碳储量及分配

表2中,研究区土壤、地上植被、地下植被、凋落物平均碳密度分别是 $184.24 t \cdot hm^{-2}$ 、 $29.94 t \cdot hm^{-2}$ 、 $7.05 t \cdot hm^{-2}$ 、 $0.06 t \cdot hm^{-2}$,占研究区生态系统平均碳密度的比例分别是 83.25%、13.53%、3.19%、0.03%,表明土壤碳储量是研究区生态系统最大的碳库。生态系统碳储量在不同层次的分配比例排序:自然林陡坡山坡、经济林陡坡山坡、人工林陡坡山坡、自然林缓坡山坡、经济林缓坡山坡、自然林陡坡坡麓、经济林陡坡坡麓、自然林缓坡坡麓、经济林缓坡坡麓、自然林陡坡洼地、经济林陡坡洼地、自然林缓坡洼地、经济林缓坡洼地等土地类型均是土壤>地上植被>地下植被>凋落物;人工林缓坡坡麓是地上植被>土壤>地下植被>凋落物。

表2 生态系统碳储量的空间分布 ($t \cdot hm^{-2}$)

Table 2 Spatial distribution of carbon storage in ecosystem ($t \cdot hm^{-2}$)

土地类型	土壤碳密度	地上植被碳密度	地下植被碳密度	凋落物碳密度
自然林陡坡山坡	225.84(89.18)	20.60(8.14)	6.72(2.65)	0.07(0.03)
经济林陡坡山坡	164.15(78.29)	41.51(19.80)	3.89(1.86)	0.11(0.05)
人工林陡坡山坡	184.19(53.42)	144.84(42.01)	15.66(4.54)	0.11(0.03)
自然林缓坡山坡	205.08(69.37)	73.51(24.87)	16.94(5.73)	0.08(0.03)
经济林缓坡山坡	116.83(88.77)	12.18(9.25)	2.55(1.94)	0.05(0.04)
自然林陡坡坡麓	174.10(65.79)	73.51(27.78)	16.94(6.40)	0.09(0.03)
经济林陡坡坡麓	117.72(88.31)	11.20(8.40)	4.39(3.29)	0(0)
自然林缓坡坡麓	181.45(66.70)	73.51(27.02)	16.94(6.23)	0.14(0.05)
经济林缓坡坡麓	110.90(88.35)	13.01(10.36)	1.62(1.29)	0(0)
人工林缓坡坡麓	123.49(44.13)	142.50(50.93)	13.82(4.94)	0(0)
自然林陡坡洼地	184.17(60.54)	98.30(32.31)	21.66(7.12)	0.09(0.03)
经济林陡坡洼地	91.40(91.34)	6.69(6.68)	1.98(1.98)	0(0)
自然林缓坡洼地	120.82(57.16)	73.51(34.78)	16.94(8.02)	0.08(0.04)
经济林缓坡洼地	160.58(94.69)	6.89(4.06)	2.11(1.24)	0(0)
平均	184.24(83.25)	29.94(13.53)	7.05(3.19)	0.06(0.03)

注: 括号内数据为该层碳储量占生态系统碳储量的百分比。

Note: The data in parentheses is the percentage of carbon storage of this layer to that of the ecosystem.

自然林中土壤、地上植被、地下植被、凋落物平均碳储量的分配比例是: 82.88%、13.46%、3.64%、0.03%; 经济林中土壤、地上植被、地下植被、凋落物平均碳储量的分配比例是: 86.12%、12.08%、1.77%、0.03%; 人工林中土壤、地上植被、地下植被、凋落物平均碳储量的分配比例是: 52.78%、42.62%、4.57%、0.03%。从经济林到自然林再到人工林, 土壤碳储量在生态系统碳储量的比例降低, 而地上植被增加。表明自然林和经济林中土壤均是最大的碳汇, 而人工林中土壤和地上植被的碳汇较大。

2.2 碳储量评估

从图2中可以看出, 低值区集中在北面山坡, 高值区主要分布在山坡的西侧、南侧。研究区的碳储量总量是 16 641.68 t, 碳密度是 $221.30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从碳储量总量来看, 各土地类型碳储量占研究区碳储量总量的百分比超过 10% 的土地类型有 3 种, 其中自然林陡坡山坡是最大贡献者, 为 8 646.33 t, 占碳储量总量的比例高达 51.96%; 其次是自然林缓坡山坡, 碳储量总量是 2 669.59 t, 占碳储量总量的比例是

