

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.034.

李胡跃, 戴全厚, 胡泽银, 等. 黔中城市群生态系统服务价值评估及预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 248-257.

Li Huyue, Dai Quanhou, Hu Zeyin, et al. Evaluation and Prediction of Ecosystem Service Value in Urban Agglomeration of Central Guizhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 248-257.

# 黔中城市群生态系统服务价值评估及预测

李胡跃, 戴全厚, 胡泽银, 桂钰翔

(贵州大学 林学院, 贵阳 550025)

**摘 要:** [目的] 探究生态系统服务价值(ESV)对土地利用变化的响应, 提高黔中地区生态系统服务功能的可持续性。[方法] 以黔中城市群为例, 利用统计分析和空间自相关法评估了 2000—2020 年黔中城市群的土地利用变化及 ESV 时空演变特征, 并耦合 PLUS 模型预测了 2030 年不同发展情景下土地利用空间格局及其 ESV 变化。[结果] (1) 2000—2020 年研究区土地利用变化主要表现为耕地、草地向建设用地和水域转化, 受土地利用变化的影响, 2000—2020 年研究区 ESV 增加了 11.28 亿元, 呈波动上升趋势, 水域和建设用地面积扩张是引起研究区 ESV 变化的主要原因。(2) 2000—2020 年 ESV 减少区主要分布在经济发展较好的中心城区, 增加区主要分布在河流、湖泊等水域附近。空间自相关分析表明, 研究区高集聚区和低集聚区分布范围较广且集聚性较强, 高高集聚区主要集中在研究区西北部, 低低集聚区主要集中在研究区中部。(3) 2030 年自然情景、耕地保护和生态保护情景下的 ESV 分别为 710.22 亿元、705.33 亿元、720.62 亿元, 生态保护情景下对研究区 ESV 增长具有明显的积极作用。[结论] 未来黔中城市群在生态环境方面, 可继续加强退耕还林政策提高生态系统服务价值, 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:** 黔中城市群; 土地利用; PLUS 模型; ESV

**中图分类号:** X171.1; F301.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)04-0248-10

## Evaluation and Prediction of Ecosystem Service Value in Urban Agglomeration of Central Guizhou

Li Huyue, Dai Quanhou, Hu Zeyin, Gui Yuxiang

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

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the response of ecosystem service value (ESV) to land use change, and to improve the sustainability of ecosystem service function in central Guizhou. [Methods] In this study, urban agglomeration of central Guizhou was taken as an example. Statistical analysis and spatial autocorrelation method were used to assess the land use change and ESV spatial and temporal evolution characteristics of urban agglomeration of central Guizhou from 2000 to 2020, and the spatial pattern of land use and its ESV change under different development scenarios in 2030 was predicted by coupling with PLUS model. [Results] (1) The land use change in the study area from 2000 to 2020 was mainly manifested in the transformation of cropland and grassland to construction land and waters, and affected by the land use change, the ESV of the study area increased by 11.28 hundred million yuan from 2000 to 2020, showing a fluctuating upward trend, and the expansion of waters and construction land area was the main reason for the change of ESV in the study area. (2) The decrease area of ESV from 2000 to 2020 was mainly distributed in the center urban area with better economic development, and the increase area

收稿日期: 2023-09-15

修回日期: 2023-10-07

资助项目: 国家自然科学基金“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, 贵州毕节人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与生态恢复。E-mail: 3011221452@qq.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 陕西长武人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: qhdairiver@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

was mainly distributed near rivers, lakes and other waters. The spatial autocorrelation analysis showed that the high and low agglomeration areas in the study area were widely distributed and strongly clustered, with the high and high agglomeration areas mainly concentrated in the northwestern part of the study area and the low and low agglomeration areas mainly concentrated in the central part of the study area. (3) The ESV under the nature scenario, cropland protection and ecological protection scenarios in 2030 are 710.22 hundred million, 705.33 hundred million and 720.62 hundred million yuan, respectively, and the ecological protection scenario has an obvious positive effect on the growth of ESV in the study area. [Conclusion] In the future, the urban agglomeration of central Guizhou can continue to strengthen the policy of returning farmland to forests to improve the value of ecosystem services in terms of ecological environment, and it should formulate a more reasonable and comprehensive development strategy in terms of urban development, which can take into account ecological protection while the economy develops.

