



水土保持通报

Bulletin of Soil and Water Conservation

ISSN 1000-288X, CN 61-1094/X

## 《水土保持通报》网络首发论文

题目： 基于 PLUS 和 InVEST 模型贵阳市碳储量时空演变及多情景模拟预测  
作者： 李胡跃，戴全厚，胡泽银，桂钰翔  
DOI： 10.13961/j.cnki.stbctb.20240329.001  
收稿日期： 2023-07-12  
网络首发日期： 2024-04-09  
引用格式： 李胡跃，戴全厚，胡泽银，桂钰翔. 基于 PLUS 和 InVEST 模型贵阳市碳储量时空演变及多情景模拟预测[J/OL]. 水土保持通报.  
<https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240329.001>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于 PLUS 和 InVEST 模型贵阳市碳储量 时空演变及多情景模拟预测

李胡跃, 戴全厚, 胡泽银, 桂钰翔

(贵州大学 林学院 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 分析贵州省贵阳市历史和未来时间序列下碳储量时空演变特征, 为促进区域可持续发展提供科学依据。[方法] 以贵阳市为例, 利用 ArcGIS 评估 2000—2020 年贵阳市的土地利用变化与碳储量时空演变特征, 并耦合 PLUS, InVEST 模型预测 2030 年不同发展情景下土地利用空间格局及其碳储量变化。[结果] ①2000—2020 年贵阳市土地利用变化为耕地和草地转化为水域和建设用地; 耕地面积减少了 190 km<sup>2</sup>; 草地面积减少了 188 km<sup>2</sup>; 水域面积增加了 43 km<sup>2</sup>; 建设用地面积锐增了 367 km<sup>2</sup>。②2000—2020 年贵阳市碳储总量呈现先增加后下降趋势, 共降低了 2.197 × 10<sup>6</sup> t, 在空间上呈现北高南低的分布格局, 北部区域是贵阳市的主要碳汇功能区, 建设用地扩张是影响研究区碳储量降低的主要原因。③2030 自然情景、耕地保护和生态保护情景下建设用地分别扩张了 279, 193, 175 km<sup>2</sup>, 增幅为 51.48%, 35.61%, 32.29%。④2030 年自然情景、耕地保护和生态保护情景下的碳储总量分别为 1.400 × 10<sup>8</sup>, 1.398 × 10<sup>8</sup>, 1.410 × 10<sup>8</sup> t, 相较于 2020 年均有所下降。碳储量在空间上始终表现为北高南低的分布格局, 生态保护情景下更有利于减缓研究区碳储量的下降趋势。[结论] 未来贵阳市在生态环境方面可继续加强退耕还林政策来恢复碳储量水平, 而在城市发展方面, 应该制定更加合理的综合发展战略, 在经济发展的同时又能兼顾生态保护。

**关键词:** InVEST 模型; 土地利用; 碳储量; 贵阳市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0000-00

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 李胡跃, 戴全厚, 胡泽银, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型贵阳市碳储量时空演变及多情景模拟预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3) Li Huyue, Dai Quanhou, Hu Zeyin, et al. Temporal and spatial evolution of carbon storage in Guiyang City based on PLUSInVEST model and multi-scenario simulation and prediction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3)

## Temporal and Spatial Evolution of Carbon Storage in Guiyang City Based on PLUSInVEST Model and Multi-scenario Simulation and Prediction

Li Huyue, Dai Quanhou, Hu Zeyin, Gui Yuxiang

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal evolution characteristics of carbon stocks in Guiyang City, Guizhou Province, in during historical and future time periods were analyzed in order to provide a scientific basis for the promotion of regional sustainable development. [Methods] ArcGIS was used to assess the spatial and temporal evolution characteristics of land use changes and carbon stocks in Guiyang City from 2000 to 2020. These results were coupled with the PLUSInVEST model to predict the spatial pattern of land use and its carbon stock change under different development scenarios in 2030. [Results] ① From 2000 to 2020, land use changes in Guiyang City came from the conversion of arable land and grassland into water areas and construction land. The area of arable land decreased by 190 km<sup>2</sup>. The area of grassland decreased by 188 km<sup>2</sup>. The water area increased by 43 km<sup>2</sup>. The area of construction land increased sharply by 367 km<sup>2</sup>. ② The total carbon stock of Guiyang City from 2000 to 2020 was characterized by the spatial evolution of carbon stock in different development scenarios. The total carbon stock of Guiyang City during 2000—2020

收稿日期: 2023-07-12

修回日期: 2023-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特碳酸盐岩与碎屑岩交互区坡面土壤侵蚀过程与机理”(42167044)

第一作者: 李胡跃(1998—), 男(汉族), 贵州省毕节市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化治理。Email: Li3011221452@163.com。

通信作者: 戴全厚(1969—), 男(汉族), 陕西省长武县人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化治理研究。Email: qhdairiver@163.com。

initially increased and then decreased, with a total decrease of  $2.197 \times 10^6$  t. The spatial distribution pattern was characterized as high in the north and low in the south, and the northern region was the main carbon sink functional area of Guiyang City. The expansion of the construction land area was the main factor decreasing carbon stocks in the study area. ③ Under the natural, arable land protection, and ecological protection scenarios for 2030, the area of construction land expanded by 279, 193, and 175 km<sup>2</sup>, respectively, with increases of 51.48%, 35.61%, and 32.29%. ④ The total carbon stocks under the natural, arable land protection, and ecological protection scenarios for 2030 were  $1.400 \times 10^8$ ,  $1.398 \times 10^8$ , and  $1.410 \times 10^8$  t, respectively, and these values had decreased from the values in 2020. The carbon stocks always showed a spatial distribution pattern of high in the north and low in the south. The ecological protection scenario was more conducive to slowing down the declining trend of carbon stocks in the study area. [Conclusion] In the future, Guiyang City should continue to strengthen the policy of returning farmland to forest land in order to restore the carbon stock level in terms of the ecological environment. In terms of urban development, a more reasonable and comprehensive development strategy should be formulated to take into account ecological protection while developing the economy.