16.04%; 经济林缓坡山坡碳储量为 1 737.39 t, 占碳储量总量的比例是 10.44%。从碳密度来看, 人工林陡坡山坡固碳能力最强, 为 $344.79 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 其次是自然林缓坡山坡, 为 $295.61 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; 最低是经济林陡坡洼地, 为 $100.06 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

为了更加直观地体现森林的碳汇作用和价值, 在分析研究区峰丛洼地碳储量质量的基础上, 对研究区的碳汇能力进行价值量化, 以货币的形式反映研究区碳汇的功能。从表3见, 研究区碳储量经济总价值是 1 997.00 万元, 单位面积价值是 $26.56 \text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。综合来看, 在岩溶峰丛洼地地区, 采取种植松树、杉树等人工林的植被恢复模式可以显著增加岩溶生态系统的碳储量, 提升岩溶生态系统的碳中和能力。

为了解不同植被类型的碳储量, 统计分析得到表4。人工林、自然林、经济林碳密度分别是 $339.38 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $261.79 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $150.34 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 经济林碳密度最低。自然林碳储量是 12 215.17 t, 占碳储量总量的比例是 73.40%, 表明该研究区自然林是主要的碳汇, 因此在石漠化治理中, 应加强对自然林的保护, 提高自然林林分质量。

2.3 碳储量情景模拟分析

通过 InVEST 模型情景模拟板块进行情景模拟, 分为 2 种情景, 分别是生态保护模式 and 经济发展模式(图3)。生态保护模式是以碳密度为导向, 将碳密度含量低的经济林转化为碳密度含量高的人工林、自然林, 提升生态系统碳储量功能。经济发展模式是以农户经济收入为导向, 通过将自然林转换为经济林, 扩大经济林面积增加产值, 增加经济收入。如表5, 二种模式模拟下, 碳储量分别是 2 252.14 万元· hm^{-2} 、1 595.30 万元· hm^{-2} 。现状、生态保护模式、经济发展模式碳储量比例为 1 : 1.13 : 0.80。

生态保护模式是以国家和地方政策为导向, 从生态资源可持续发展角度出发, 响应“绿水青山就是金山银山”的号召, 提高生态系统碳储量功能, 并且针对研究区实际情况, 将经济林缓坡山坡、经济林陡坡坡麓、经济林缓坡坡麓、经济林陡坡洼地、经济林缓坡洼地等低碳密度的土地类型转化成自然林缓坡山坡、自然林陡坡坡麓、人工林缓坡坡麓、自然林陡坡洼地、自然林缓坡洼地等高碳密度的土地类型。如图3所示, 该模式下, 自然林面积增加了 8.74 hm^2 ,