**Keywords:** urban agglomeration of central Guizhou; land use; PLUS model; ESV

生态系统服务是人类能从生态系统中获得的各种惠益<sup>[1]</sup>,1997年 Costanza 等<sup>[2]</sup>将生态系统服务类型划分为供给、调节、支持和文化4个大类。据2005年联合国千年生态系统服务评估报告中显示,随着社会经济的快速增长,人类活动对生态系统的破坏力日益加剧,全球范围内约有60%的生态系统服务正在持续衰减,这无疑给人类的生存环境带来了前所未有的挑战。过度开发、污染以及破坏生态环境等行为,导致大量物种濒危或灭绝,生物多样性急剧下降,栖息地丧失,生态平衡遭受严重破坏。同时,这些行为使得生态系统服务功能退化,不仅对人类的生存和发展产生深远影响,还制约着当地社会经济的可持续发展<sup>[3-4]</sup>。人类活动通过改变土地利用的原有属性,间接影响了生态系统服务价值(ESV),明晰ESV对土地利用变化的响应对提高区域环境治理和生态建设具有重要意义。

如何协调好生态环境与经济效益之间关系,提高区域内生态系统服务价值,是当下研究一个重要课题。谈旭等<sup>[6]</sup>基于伊犁河谷2000—2020年土地利用数据,探究了土地利用变化对生态系统服务价值的影响及其空间分异特征,严长安等<sup>[7]</sup>以滇池流域2010—2016年土地利用数据为基础,定量评估了滇池流域不同土地利用间转化对生态系统服务价值的影响;Promila等<sup>[8]</sup>研究了哈里亚纳西部地区1995—2015年土地退化对生态系统服务的影响,并探究了不同土地利用类型对ESV的贡献差异;Shrestha等<sup>[9]</sup>评估了1989—2019年加德满都谷地ESV的时空异质性,揭示了ESV减少的原因。然而以往的研究主要采用历史土地利用数据来估算ESV,对喀斯特地区典型山地城市群的未来土地利用模拟及其ESV预测研究则相对较少<sup>[10]</sup>。

土地利用模型的广泛应用为研究未来ESV变化提

供了新的思路<sup>[11-12]</sup>,牛潜等<sup>[13]</sup>通过建立灰色模型(Gm)模拟了2030年乌江流域ESV变化趋势,并预测了该地区ESV的空间分布;祁育汀等<sup>[14]</sup>运用系统动力学(SD)耦合混合元胞(MCCA)模型,揭示ESV对未来社会经济演变的响应;El-Hamid等<sup>[15]</sup>基于CA-Markov模拟了2031年埃及达米埃塔省土地利用格局变化对ESV影响;杨伟青等<sup>[16]</sup>利用GeoSOS-FLUS模型模拟了涪江流域不同情景下ESV演变特征。但以上几种预测模型并不能很好地挖掘土地利用内部变化机理,相对于以往预测模型,PLUS模型可以全面地挖掘各类土地利用诱因,并能精确模拟不同土地利用类型的时空变化特征<sup>[17]</sup>,已被国内外学者应用于未来土地利用动态评估<sup>[18-19]</sup>。黔中城市群是典型的喀斯特生态脆弱区,因其特殊的地质结构以及城市化的发展,给区域内生态系统造成了严重的压力。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,是黔中城市群未来可持续发展中亟需解决的关键性问题。