**Keywords:** InVEST model; land use; carbon storage; Guiyang City

全球气候变暖的背景下中国在 2020 年召开的第七十五届联合国大会上提出 2030 年实现二氧化碳排放量达到峰值<sup>[1]</sup>。森林、土壤等天然碳汇通过吸收空气中的二氧化碳能有效减少二氧化碳排放量<sup>[2]</sup>，当下如何协调好生态环境与经济效益之间关系，提高区域内碳储量成为研究的一个热点<sup>[3]</sup>。陆地生态系统碳储量在全球碳循环起着关键作用，而土地利用变化是影响陆地生态系统碳储量的重要因素之一<sup>[4]</sup>，因此研究不同土地利用背景下碳储量的变化对提高未来国土空间规划的科学性以及实现“双碳”目标具有重要意义<sup>[5]</sup>。

目前评估陆地生态系统碳储量主要通过样地清查<sup>[6]</sup>和模型模拟<sup>[7]</sup>。样地清查法虽然是最有效的碳储量估算方法，但由于其操作相对复杂，且主要适用于小区域的研究，因而在研究相对范围较广的区域时，主要采用模型评估的方法。而在众多评估模型中，InVEST 模型因其所需数据少，运行速度快、评估结果精确等特点得到广泛应用<sup>[8-9]</sup>。近年来国内外众多学者应用 InVEST 模型从不同空间尺度下出发对陆地生态系统碳储量开展了大量研究<sup>[10-12]</sup>。王成武等<sup>[13]</sup>分析了 2005—2020 年太行山地区碳储量时空差异特征，并探究了其驱动碳储量时空差异的影响因子，卿苗等<sup>[14]</sup>探究了石羊河流域土地利用变化对碳储量的响应，Hassana 等<sup>[15]</sup>基于 InVEST 模型评估了 2000—2020 年流域碳储量变化。综合来看利用 InVEST 模型研究土地利用变化对碳储量的影响多集中在非喀斯特地区<sup>[16]</sup>，少有以典型喀斯特地区为研究对象展开历史和未来时间序列下碳储量时空变化研究。

当下土地利用模型的广泛应用为研究未来碳储量变化提供了新的思路。韩旭超等<sup>[17]</sup>运用灰色模型 (GM) 预测了 2030 年黑龙江省森林蓄积量，并建立

森林蓄积量与碳储量的转换关系，帕茹克等<sup>[18]</sup>基于元胞自动机 (CA)—马尔可夫模型 (Markov) 模拟了昆明市 2030 年土地利用格局变化对碳储量的影响，李小军等<sup>[19]</sup>利用 GeoSOS—FLUS 模型模拟了 2035 年北海市自然情景和绿色集约情景下土地利用变化，并采用空间自相关分析了区域内碳储量在空间格局上的差异，Shaw 等<sup>[20]</sup>利用碳收支模型 (CBM—CFS3) 预测加拿大未来森林碳储量变化。但上述模型并不能很好的挖掘土地利用内部变化机理，因而不能更好的模拟土地利用类型斑块复杂多变的特征。斑块生成土地利用模拟 (PLUS) 模型是新型土地利用模型，相对于以往预测模型，PLUS 模型能较为全面的挖掘各类土地利用诱因，并能精确模拟多类土地利用斑块的时空变化<sup>[21]</sup>，已被国内外学者应用于未来土地利用动态评估<sup>[22-25]</sup>。

贵州省是中国西南喀斯特地貌的中心，是全国水土流失与荒漠化治理的重点区域<sup>[26]</sup>。贵阳市作为贵州省经济发展中心，同时也是一座森林高覆盖率城市，具有巨大的固碳潜力<sup>[27]</sup>，是未来实现“双碳”目标的重要区域<sup>[28]</sup>。近年来随着社会经济的飞速增长，城市化的发展必然伴随着高强度的碳排放<sup>[29]</sup>，在新时代绿色发展的背景下，协调好生态环境与经济发展之间的关系，是当下贵阳市可持续发展中亟需解决的关键性问题。科学预测未来时间序列下碳储量时空演变特征对提高区域内生态环境保护具有重要现实意义<sup>[30]</sup>。鉴于此，本研究耦合 PLUS 与 InVEST 模型模拟贵阳市 2030 年自然情景、耕地保护和生态保护情景下土地利用空间格局及其碳储量变化，以为贵阳市未来国土空间规划以及实现“双碳”目标提供科学的理论依据<sup>[31]</sup>。

# 1 研究区概况及试验数据来源

## 1.1 研究区概况

贵阳市位于黔中城市群中部,东经  $106^{\circ}07' - 107^{\circ}17'$ ,北纬  $26^{\circ}11' - 26^{\circ}55'$ 之间,总面积约为  $8\ 045\text{ km}^2$ 。地势中部高,南北低(图 1),属于亚热带湿润气候,年平均气温为  $15.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为  $1\ 131.5\text{ mm}$ <sup>[32]</sup>。全市以山地、丘陵为主,森林覆盖率常年在 48%以上,有“森林之城”之称。同时贵阳市矿产资源分布密集,工业基础良好,是贵州省实施工业强省和提高城镇化发展的重要支撑。其下管辖有 6 区(云岩、花溪、南明、乌当、白云、观山湖),3 县(开阳、息烽、修文)以及 1 市(清镇),截止到 2022 年贵阳市常住人口为  $6.22 \times 10^6$  人,占全省人口总数的 16.13%,地区生产总值  $4.921 \times 10^{11}$  元,占全省的 24.36%<sup>[33]</sup>。

## 1.2 数据来源和处理

1.2.1 土地利用以及驱动因素数据 本研究主要采用的数据(1)贵阳市 2000—2020 年 3 期土地利用数据(分辨率 30 m)源自于中国科学院数据中心(<http://www.resdc.cn>), (2) PLUS 模型土地利用扩张模

块(LEAS)采用的土地利用驱动因素(表 1)包括气候环境数据(6 个)和社会经济数据(6 个)。所有栅格数据大小重采样为 100 m,各数据空间坐标系均为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N。

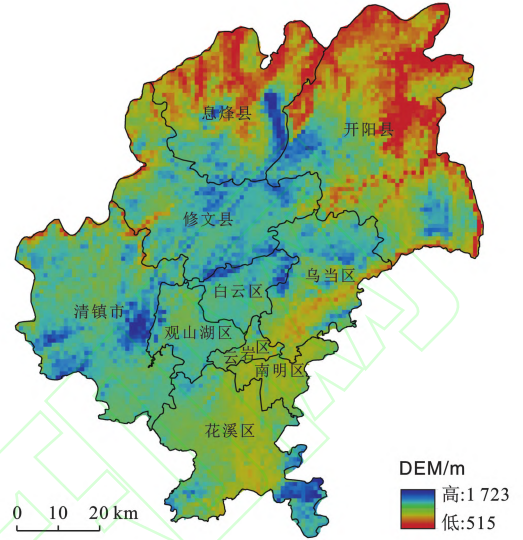


图 1 贵阳市地理位置高程图

Fig.1 Elevation map of Guiyang City

表 1 土地利用驱动因素及数据来源  
Table 1 Land use drivers and data sources

数据类型	数据名称	分辨率/ m	数据来源
气候环境数据	DEM	30	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
	坡度	30	DEM 数据提取
	年平均降雨	1 000	中科院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
	年平均气温	1 000	中科院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
	土壤类型	1 000	中科院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
	NDVI	30	中科院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
社会经济数据	GDP	1 000	中科院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
	夜间灯光	1 000	中科院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
	人口数量	100	Worldpop( <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a> )
	到居民点的距离	1 000	OpenSteeetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	到铁路的距离	1 000	OpenSteeetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	到公路的距离	1 000	OpenSteeetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )