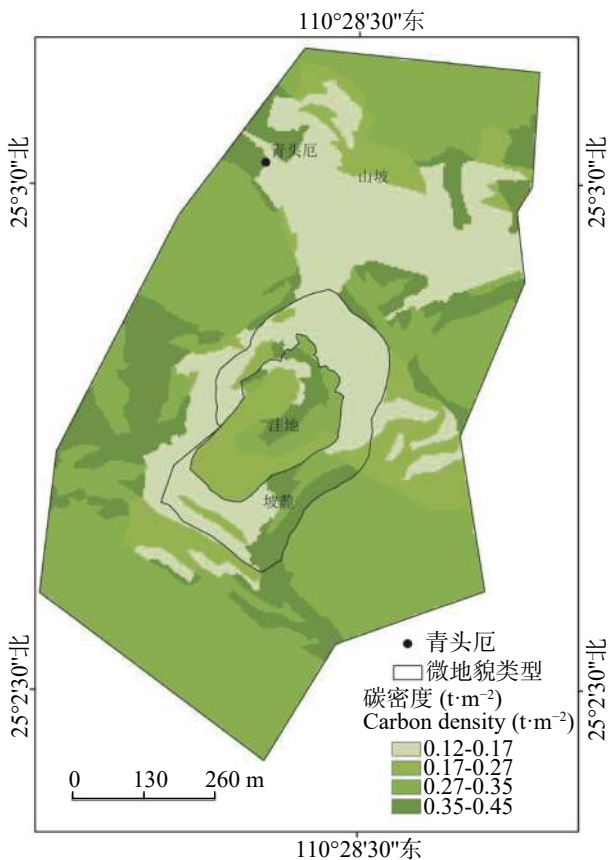


图2 碳密度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of carbon density

表 3 各土地类型的碳储量
Table 3 Carbon storage of each land type

土地类型	面积/hm ²	碳储量/t	占比/%	碳密度/t·hm ⁻²	经济价值/万元	单位面积价值量/万元·hm ⁻²
自然林陡坡山坡	34.14	8 646.33	51.96	253.22	1 037.56	30.39
经济林陡坡山坡	6.02	1 262.06	7.58	209.66	151.45	25.16
人工林陡坡山坡	0.66	225.85	1.36	344.79	27.10	41.37
自然林缓坡山坡	9.03	2 669.59	16.04	295.61	320.35	35.47
经济林缓坡山坡	13.20	1 737.39	10.44	131.61	208.49	15.79
自然林陡坡坡麓	0.45	117.84	0.71	264.63	14.14	31.76
经济林陡坡坡麓	0.64	85.35	0.51	133.31	10.24	16.00
自然林缓坡坡麓	1.13	307.91	1.85	272.03	36.95	32.64
经济林缓坡坡麓	5.33	669.17	4.02	125.52	80.30	15.06
人工林缓坡坡麓	0.06	16.71	0.10	279.81	2.01	33.58
自然林陡坡洼地	0.76	231.69	1.39	304.22	27.80	36.51
经济林陡坡洼地	0.25	24.97	0.15	100.06	3.00	12.01
自然林缓坡洼地	1.15	242.63	1.46	211.35	29.12	25.36
经济林缓坡洼地	2.38	404.19	2.43	169.58	48.50	20.35
总计	75.20	16 641.68	100.00	221.30	1 997.00	26.56

表 4 不同植被类型下碳储量
Table 4 Carbon storage under different vegetation types

植被类型	面积/hm ²	碳密度/t·hm ⁻²	碳储量/t	占比/%	碳储量价值/万元	单位面积价值量/万元·hm ⁻²
经济林	27.82	150.34	4 182.36	25.13	501.87	18.04
人工林	0.72	339.38	244.35	1.47	29.32	40.72
自然林	46.66	261.79	12 215.17	73.40	1 466.06	31.42
总计	75.20	221.30	16 641.68	100.00	1 997.00	26.56

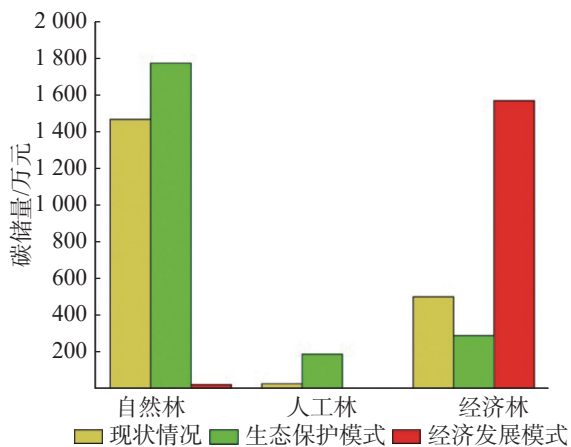


图 3 不同情景模拟的碳储量

Fig. 3 Carbon storage simulated by different scenarios

表 5 不同情景下的碳储量评估

Table 5 Carbon storage assessment under different scenarios

情景模拟	现状情况	生态保护模式	经济发展模式
碳储量/万元	1 997.25	2 252.14	1 595.30

碳储量经济价值较现状情况增加了 305.88 万元; 人工林面积增加 4.78 hm², 碳储量经济价值较现状情况增加 160.30 万元。

经济发展模式是指农户通过扩大经营规模增加产值, 根据研究区实际情况, 通过扩大经济林面积, 提高生产量, 增加经济收入, 将自然林陡坡山坡、自然林缓坡山坡、自然林陡坡坡麓、自然林缓坡坡麓、自然林陡坡洼地、自然林缓坡洼地、人工林陡坡山坡等人工林、自然林转化为经济林陡坡山坡、经济林缓坡山坡、经济林陡坡坡麓、经济林缓坡坡麓、经济林陡坡洼地、经济林缓坡洼地等经济林。在该模式下, 经济林面积增加了 45.99 hm², 碳储量经济价值较现状模式损失 401.68 万元。