伴随着城市化进程的加速,城市群正逐渐成为连接国内外市场的关键纽带、并在促进区域经济增长中发挥着重要的作用。在此背景下,黔中城市群作为国家新明确的19个城市群之一,不仅肩负着推动贵州省经济社会发展的重任,并承担着引领整个西部地区高质量发展的历史使命<sup>[20]</sup>。城市化发展加快了土地利用类型的转化,使得经济发展与生态保护之间矛盾日益突出<sup>[21]</sup>,鉴于此,本研究利用黔中城市群2000—2020年的土地利用数据,基于修正的价值当量法构建历史时间序列下生态系统服务价值空间分布变化图,借助空间自相关分析探究县域尺度下生态系统服务价值空间聚集特征,并耦合PLUS模型预测2030年自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景下ESV对土地利用变化响应,以期对贵州省未来土地资源优化配置以及生态文明建设提供一定的理论支撑。

## 1 研究地区和数据来源

### 1.1 研究区概况

黔中城市群位于贵州省中部,经纬度坐标为 104.87°—108.20°E,25.43°—28.49°N。其范围包括贵阳市、遵义市、毕节市、安顺市、黔东南州、黔南州在内的 6 市 33 县区,总面积约为 5.38 万 km<sup>2</sup>,占贵州省土地面积的 30%<sup>[22]</sup>。该地区的平均温度为 10~20℃,平均海拔为 377~2 271 m。黔中城市群作为国家“十三五”规划中实施新型城镇化建设的重点区域,自 2017 年《黔中城市群发展规划》实施以来,共提出了 743 个重大工程,总投资 3.5 万亿元,预估到 2030 年将黔中城市群建设成山地特色新型城镇化先行区和绿色生态宜居城市。同时黔中地区矿产资源分布相对集中,工

业基础较好,是贵州省实施工业强省和提高城镇化发展的重要支撑。截至 2020 年末黔中城市群常住人口 1 870 万人,占全省的人口总数的 49.5%,地区生产总值为 10 028 亿元,占全省的 56.0%<sup>[23]</sup>。

### 1.2 数据来源

(1) 黔中城市群 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) 土地利用驱动因素包括气候环境数据和社会经济数据,总 12 个(表 1)。(3) 粮食数据(稻谷、小麦、大豆等单价、单产以及种植面积)来源于《贵州省统计年鉴》。所有数据均通过 ArcGIS10.2 中的双线性插值法重采样至 30 m 分辨率,各数据空间坐标系均为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48N。

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	数据来源
气候环境数据	DEM	30 m	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )
	坡度	30 m	DEM 数据提取
	降雨	1000 m	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
	气温	1000 m	中国科学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	1000 m	中国科学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 m	中国科学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	1000 m	中国科学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	1000 m	中国科学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 m	Worldpop( <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a> )
	到居民点的距离	1000 m	OpenSteeetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	到铁路的距离	1000 m	OpenSteeetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
	到公路的距离	1000 m	OpenSteeetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )

## 2 研究方法

### 2.1 基于当量子表计算 ESV

按照谢高地等<sup>[24]</sup>建立的中国生态系统服务单位面积ESV当量表,结合贵州省主要粮食作物的产量、种植面积和平均价格,计算出黔中城市群单位面积生态系统服务的经济价值,并通过校正价值当量表得到研究区各类土地利用单位面积生态系统服务价值(表 2)。

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (1)$$

$$ESV = VC_i \cdot E_a \quad (2)$$

式中: $E_a$ 为一单位生态系统服务经济价值(元/hm<sup>2</sup>); $m_i$ 为农作物单价(kg/元); $p_i$ 为农作物单产量(t/hm<sup>2</sup>); $q_i$ 为农作物种植面积(hm<sup>2</sup>); $M$ 为农作物种植面积(hm<sup>2</sup>); $VC_i$ 为第*i*类土地利用类型单位面积生态系统服

务价值(hm<sup>2</sup>/a);ESV为生态系统服务价值(元/a)。

### 2.2 空间自相关分析

空间自相关主要是用于检验要素的属性值与其相邻空间的属性值是否具有显著关联性,本研究在 GeoDa 空间自相关中引入 LISA 指数作为莫兰指数的局部形式,用以检验局部县域单元间的集聚、离散效应,并揭示局部县域单元间生态系统服务价值空间自相关程度<sup>[25]</sup>。