1.2.2 碳密度数据 贵阳市各类土地利用的碳密度数据参考前人研究<sup>[34]</sup>获得(表 2)。

表 2 贵阳市不同土地利用类型碳密度  
Table 2 Carbon density of different land use in Guiyang City  $\text{t}/\text{hm}^2$

土地利用类型	地上碳密度 $C_{\text{above}}$	地下碳密度 $C_{\text{below}}$	土壤碳密度 $C_{\text{soil}}$	死亡有机质碳密度 $C_{\text{dead}}$
耕地	4.6	0.59	108.4	1
林地	20.36	67.5	170	7.8
草地	0.82	0.87	89.02	0
水域	0	0	0	0
建设用地	0	0	71	0
未利用地	0.74	0.13	69.92	0

## 2 研究方法

### 2.1 碳储量

本研究通过在 InVEST 模型碳贮存模块在中输入贵阳市不同土地利用类型的碳密度参数,得到贵阳市不同时期碳储量分布图<sup>[35]</sup>。

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

式中: $C$  代表总碳储量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{above}}$  代表地上生物碳储量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{below}}$  代表地下生物碳储量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{soil}}$  代表土壤有机碳储量( $\text{t}/\text{hm}^2$ );  $C_{\text{dead}}$  代表枯落物碳储量( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。  $S$  为不同土地利用类型的面积( $\text{hm}^2$ )。

## 2.2 PLUS 模型

PLUS 模型是由中国地质大学和国家 GIS 工程技术中心联合开发,该模型集成了土地扩张分析(LEAS)的挖掘方法和基于多类型随机斑块种子(CARS)模型,可用于预测未来土地利用景观的斑块演化。通过提取 2 期土地利用类型数据,采用随机森林算法探索土地利用变化与驱动因素之间的关系,并结合土地扩张斑块计算研究区各土地利用类型的增长概率,最后在(CARS)模型根据不同土地利用类型的转换矩阵以及邻域权重进行模拟预测<sup>[36]</sup>。

2.2.1 情景模拟设置 ①自然发展情景:依据 2010—2020 年发展趋势,以原有土地利用转移概率模拟 2030 土地利用。②耕地保护情景:以耕地保护为目的,设定耕地向建设用地转移概率减少 50%,向林地和草地转移概率减少 20%,除未利用地和水域外,其它土地利用转为耕地的概率增加 20%。③生态保护情景:以生态环境保护为目的,限制城市化发展,设定耕地向建设用地转移概率减少 30%,林地和草地向建设用地转移概率减少 40%,耕地向林地和草

地转移增加 20%。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用时空变化

表 3 显示研究区占地面积为 8045 km<sup>2</sup>,土地利用类型耕地和林地为主(图 2),2000,2010,2020 年两种土地利用类型面积占比分别为 77.58%,79.26%和 74.78%。2000—2020 年研究区耕地面积减少了 190 km<sup>2</sup>,面积占比减少了 2.36%;林地面积表现为先增加后减小趋势,总面积变化上较为稳定;草地面积减少了 188 km<sup>2</sup>,面积占比减少了 2.34%;水域面积增加了 43 km<sup>2</sup>,面积占比增加了 0.59%;伴随着城市化的发展,建设用地面积锐增了 367 km<sup>2</sup>,面积占比增加了 4.67%;贵阳市区地形较为平坦、人口密集,是建设用地扩张的主要区域。

由于未利用地变化不大且面积占比太小,因此不做分析。整体上贵阳市土地利用变化表现为水域和建设用地面积增加,耕地、草地等生态用地面积减少。

表 3 2000—2020 年贵阳市土地利用面积变化

Table 3 Change of land use area in Guiyang City from 2000 to 2020

km<sup>2</sup>

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%
耕地	2 305	28.65	2 310	28.71	2 115	26.29
林地	3 936	48.93	4 067	50.55	3 901	48.49
草地	1 531	19.03	1 333	16.57	1 343	16.69
水域	93	1.15	96	1.21	140	1.74
建设用地	174	2.07	233	2.89	542	6.74
未利用地	6	0.07	6	0.07	4	0.05
总计	8 045	100	8 045	100	8 045	100

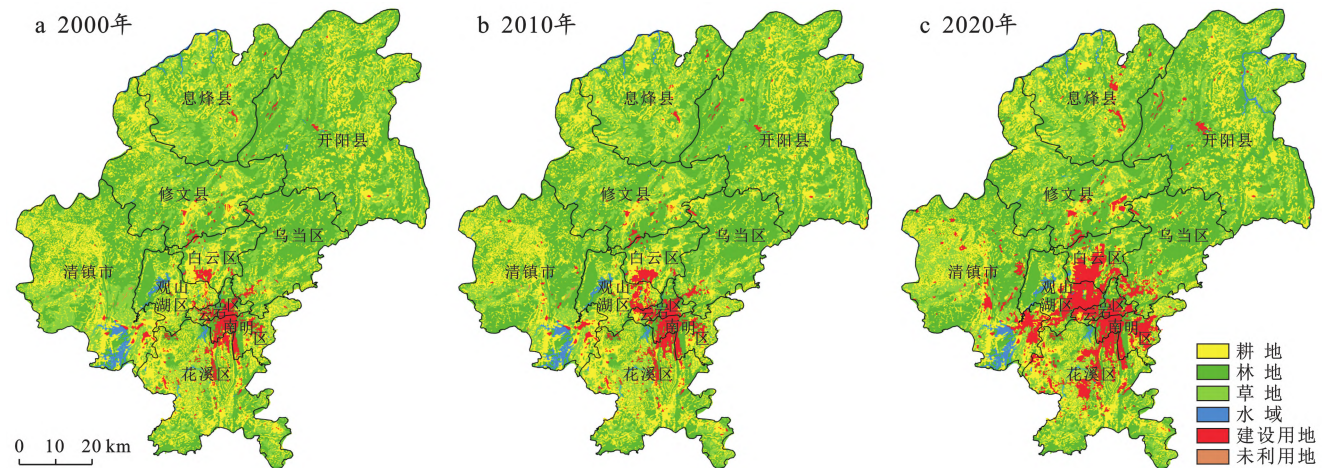


图 2 2000—2020 年贵阳市土地利用空间分布

Fig.2 Spatial distribution of land use in Guiyang City from 2000 to 2020

### 3.2 碳储量时空演变特征

2000,2010,2020 年研究区碳储总量分别为 1.461

$\times 10^8$ ,  $1.483 \times 10^8$ ,  $1.439 \times 10^8$  t, 呈先增加后下降的趋势(表 4)。2000—2010 年碳储总量增加了  $2.14 \times$