3 讨论

张斯屿^[18] 研究指出, 对采用 2 种情景模拟进行对比发现, 强制保护情景的碳储量大于生态保护。

张靖宙等^[19]研究表明,采取3种情景模式比较发现,碳储量大小顺序是:石漠化治理情景>快速发展情景>规划发展情景。李义平^[20]研究指出,通过对两种不同情境下的固碳能力进行比较发现,生态保护情景所拥有的固碳潜力远远大于自然发展情景,这与本文的研究结果相似。通过情景模拟预测土地利用变化对碳储量的影响显示不同发展情景的碳储量。生态系统服务功能的提升,不仅仅局限于碳储量服务功能,因此还需要针对不同土地利用方式对生态系统服务功能影响做进一步研究。

人工造林和封山育林都是岩溶地区植被恢复最常用的方式^[30]。本文研究表明,不同植被类型碳储量是:人工林>自然林>经济林。卢立华等^[16]研究了广西天等县不同植被恢复模式对石漠化生态系统碳储量的影响,结果表明人工林碳储量显著高于相应同龄封育林的碳储量,与本文研究结果相似。在自然恢复模式中,植被需要经历一系列演替过程才能进入到乔木林演替阶段,要完成这一演替过程需要数十年甚至上百年^[31],而人工造林则能快速形成乔木林。本文对比不同植被类型的土壤碳储量,结果为自然林>人工林>经济林,自然林土壤碳储量较人工林高,可能是因为人为干扰少,生物多样性较人工林丰富^[15];自然林和人工林表层土壤碳积累机制不同,自然恢复更有利于土壤有机碳的固存^[32]。

本文研究的土壤碳储量(0~60 cm)在91.40~225.84 t·hm⁻²,与同一地貌类型的广西环江土壤(0~60 cm)碳储量相近^[33],明显高于贵州的土壤碳储量^[16-17],这可能与土壤厚度有关。Zhang等^[34]、张珍明等^[35]研究后寨河流域土壤有机碳影响因素指出,土壤厚度、岩石裸露率、石砾含量是影响后寨河流域土壤有机碳密度的主要因子,其中以土壤厚度影响最大。

人工林、自然林、经济林生态系统碳储量是339.38 t·hm⁻²、261.79 t·hm⁻²、150.34 t·hm⁻²,其中人工林和自然林高于我国森林生态系统的平均碳储量(258.83 t·hm⁻²)^[30]。研究表明,岩溶地区土壤有机碳普遍高于同一纬度的红壤^[36]。由于红壤和石灰土矿化特征存在差异,石灰土的有机碳含量更高^[37-38]。本文研究区生态系统碳储量由土壤、地上植被、地下植被、凋落物组成,其中土壤碳储量占生态系统碳储量的比例为83%,与同一区域的研究结果相似^[33,39]。

4 结 论

(1)研究区碳储量总量是16 641.68 t,碳密度是221.30 t·hm⁻²,经济总价值是1 997.00万元,单位面积价值是26.56万元·hm⁻²;

(2)人工林、自然林、经济林碳密度分别是339.38 t·hm⁻²、261.79 t·hm⁻²、150.34 t·hm⁻²,并且自然林是研究区主要的碳库;土壤碳密度是184.24 t·hm⁻²,远高于其他碳库,土壤碳储量是研究区生态系统大的碳库;自然林和经济林中土壤均是最大的碳汇,而人工林中土壤和地上植被的碳汇次之;

(3)情景模拟结果显示:生态保护模式碳储量是2 252.14万元、经济发展模式碳储量是1 595.30万元。

参考文献

- [1] Kasper J, Weigel R, Walentowski H, Gröning A, Petritan A M, Leuschner C. Climate warming-induced replacement of mesic beech by thermophilic oak forests will reduce the carbon storage potential in aboveground biomass and soil[J]. *Annals of Forest Science*, 2021, 78-89.
- [2] Pielke R, Wigley T, Green C. Dangerous assumptions[J]. *Nature*, 2008, 452(7187): 531-532.
- [3] Wang B, Waters C, Anwar MR, Cowie A, Liu L, Summers D, Paul K, Feng P. Future climate impacts on forest growth and implications for carbon sequestration through reforestation in southeast Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 302: 113964.
- [4] 时明芝. 全球气候变化对中国森林影响的研究进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(7): 68-72.
SHI Mingzhi. The influence of the global climate change on forests in China[J]. *China Population Resources and Environment*, 2011, 21(7): 68-72.
- [5] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[R]. IPCC Secretariat, 2007.
- [6] Shilong Piao, Jingyun Fang, Philippe Ciais, Philippe Peylin, Yao Huang, Stephen Sitch, Tao Wang. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1014.
- [7] Hu Zeyin, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, Luo Guangjie, Li Qin, Wu Luhua, Yang Yujie, Tian Shiqi, Li Chaojun, Deng Yuanhong. Changes in ecosystem service values in karst areas of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 301.
- [8] 徐森, 李思亮, 钟君. 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 752-761.
XU Sen, LI Siliang, ZHONG Jun. Effects of land use on riverine dissolved inorganic carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a karst river basin, Southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2022,