### 2.3 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的挖掘方法和基于多类型随机斑块种子的(CARS)模型,可用于预测未来土地利用景观的斑块演化<sup>[26]</sup>。通过提取两期土地利用类型数据,采用随机森林算法,根据不同土地利用类型间的转换矩阵以及邻域权重进行模拟预测。

表 2 黔中城市群不同土地利用类型单位面积 ESV

Table 2 ESV per unit area of different land use types in central Guizhou urban agglomeration							
类型	生态服务	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	860.20	232.76	232.76	662.86	—	10.12
	原料生产	404.80	546.48	344.08	369.38	—	30.36
	水源供给	20.24	283.36	192.28	5505.28	—	20.24
调节服务	气体调节	678.04	1781.12	1224.52	1351.02	—	111.32
	气候调节	364.32	5333.24	3228.28	2980.34	—	101.20
	净化环境	101.20	1588.84	1062.60	4629.90	—	313.72
	水文调节	273.24	3855.72	2368.08	63993.80	—	212.52
支持服务	土壤保持	1042.30	2165.68	1487.64	1639.44	—	131.56
	养分维持	121.44	161.92	111.32	126.50	—	10.12
	生物多样性	131.56	1973.40	1356.08	5272.52	—	151.80
文化服务	美学景观	60.72	870.32	597.08	3349.72	—	50.60
总计		4058.06	18792.84	12204.72	89880.76	—	1143.56

注:“—”表示未发现,下表同。

2.4 情景模拟设置

(1) 自然发展情景:以经济发展为主要目的,按照 2010—2020 年转移概率模拟 2030 年土地利用空间分布格局。(2) 耕地保护情景:以保护区域内农业生产为目的,设定耕地转出为林地和草地概率减少 20%,转出为建设用地概率减少 50%,除未利用地和水域外,其他土地利用转出为耕地的概率增加 20%。(3) 生态保护情景:以生态文明建设为目的,限制建设用地扩张,设定耕地、林地和草地转出为建设用地概率减少 50%,耕地、草地转出为林地概率增加 20%,林地转出为耕地和草地概率减少 20%<sup>[27]</sup>。

2.5 敏感性分析

本研究采用邻域弹性系数计算 ESV 的敏感性指数,以此来检验研究结果的可靠性,通过将生态价值系数上下调动 50%,确定生态系统服务价值随时间的变化对于生态价值系数的依赖程度。当  $C_s > 1$ ,表示研究结果富有弹性;当  $C_s < 1$ ,表明研究结果缺乏弹性,结果可信<sup>[28]</sup>。

$$C_s = \frac{(ESV_a - ESV_b) / ESV_a}{(VC_a - VC_b) / VC_b}$$

(3)

式中: $C_s$  为敏感性系数; $ESV_a$  和  $ESV_b$  为调整前后 ESV; $VC_a$  和  $VC_b$  为调整前后 ESV 价值当量系数。

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年黔中城市群土地利用时空变化

由表 3 可知,黔中城市群占地面积为 53 781 km<sup>2</sup>,土地利用类型以耕地和林地为主(图 1),2000 年、2010 年和 2020 年两种土地利用类型面积占比分别为 81.53%,82.68%,80.11%。2000—2020 年黔中城市群耕地面积减少了 692 km<sup>2</sup>;面积占比减少了 0.94%,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 474 km<sup>2</sup>;面积占比减少了 0.89%,水域面积增加了 236 km<sup>2</sup>;面积占比增加了 0.44%,伴随着城市化的发展,建设用地面积锐增了 1 005 km<sup>2</sup>;面积占比增加了 1.87%,贵阳市区作为研究区经济中心且地形较为平坦、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。整体上黔中城市群土地利用变化表现为耕地和草地面积减少,水域和建设用地面积增加,其原因主要是社会经济的发展以及退耕还林政策和水利工程的有效实施。

表 3 2000—2020 年黔中城市群土地利用面积变化

Table 3 Change of Land Use Area in Central Guizhou 2000—2020						
土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
耕地	17680	32.87	17626	32.77	16988	31.59
林地	26169	48.66	26842	49.91	26096	48.52
草地	9345	17.38	8495	15.80	8871	16.49
水域	210	0.39	283	0.53	446	0.83
建设用地	362	0.67	521	0.97	1367	2.54
未利用地	15	0.02	14	0.02	13	0.02