$10^6$  t,增幅为 1.46%;2010—2020 年碳储总量减少了  $4.34 \times 10^6$  t,减幅为 2.93%。2000—2020 年林地碳储量作为提供研究区碳储量服务的主要来源,在不同时间段占比均在 70%,研究期间伴随着不同土地利用类型间的转化,各地类碳储总量也随之发生变化。研

究区耕地、林地和草地碳储总量整体在不断减少,分别减少了  $2.17 \times 10^6$ ,  $9.18 \times 10^5$ ,  $1.71 \times 10^6$  t,其中耕地碳储总量变化最大;建设用地作为碳储量低贡献度地类,建设用地扩张对研究区整体碳储总量起到相反的作用。

表 4 2000—2020 年贵阳市碳储量变化

Table 4 Change of carbon storage in Guiyang City from 2000 to 2020

$10^5$  t

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2000	264.21	1 045.39	138.89	0	12.38	0.42	1 461.29
2010	264.78	1 080.66	120.94	0	16.53	0.39	1 482.71
2020	242.56	1 036.21	121.77	0	38.51	0.26	1 439.32

如图 3 所示,研究区 2000—2020 年碳储量服务在空间分布上差异并不明显,均呈现北高南低的分布格局,碳储量高值区( $>170$  t/hm<sup>2</sup>)主要分布在乌当区、开阳县、修文县、清镇市以及息烽县(图 4),高值区内城市化程度偏低,土地利用类型以耕地、林地为

主,固碳能力相对较强;低值区( $<170$  t/hm<sup>2</sup>)主要分布在花溪区、南明区、观山湖区以及云岩等市区,低值区内城市化发展迅速,受人类活动影响明显,固碳能力相对较弱,研究结果表明北部区域是贵阳市的主要碳汇功能区。

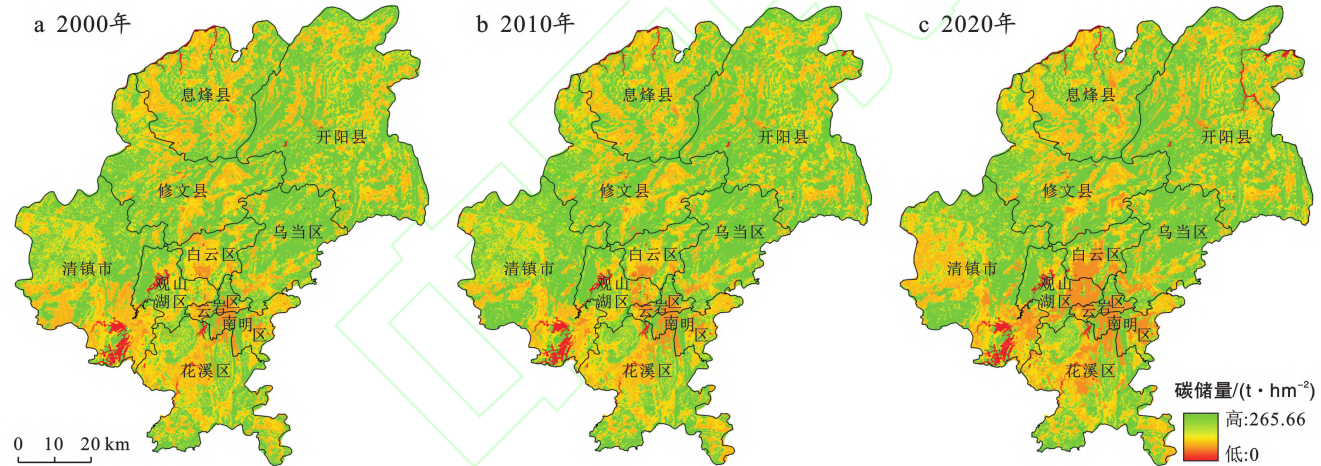


图 3 2000—2020 年贵阳市碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon storage in Guiyang City from 2000 to 2020

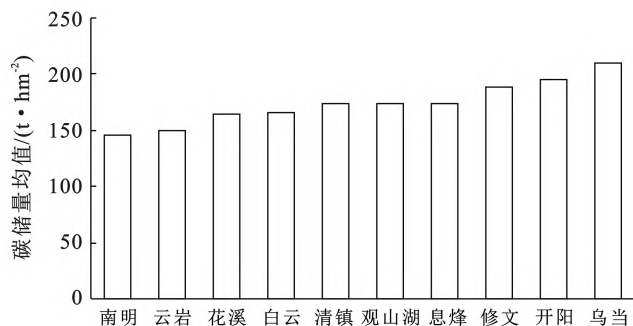


图 4 2000—2020 年贵阳市各县域单位面积碳储量均值

Fig.4 Average carbon storage per unit area of each county in Guiyang City during 2000—2020

### 3.3 模型精度检验

本研究基于 PLUS 模型模拟研究区 2030 年不同发展情景下土地利用面积变化,具体操作:首先利用

2000,2010 年两期土地利用数据在马尔可夫链(Markov chain)中预测 2020 年自然发展情景下土地利用,其次在土地扩张分析(LEAS)模块中得到 2000—2010 年各类土地利用扩张情况,最后以水域为限制转化区域在多类型随机斑块种子(CARS)模块中设置领域权重和土地利用转移矩阵模拟得到 2020 年土地利用空间分布(图 5)。将实际 2020 年土地利用数据和模拟数据在验证模块(Validation)中进行精度检验(表 5),经检验 kappa 系数为 0.8268 大于 0.7,具有一定可靠性。

### 3.4 不同发展情景下土地利用变化

基于 2020 年土地利用数据在 PLUS1.4.0 模型中模拟得到研究区 2030 年自然发展、耕地保护和生态保护情景下土地利用空间分布(图 6)。与 2020 基准

年相比,不同发展情景下建设用地扩张明显,且主要以云岩、南明等中心城区向外不断扩张,其原因是贵阳市作为贵州省省会城市兼具带动全省经济发展的重任,必须大力发展经济建设,加快城市化的进程。2030年自然发展情景下随着建设用地不断侵占其他生态用地,使得耕地、林地和草地等碳储量高贡献地类面积相较于基准年出现不同程度的减少(表6)。而相较于自然发展情景,耕地保护情景下以保护农业生产抑制建设用地扩张为主要目的,建设用地面积相较于自然发展情景下减少了86 km<sup>2</sup>,减幅为10.48%;耕地面积增加了139 km<sup>2</sup>,增幅为7.12%。生态保护情景下以生态保护为主要目的,建设用地相