- 43(2): 752-761.
- [9] Zhou Guoqing, Jia Bin, Tao Xiaodong, Yan Hongbo. Estimation of karst carbon sink and its contribution to CO₂ emissions over a decade using remote sensing imagery[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 121: 104689.
- [10] Zhao Haijuan, Jiang Yongjun, Xiao Qiong, Zhang Cheng, Behzad Hamid M. Coupled carbon-nitrogen cycling controls the transformation of dissolved inorganic carbon into dissolved organic carbon in karst aquatic systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592, 125764.
- [11] 白晓永, 王世杰, 刘秀明, 容丽, 苏以荣, 周运超, 宋同清. 中国石漠化地区碳流失原因与固碳增汇技术原理探讨[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(6): 1762-1769.
BAI Xiaoyong, WANG Shijie, LIU Xiuming, RONG Li, SU Yirong, ZHOU Yunchao, SONG Tongqing. Carbon loss reasons and carbon sequestration technology of karst rocky desertification region in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(6): 1762-1769.
- [12] 史晨璐. 喀斯特断陷盆地生态系统生产力对土地利用及石漠化治理措施时空变化的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
SHI Chenlu. The response of ecosystem productivity in karst fault basin to the spatial and temporal changes of land use and rock desertification control measures[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [13] Huang X F, Wang S J, Zhou Y C. Soil organic carbon change relating to the prevention and control of rocky desertification in Guizhou Province, SW China[J]. *International Journal of Global Warming*, 2018, 15(3): 315-332.
- [14] Hu N, Lan J C. Impact of vegetation restoration on soil organic carbon stocks and aggregates in a karst rocky desertification area in Southwest China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 1264-1275.
- [15] Hu Peilei, Liu Shujuan, Ye Yingying, Zhang Wei, Wang Kelin, Su Yirong. Effects of environmental factors on soil organic carbon under natural or managed vegetation restoration[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(3): 387-397.
- [16] 卢立华, 农友, 李华, 杨予静, 明安刚, 雷丽群, 何日明, 陈琳. 植被恢复模式对石漠化生态系统碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7229-7236.
LU Lihua, NONG You, LI Hua, YANG Yujing, MING Angang, LEI Liqun, HE Riming, CHEN Lin. Effect of vegetation restoration patterns on the carbon storage in a rocky desertification ecosystem[J]. *Acta Sinica*, 2019, 39(19): 7229-7236.
- [17] 田大伦, 王新凯, 方晰, 闫文德, 宁晓波, 王光军. 喀斯特地区不同植被恢复模式幼林生态系统碳储量及其空间分布[J]. *林业科学*, 2011, 47(9): 7-14.
TIAN Dalun, WANG Xinkai, FANG Xi, YAN Wende, NING Xiaobo, WANG Guangjun. Carbon storage and spatial distribution in different vegetation restoration patterns in karsts area, Guizhou Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(9): 7-14.
- [18] 张斯屿. 典型喀斯特峡谷区生态系统服务时空演变规律: 以贵州省晴隆县为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
ZHANG Siyu. Spatial-temporal evolution of ecosystem services in typical karst gorge area: A case study in Qinglong county, Guizhou Province[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [19] 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.
- [20] 李义平. 基于地表覆被变化的黔东南碳储量时空动态变化研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
LI Yiping. Spatiotemporal dynamic change of carbon storage in southeast Guizhou based on surface cover change[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [21] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 赵楚, 吴静, 张茂莎. 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.
BAI Yixin, SHENG Maoyin, HU Qijuan, ZHAO Chu, WU Jing, ZHANG Maosha. 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.
- [22] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 215-221.
HUANG Xianfei, ZHOU Yunchao, ZHANG Zhenming. Distribution characteristics of soil organic carbon under different land uses in a karst rocky desertification area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 215-221.
- [23] 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 Xianfei, ZHOU Yunchao, ZHANG Zhenming. 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.
- [24] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 王静, 刘爱霞. 生态用地分类初步研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 1-7.
LONG Hualou, LIU Yongqiang, LI Tingting, WANG Jing, LIU Aixia. A primary study on ecological land use classification[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1): 1-7.
- [25] 申元村. 土地类型研究的意义、功能与学科发展方向[J]. *地理研究*, 2010, 29(4): 575-583.
SHEN Yuancun. Studies on land types: Academic significance, function and prospect[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(4): 575-583.