3.2 2000—2020 年黔中城市群 ESV 时空变化

由表 4 可知,2000 年、2010 年和 2020 年黔中城市群 ESV 分别为 696.45 亿元、705.11 亿元、707.73 亿元,整体呈波动上升趋势。2000—2020 年,研究区耕地和草地 ESV 明显降低,耕地减少了 2.81 亿元,减幅为 3.92%,草地 ESV 减少了 5.79 亿元,减幅为 5.08%,水域 ESV 增幅较大,增加了 21.25 亿元,增幅为 112.73%,林地 ESV 占比较高,但在研究期间整体上基本保持稳定,未利用地由于面积较小,对整体 ESV 影响不大。综上所述,在黔中地区城市化发展进程中,对 ESV 贡献度低



的建设用地扩张虽然对耕地、草地等 ESV 贡献度高的生态用地造成了一定影响,但很大程度上依然注重保护研究区的生态安全。由于黔中地区水资源利用率较低,研究期间贵州省政府兴修水利工程用以解决

黔中地区用水问题,伴随着夹岩水利枢纽工程、黔中枢纽水利工程的竣工,黔中城市群水域面积得到进一步扩张,水域作为单位面积 ESV 贡献最高的生态用地,水域面积的扩张使得研究区整体 ESV 上升。

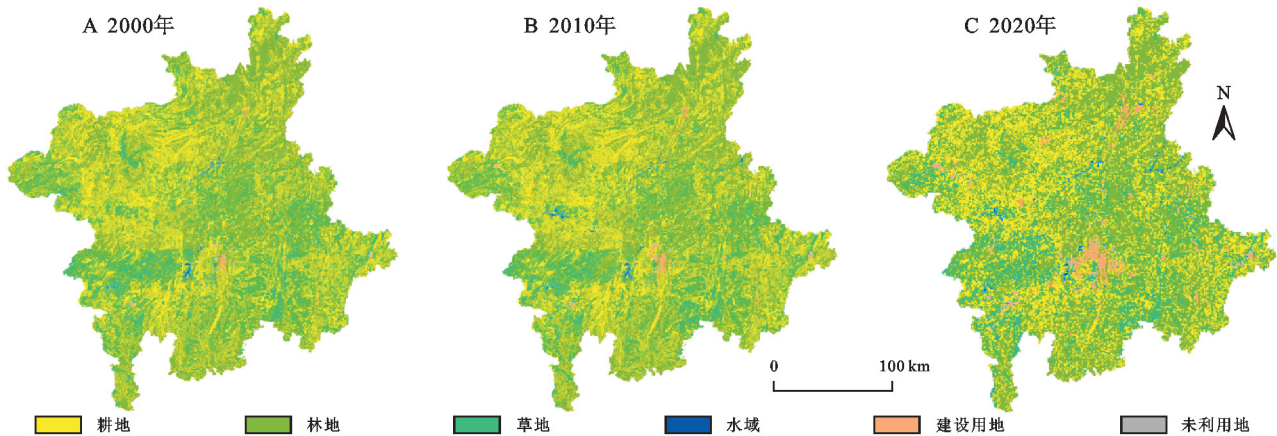


图 1 2000—2020 年黔中城市群土地利用空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land use in central Guizhou city group from 2000—2020

表 4 2000—2020 年黔中城市群 ESV 变化  
Table 4 ESV changes in central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2020

土地利用 类型	ESV			2000—2020 年 ESV 变化
	2000	2010	2020	
耕地	71.75	71.53	68.94	−2.81
林地	491.78	504.43	490.41	−0.37
草地	114.06	103.67	108.27	−5.79
水域	18.85	25.47	40.10	21.25
建设用地	0	0	0	0
未利用地	0.0173	0.0158	0.0147	0.0026
总计	696.45	705.11	707.73	11.28