较于自然发展情景下减少了104 km<sup>2</sup>,减幅为12.67%;林地和草地面积分别增加了41,38 km<sup>2</sup>,增幅为1.09%,2.83%。

表 5 PLUS 模型精度验证

Table 5 Accuracy verification of PLUS model

土地利用类型	模拟像元数	实际像元数	模型精度	使用者精度
耕地	230 936	211 491	0.930 4	0.855 6
林地	417 544	390 137	0.965 6	0.902 2
草地	116 499	134 300	0.783 9	0.900 9
水域	10 084	13 967	0.632 1	0.890 9
建设用地	28 904	54 233	0.456 5	0.854 7
未利用地	508	384	0.812 5	0.590 9

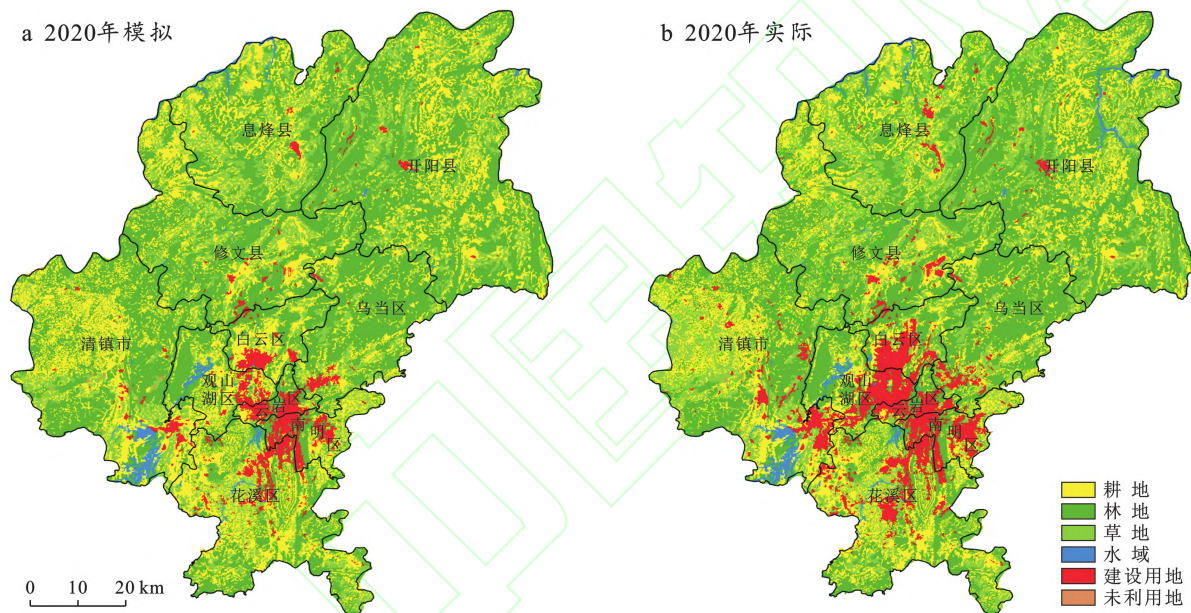


图 5 模拟和实际 2020 年土地利用分布

Fig.5 Simulated and real 2020 land use distribution map

表 6 不同情景模式下土地利用面积变化

Table 6 Land use area change under different scenario models

情景模式	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	km <sup>2</sup>
2020 年	2 115	3 901	1 343	139	542	4	
自然情景	1 953	3 747	1 345	176	821	3	
耕地保护情景	2 092	3 711	1 328	176	735	3	
2030 年	1 978	3 788	1 383	176	717	3	
生态保护情景	1 978	3 788	1 383	176	717	3	
自然情景—耕地保护情景	139	-36	-17	0	-86	0	
自然情景—生态保护情景	25	41	38	0	104	0	

### 3.5 2030 年不同发展情景下碳储量变化

图 7—8 所示不同发展情景下碳储量在空间分布上差异不明显,且延续了历史碳储量空间分布特征,均呈现北高南低的格局。2030 年研究区自然情景、耕地保护和生态保护情景下的碳储总量分别为  $1.400 \times 10^8$ ,  $1.398 \times 10^8$ ,  $1.410 \times 10^8$  t(表 7),不同发展情景

下碳储总量相较于 2020 基准年均有所下降,其主要原因是由于林地碳储量的降低。耕地保护情景下碳储总量减少最多,减少了  $4.09 \times 10^6$  t,该情景下虽然减缓了建设用地扩张速度,但却使得耕地侵占了部分林地,而耕地碳密度相对于林地偏低,使得研究区整体碳储量下降最多。

自然发展情景下延续了历史转移概率, 碳储总量降低了  $3.96 \times 10^6$  t, 而整体上与耕地保护情景下变化不明显。而相对于自然情景和耕地保护情景, 生态保

护情景下碳储总量减少最低, 减少了  $2.98 \times 10^6$  t, 该情景下限制林地面积的转出, 更有利于减缓研究区碳储量的下降趋势。

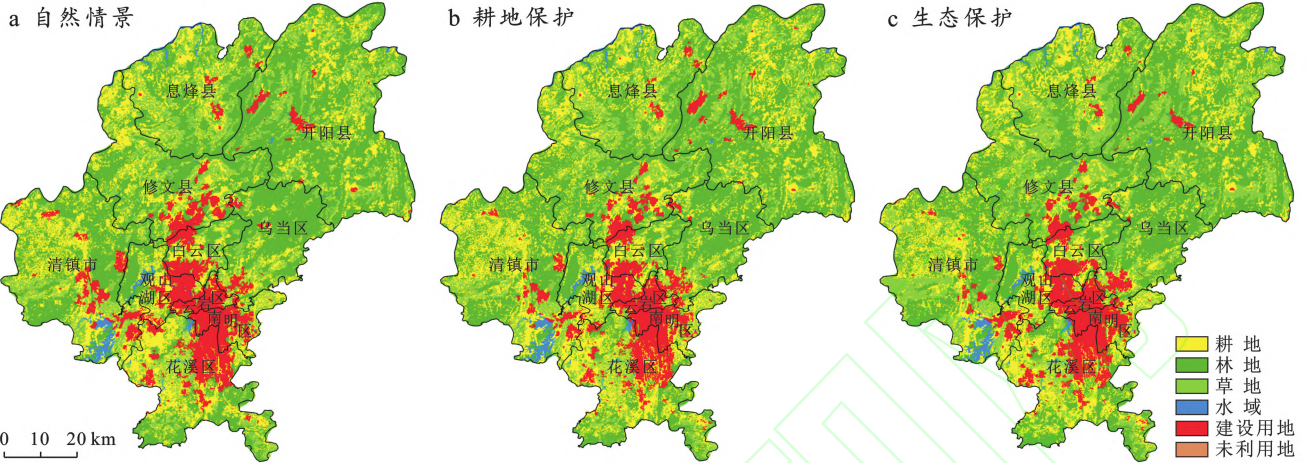


图 6 2030 年不同发展情景下贵阳市土地利用空间分布

Fig.6 Spatial distribution of land use in Guiyang City under different development scenarios in 2030