- [26] 陈瑶. 马山县综合自然区划研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2014.
CHEN Yao. Study on the comprehensive physical regionalization of Mashan[D]. Nanning: Nanning Normal University, 2014.
- [27] 牛志君. 涞源县土地类型划分与结构分析研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
NIU Zhijun. Study on the classification and structure analysis of land types in Laiyuan county[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [28] 林清山, 洪伟, 吴承祯, 林勇明, 陈灿. 永春县柑橘林生态系统的碳储量及其动态变化[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 309-316.
LIN Qingshan, HONG Wei, WU Chengzhen, LIN Yongming, CHEN Chan. Organic carbon storage and its dynamic change in citrus ecosystem in Yongchun, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 309-316.
- [29] 汪珍川, 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 曾昭霞, 张浩. 广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4462-4472.
WANG Zhenchuan, DU Hu, SONG Tongqing, PENG Wanxia, ZENG Fuping, ZENG Zhaoxia, ZHANG Hao. Allometric models of major tree species and forest biomass in Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(13): 4462-4472.
- [30] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000(5): 518-522.
ZHOU Yurong, YU Zhenliang, ZHAO Shidong. Carbon storage and budget of major chinese forest types[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000(5): 518-522.
- [31] Wen Y G, Sun D J, Zhu H G, Liu J T. Changes in aboveground biomass and diversity between different stages of secondary succession of a karst vegetation in Guangxi, China[C]//Advances in Biomedical Engineering —Proceedings of 2011 International Conference on Agricultural and Biosystems Engineering (ICABE 2011), 2011: 420-423.
- [32] Jin Zhao, Dong Yunshe, Wang Yunqiang, Wei Xiaorong, Wang Yafeng, Cui Buli, Zhou Weijian. Natural vegetation restoration is more beneficial to soil surface organic and inorganic carbon sequestration than tree plantation on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 485-486: 615-623.
- [33] 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[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4658-4667.
DU Hu, SONG Tongqing, ZENG Fuping, WANG Kelin, PENG Wanxia, FU Weibo, LI Shasha. Carbon storage and its controlling factors under different vegetation types in depressions between karst hills, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4658-4667.
- [34] Zhang Zhenming, Zhou Yunchao, Wang Shijie, Huang Xianfei. The soil organic carbon stock and its influencing factors in a mountainous karst basin in P. R. China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2019, 34(3): 1031-1043.
- [35] 张珍明, 周运超, 黄先飞, 田潇. 喀斯特小流域土壤有机碳密度空间异质性及影响因素[J]. 自然资源学报, 2018, 33(2): 313-324.
ZHANG Zhenming, ZHOU Yunchao, HUANG Xianfei, TIAN Xiao. Spatial distribution of soil organic carbon density and the influencing factors in a karst mountainous basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 313-324.
- [36] 钟聪, 李小洁, 何园燕, 邱微文, 李杰, 张新英, 胡宝清. 广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 478-485.
ZHONG Cong, LI Xiaojie, HE Yuanyan, QIU Weiwen, LI Jie, ZHANG Xinying, HU Baoqing. Spatial variation of soil organic matter and its influencing factors in Guangxi, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(3): 478-485.
- [37] 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣. 喀斯特典型生态系统土壤有机碳积累特征与稳定机制[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 907-915.
CHEN Xiangbi, HE Xunyang, HU Yajun, SU Yirong. Characteristics and mechanisms of soil organic carbon accumulation and stability in typical karst ecosystems[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 907-915.
- [38] 李杨, 苏以荣, 何寻阳, 王媛华, 郑华, 黎蕾, 邱虎森, 赵次娴. 桂西北棕色石灰土和红壤有机碳矿化特征和差异[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(5): 632-635.
LI Yang, SU Yirong, HE Xunyang, WANG Aihua, ZHENG Hua, LI Lei, QIU Husen, ZHAO Cixian. Characteristics and discrepancies of soil organic carbon mineralization for brown limestone soil and red soil in northwest Guangxi[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(5): 632-635.
- [39] 陶玉华, 白丽荣. 喀斯特风水林和荒山生态系统碳储量的研究[J]. 广西植物, 2018, 38(8): 1062-1069.
TAO Yuhua, BAI Lirong. Carbon storage of ecosystems in holly hill and barren hill karst area[J]. *Guihaia*, 2018, 38(8): 1062-1069.

Service assessment of carbon storage of typical karst peak-cluster depressions in Guilin

ZHU Bailu^{1,2,3}, DENG Yan⁴, XIE Yunqiu^{1,3}, KE Jing^{1,3}, WU Song^{1,3,5}, HUANG Jing², HOU Mengmeng²

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/ International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Shenzhen Yuanqing Environmental Technology Service Co., LTD, Shenzhen, Guangdong 518071, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 4. College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 5. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract To reveal the impact of land use change on carbon storage under different development modes, this study took the karst peak-cluster depression in Xitang village, Xingping town, Yangshuo county, Guilin City as an example. Based on the field survey data in 2020, the study used InVEST model to evaluate the carbon storage of karst peak-cluster depression, and simulated the impact of vegetation types on carbon storage under two development scenarios (ecological protection model and economic development model).

The study showed the following results, (1) The total carbon storage of the study area was 16,641.68 t with the carbon density of 221.30 t·hm⁻². Its total economic value was 19.97 million yuan, and the economic value per unit area was 265,600 yuan·hm⁻². The low value area was mainly concentrated in the north side of the hill slope, while the high value area was mainly distributed in the west and south side of the hill slope. (2) The proportions of the steep slope of natural forest, the gentle slope of natural forest and the gentle slope of economic forest to the total carbon storage of ecosystem were 51.96%, 16.04% and 10.44%, respectively. These three land types were the main sources of carbon storage. The carbon storage capacity per unit area of steep slopes of plantation and gentle slopes of natural forest was the strongest. (3) The amounts of carbon storage of artificial forest, natural forest and economic forest were 244.35 t, 12,215.17 t and 4,182.36 t, accounting for 1.47%, 73.40% and 25.13% of the total carbon storage of the ecosystem, respectively. Natural forest is the main carbon sink of the ecosystem. The carbon densities of artificial forest, natural forest and economic forest were 339.38 t·hm⁻², 261.79 t/ha and 150.34 t·hm⁻², and the economic value per unit area was 407,200 yuan·hm⁻², 314,200 yuan·hm⁻², and 180,400 yuan·hm⁻², respectively. Not only soil in natural forest and economic forest but also soil and above-ground vegetation in artificial forest are the largest carbon sink. (4) The carbon densities of soil, above-ground vegetation, underground vegetation and litter were 184.24 t·hm⁻², 29.94 t·hm⁻², 7.05 t·hm⁻² and 0.06 t·hm⁻², respectively. The proportion of soil carbon sink to ecosystem carbon sink was 83.25%, and soil carbon storage was the largest carbon pool in the ecosystem. Soil in both natural forest and economic forest is the largest carbon sink, and soil and above-ground vegetation in artificial forest have the largest carbon sink. (5) The carbon reserves of current situation, ecological protection mode and economic development mode were 19.9725 million yuan, 22.5214 million yuan and 15.9530 million yuan, respectively. Under the ecological protection mode, the natural forest and artificial forest increased by 8.74 hm² and 4.78 hm², respectively; the economic value of carbon storage increased by 2.5489 million yuan. Under the economic development mode, the area of economic forest increased by 45.99 hm², and the economic value of carbon storage lost 4.0195 million yuan. The study indicates the impacts of different development modes on land use and carbon storage service function of karst ecosystem, which can provide reference for determining the future development mode of the core scenic area of Lijiang River Scenic Area in Guilin and the Karst World Natural Heritage Site in Guilin and the control of rocky desertification.

Key words carbon storage, InVEST model, karst peak-cluster depression, scenario simulation, land use

(编辑 张玲 杨杨)