表 7 贵阳市不同情景各类土地利用碳储量

Table 7 Carbon storage of land use in different scenarios in Guiyang City

$10^5$  t

情景模式	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2023 年 自然情景	223.79	995.43	122.00	0	58.29	0.21	1 400
2023 年 耕地保护	239.72	985.86	120.46	0	52.18	0.21	1 398
2023 年 生态保护	226.66	1 006.32	125.45	0	50.91	0.21	1 410
2020 年	242.56	1 036.21	121.77	0	38.51	0.26	1 439

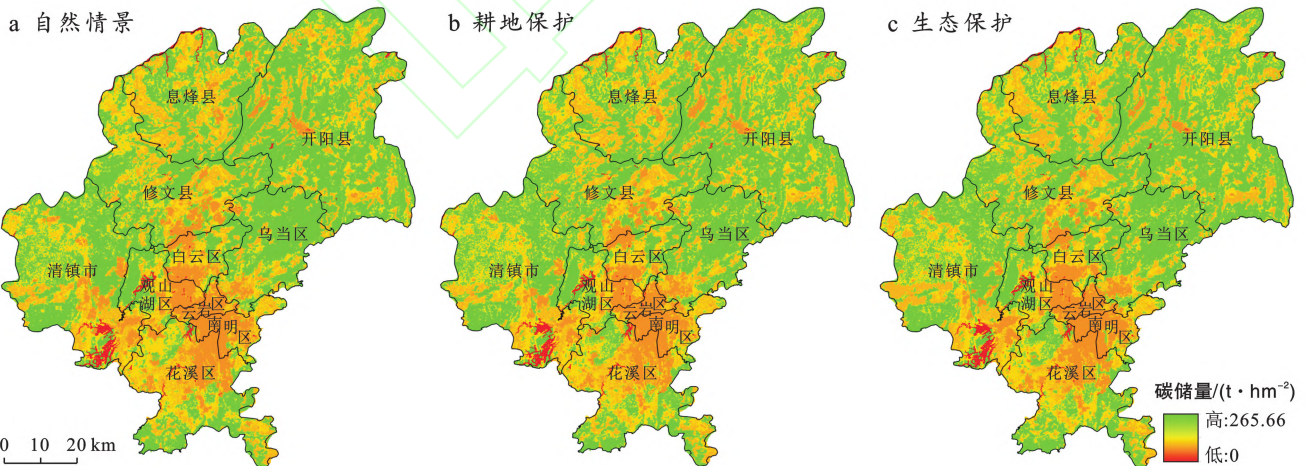


图 7 2030 年不同发展情景下贵阳市碳储量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of carbon storage in Guiyang City under different development scenarios in 2030

### 3.6 历史和未来时间序列下碳储量空间变化特征

在 ArcGIS 中利用差值分析和重分类法将研究区历史和未来时间序列下碳储量变化划分为增加区、无变化区及减少区(图 9)。2000—2020 年以及不同发展情景下碳储量无变化区域表现较为稳定, 均占

77% 以上, 减少区和增加区占比范围在 4%~12% 之间。2000—2020 年无变化区占比最高为 86.52%, 碳储量减少区主要分布在云岩区、南明区、观山湖、花溪区以及清镇市北部, 增加区则主要分布在清镇市中部地区。2030 年不同发展情景下无变化区面积



逐渐缩小,其中生态保护情景下无变化区面积占比(77.56%)最小,而增加区(11.24%)和减少区(11.20%)面积占比最大。3种发展情景下减少区不断向研究区北部息烽县、开阳县和修文县扩张,说明在2030年随着经济的发展人类活动会逐渐向北部偏移,致使林地等高碳密度生态用地被相继侵占;而增加区却在南部观山湖区以及清镇市扩张,这些区域作为当下研究区重点发展区域,在发展过程中注重生态环境保护,对研究区碳储量的提高有一定的积极作用。

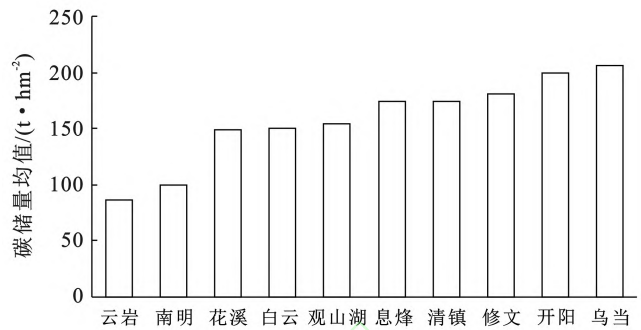


图 8 2030年不同发展情景下贵阳市各县域单位面积碳储量均值  
Fig.8 Average carbon storage per unit area of counties in Guiyang City under different development scenarios in 2030

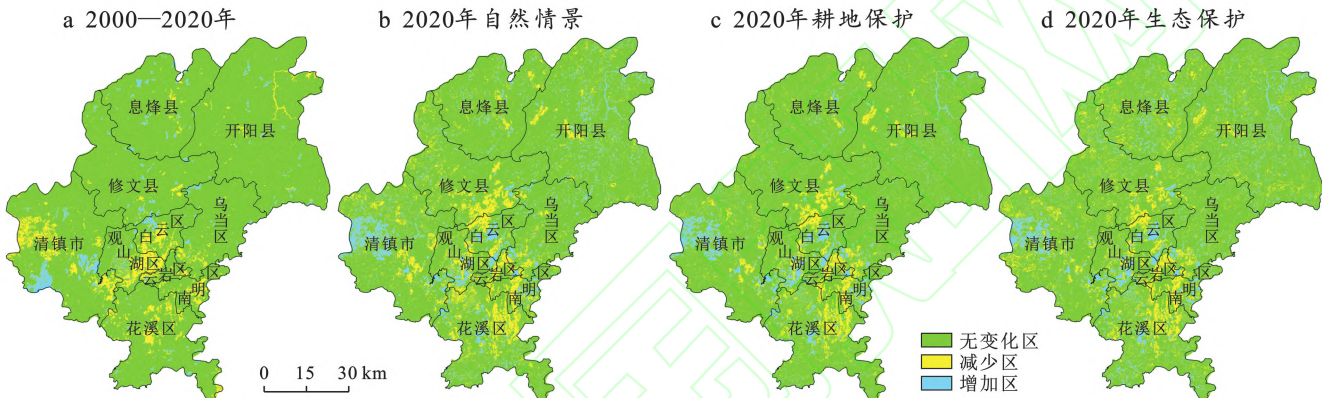


图 9 历史和未来时间序列下贵阳市碳储量服务空间变化

Fig.9 Spatial changes of carbon storage services under historical and future time series in Guiyang City

## 4 讨论

(1) 土地利用变化对碳储量的影响。本研究以典型喀斯特山地城市为研究对象,分析了贵阳市在历史和未来时间序列下土地利用变化情况,并探究了其碳储量变化特征。研究表明 2000—2020 年贵阳市土地利用变化主要表现为耕地、林地和草地转为建设用地,这与杨静怡等<sup>[37]</sup>研究的结果一致,南部中心市区是人口密集区域,伴随着城市化的发展建设用地不断向外扩张。在历史和未来时间序列下贵阳市碳储量在空间上均表现为北高南低的分布格局,且呈下降趋势。其原因主要是由于贵阳市是森林高覆盖率的 山地城市,在经济高速发展的背景下城市化的进程必然导致高碳密度的地类向低碳密度的地类转化,从而使得碳储总量下降。文中设定耕地保护情景下,在一定程度上保护了农业生产,但却降低了生态效益,整体碳储量较于自然发展情景下仍在下降。而在生态保护情景下,减缓了林地面积的转出,使得整体碳储量水平高于自然情景和耕地保护情景,未来在生态环境方面可继续加强退耕还林政策来恢复碳储量水平,而在城市发展方面,应该制定更加合理的综合发

展战略,在经济发展的同时又能兼顾生态保护。

(2) 模型的局限性。本研究在选取 PLUS 模型土地利用变化驱动因子只考虑了气候环境和社会经济等因素,而忽略了实际现实中政策因素的影响,可能会对模拟结果会造成一定影响,在今后研究中应当考虑相关政策因素的影响,提高结果精确性<sup>[21]</sup>。InVEST模型虽然在评估生态系统服务方面得到广泛利用,但本研究所使用的碳密度参数主要采用前人的研究,实际碳密度是会随着时间变化发生改变的,在未来的研究中应结合更多实测数据对碳密度参数进行修正。

## 5 结论

(1) 2000—2020 年贵阳市土地利用变化为耕地和草地转化为水域和建设用地,耕地面积减少了 190 km<sup>2</sup>,草地面积减少 188 km<sup>2</sup>,水域面积增加了 43 km<sup>2</sup>,建设用地面积锐增了 367 km<sup>2</sup>。

(2) 2000—2020 年贵阳市碳储总量呈现先增加后下降趋势,共降低了  $2.197 \times 10^6$  t,在空间上呈现北高南低的分布格局,北部区域是贵阳市的主要碳汇功能区,建设用地扩张是影响碳储量降低的主要原因。

(3) 2030 自然情景、耕地保护和生态保护情景下建设用地分别扩张了 279, 193, 175 km<sup>2</sup>, 增幅为 51.48%, 35.61%, 32.29%。

(4) 2030 年自然情景、耕地保护和生态保护情景下贵阳市的碳储总量分别为  $1.400 \times 10^8$ ,  $1.398 \times 10^8$ ,  $1.410 \times 10^8$  t, 相较于 2020 年均有所下降。碳储量在空间上始终表现为北高南低的分布格局, 生态保护情景下更有利于减缓研究区碳储量的下降趋势。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应: 以贵州省为例[J]. 中国土地科学, 2021, 35(11): 101-111.
- Chen Meijing, Wang Qingri, Bai Zhongke, et al. Transition of “production-living-ecological” space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutralization: A case study of Guizhou Province [J]. China Land Science, 2021, 35(11): 101-111.
- [2] 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. Many scenario simulation of regional land use change on the influence of carbon [J]. China environmental science, lancet, 2023 (11): 6063-6078.
- [3] Environmental Monitoring; Researchers from Department of the Environment Discuss Findings in Environmental Monitoring (Scenario modeling for spatial-temporal change detection of carbon storage and sequestration in a forested landscape in Northern Iran) [J]. Ecology Environment & Conservation, 2018.
- [4] 郭义强, 郎文聚, 黄妮, 等. 土地整理工程对土壤碳排放的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 36-41.
- Guo Yiqiang, Yun Wenju, Huang Ni, et al. The effect of land consolidation projects on soil carbon emissions [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 36-41.
- [5] 毛永发, 周启刚, 王陶, 等. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(5): 1042-1057.
- Mao Yongfa, Zhou Qigang, Wang Tao, et al. Spatial-temporal variation of carbon storage and its quantitative attribution in the Three Gorges Reservoir Area coupled with PLUS-InVEST Geodector model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(5): 1042-1057.
- [6] 曾伟生. 东北落叶松林碳储量生长模型研建及固碳能力分析[J]. 林业资源管理, 2022(1): 18-23.
- Zeng Weisheng. Development of carbon growth models and analysis of carbon sequestration capacity for larch

forest stands in the northeast of China [J]. Forest Resources Management, 2022(1): 18-23.

- [7] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(2): 300-314.
- Luo Shuqi, Hu Xiaomeng, Sun Yuan, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled Plus-Invest model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 300-314.
- [8] 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 Yincheng, Qin Menglin, Pang Yayue, 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.
- [9] 庄子薛, 谢梦晴, 张文萍, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测: 以成德眉资地区为例[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 38-44.
- Zhuang Zixue, Xie Mengqing, Zhang Wenping, et al. Temporal and spatial changes and multi-scenario simulation prediction of carbon storage based on FLUS-InVEST model: A case study of Chengdu-Deyang-Meishan-Ziyang area [J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 38-44.
- [10] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J]. 三峡生态环境监测, 2022, 7(2): 85-96.
- Wu Dan, Zhu Kangwen, Zhang Sheng, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing Economic Zone based on PLUS model and InVEST model [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2022, 7(2): 85-96.
- [11] 王超越, 郭先华, 郭莉, 等. 基于 FLUS-InVEST 的西北地区土地利用变化及其对碳储量的影响: 以呼包鄂榆城市群为例[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1667-1679.
- Wang Chaoyue, Guo Xianhua, Guo Li, et al. Land use change and its impact on carbon storage in Northwest China based on FLUS-invest: A case study of Hu-Bao-Er-Yu urban agglomeration [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(8): 1667-1679.
- [12] 杨宇萍, 胡文敏, 贾冠宇, 等. 基于 InVEST 与 ANN-CA 模型的环洞庭湖区土地利用碳储量情景模拟[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 175-184.
- Yang Yuping, Hu Wenmin, Jia Guanyu, et al. Scenario simulation integrating the ANN-CA model with the InVEST model to investigate land-based carbon storage in Dongting Lake area [J]. Journal of Nanjing Forestry

- University (Natural Science Edition), 2023, 47(4): 175-184.
- [13] 王成武, 罗俊杰, 唐鸿湖. 基于 InVEST 模型的太行山沿线地区生态系统碳储量时空分异驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 215-225.  
Wang Chengwu, Luo Junjie, Tang Honghu. Analysis on the driving force of spatial and temporal differentiation of carbon storage in the Taihang Mountains based on InVEST model [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(2): 215-225.
- [14] 卿苗, 赵军, 冯超, 等. 1980—2030 年石羊河流域生态系统碳储存服务对土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9525-9536.  
Qing Miao, Zhao Jun, Feng Chao, et al. Response of ecosystem carbon storage service to land-use change in Shiyang River Basin from 1980 to 2030 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9525-9536.
- [15] Ismaili Alaoui H, Chemchaoui A, El Asri B, et al. Modeling predictive changes of carbon storage using invest model in the Beht watershed (Morocco) [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2023, 9(4): 4313-4322.
- [16] 高述超, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3558-3570.  
Gao Shuchao, Chen Yiqing, Chen Zongzhu, et al. Carbon storage and its spatial distribution characteristics of forest ecosystems in Hainan Island, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3558-3570.
- [17] 韩旭超, 高丹丹, 李顺龙. 运用森林蓄积量换算因子法及灰色预测模型对黑龙江省森林增汇潜力的估测[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(10): 70-73.  
Han Xuchao, Gao Dandan, Li Shunlong. Forest carbon sequestration potential in Heilongjiang Province using forest stock conversion factor and gray prediction model [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(10): 70-73.
- [18] 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.  
Parjuk Usman Jiang, Ai Dong, Fang Yishu, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon storage in Kunming City based on InVEST and CA-Markov model [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 287-299.
- [19] 李小军, 车良革, 胡宝清. FLUS-InVEST 模型的北海市生态系统碳储量时空差异分析[J]. 测绘通报, 2023(6): 117-123.  
Li Xiaojun, Che Liange, Hu Baoqing. Spatio-temporal difference analysis of carbon storage in Beihai secosystem based on FLUS-InVEST models [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(6): 117-123.
- [20] Shaw C H, Hilger A B, Metsaranta J, et al. Evaluation of simulated estimates of forest ecosystem carbon stocks using ground plot data from Canada's National Forest Inventory [J]. Ecological Modelling, 2014, 272: 323-347.
- [21] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. 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.
- [22] Tian Lei, Tao Yu, Fu Wenxue, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2330.
- [23] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟: 以汉中市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 86-95.  
Yang Shuo, Su Hao, Zhao Guoping. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong City [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 86-95.
- [24] Basu T, Das A, Das K, et al. Urban expansion induced loss of natural vegetation cover and ecosystem service values: A scenario-based study in the Siliguri municipal corporation (Gateway of North-East India) [J]. Land Use Policy, 2023, 132: 106838.
- [25] Broadbent C D, Brookshire D S, Goodrich D, et al. Developing ecological endpoints for valuation of semi-arid riparian ecosystem services [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2023, 66(13): 2760-2777.
- [26] 罗笑, 卢鹏. 贵州省喀斯特区土地利用变化及驱动力分析[J]. 贵州林业科技, 2022, 50(4): 22-27.  
Luo Xiao, Lu Peng. Land use change and driving force in Karst area of Guizhou Province [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2022, 50(4): 22-27.
- [27] 魏媛, 吴长勇, 徐筑燕. 贵阳市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(2): 185-188.  
Wei Yuan, Wu Changyong, Xu Zhuyan. Effects of land use variations on ecosystem services value of Guiyang City [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(2): 185-188.
- [28] 张美琪, 陈波, 赵敏. 贵州省湿地碳储量与碳中和潜力分析[J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 315-326.

- Zhang Meiqi, Chen Bo, Zhao Min. Analysis of the carbon stock and carbon neutral potential of wetlands in Guizhou Province [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023,42(2):315-326.
- [29] 谭远模, 谢思梅, 谢荣安. 土地利用时空变化与城市化发展分析[J]. *测绘通报*, 2020(4):139-142.  
Tan Yuanmo, Xie Simei, Xie Rongan. Analysis of spatial and temporal change of land use and urbanization development [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(4):139-142.
- [30] 吴楠, 陈凝, 程鹏, 等. 安徽省陆地生态系统碳储量变化对未来土地覆被情景的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2023,32(2):415-426.  
Wu Nan, Chen Ning, Cheng Peng, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem responses to land cover change under five future scenarios in Anhui Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023,32(2):415-426.
- [31] 付帅, 彭雨欣, 徐炳先. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的鄱阳湖流域碳储量时空变化与预测[J]. *环境工程*, 2023,41(10):163-172.  
Fu Shuai, Peng Yuxin, XU Bingxia. Spatial-temporal change and prediction of carbon storage in Poyang Lake Basin based on PLUS and InVEST model [J]. *Environmental Engineering*, 2019,41(10):163-172.
- [32] 周伟婷. 基于土地利用变化的贵阳市碳排放时空演变和空间关联[J]. *湖北农业科学*, 2023,62(5):8-13.  
Zhou Weiting. Spatio-temporal evolution and spatial correlation of carbon emissions in Guiyang City based on land use change [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2023,62(5):8-13.
- [33] 唐璐, 李娟, 王丹丹, 等. 2010—2020 年贵阳市高质量发展与水资源保护利用的耦合协调关系[J]. *水土保持通报*, 2023,43(1):235-243.  
Tang Lu, Li Juan, Wang Dandan, et al. Coupling coordi-
- nation of high-quality development with water resource protection and utilization in Guiyang city during 2010—2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):235-243.
- [34] 景晓玮. 基于 InVEST 模型的贵州省生态系统服务计量及价值评估研究 [D]. 江苏 南京: 南京林业大学, 2021.  
Jing Xiaowei. Research on the measurement and value evaluation of ecosystem services in Guizhou Province based on InVEST model [D]. Jiangsu Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.
- [35] 陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析: 以贵州省为例 [J]. *生态学报*, 2022,42(17):6959-6972.  
Chen Tiantian, Huang Qiang, Wang Qiang. Differentiation characteristics and driving factors of ecosystem services relationships in Karst mountainous area based on geographic detector modeling: A case study of Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(17):6959-6972.
- [36] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 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, et al. 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.
- [37] 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 Jingyi, Wu Feng. 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.