在 ArcGIS 10.2 中利用差值分析和重分类法得到研究区 2000—2020 年 ESV 空间分布和变化图(图

2—3)。从空间分布上来看,黔中城市群 ESV 呈现“中间低南北高”分布格局,研究期间黔中城市群 ESV 减少区和增加区在空间上不断扩大,减少区主要分布在经济发展较好的贵阳市、毕节市、遵义市和黔南州的中心城区,并随着城市化的发展逐渐向外扩张。增加区主要零散分布在研究区河流、湖泊等水域附近,而无变化区在不同时间段内面积占比分别为 95.74%,91.13%,87.99%,呈波动下降的趋势。受人类活动的影响,研究期间 ESV 减少区和增加区扩张的主要原因是由于耕地和草地转化为建设用地和水域。贵州是典型的喀斯特区域,其农业发展虽然相对落后,但农业作为立国之本,黔中城市群在未来的国土资源规划中需协调好耕地与其他生态用地间的转化,最大程度地保障农业生产。

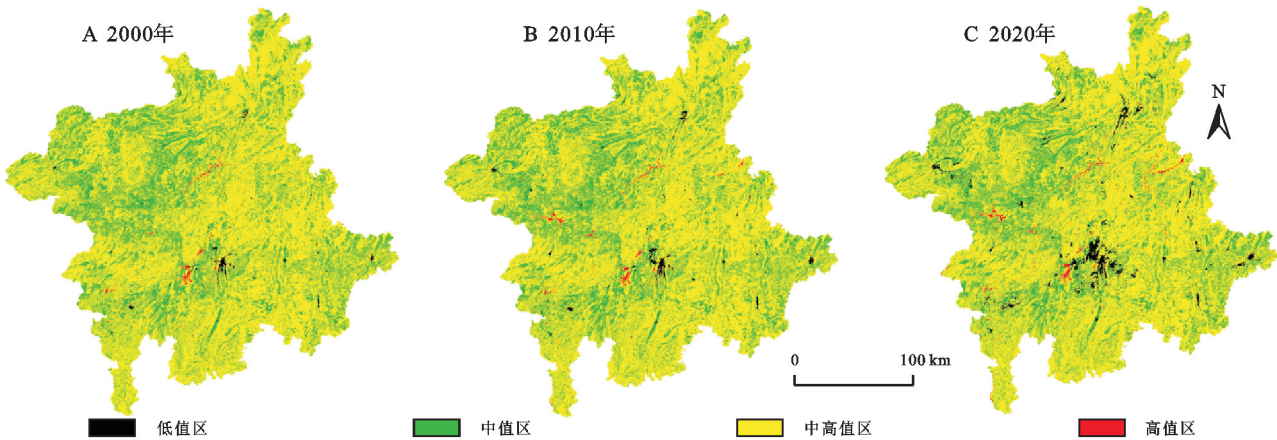


图 2 2000—2020 年黔中城市群 ESV 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ESV in central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2020

3.3 空间自相关分析

在 GeoDa 软件中利用空间自相关分析了研究区

2000—2020 年 ESV,研究结果表明 2000—2020 年 ESV 莫兰指数分别为 0.427,0.434,0.442,呈现显著的正相关

性,在空间上将研究区生态系统服务价值按照聚类位置划分为 4 种不同的类型(不显著、高一高集聚、低—高集聚和低—低集聚)。从空间分布上来看(图 4),2000—2020 年高一高集聚区主要分布在研究区西北部七星关区、大方县、金沙县和黔西县,高一高集聚区内森林覆盖度高,所能提供的 ESV 多;低—低集聚区主要分布在贵阳市南明区、云岩区、观山湖区、花溪区、白云

区、乌当区以及清镇市,低—低集聚区属于中心城区,城市化发展迅速,建设用地扩张明显,所能提供的 ESV 较少;低—高集聚区主要分布在遵义市的花岗区,该地区各类生态用地转化相对较为稳定。总体而言,黔中城市群 ESV 在空间上存在明显的差异性。研究区西北部地区是提供 ESV 的重点区域,而研究区中部成为黔中城市化发展的“前线阵地”。

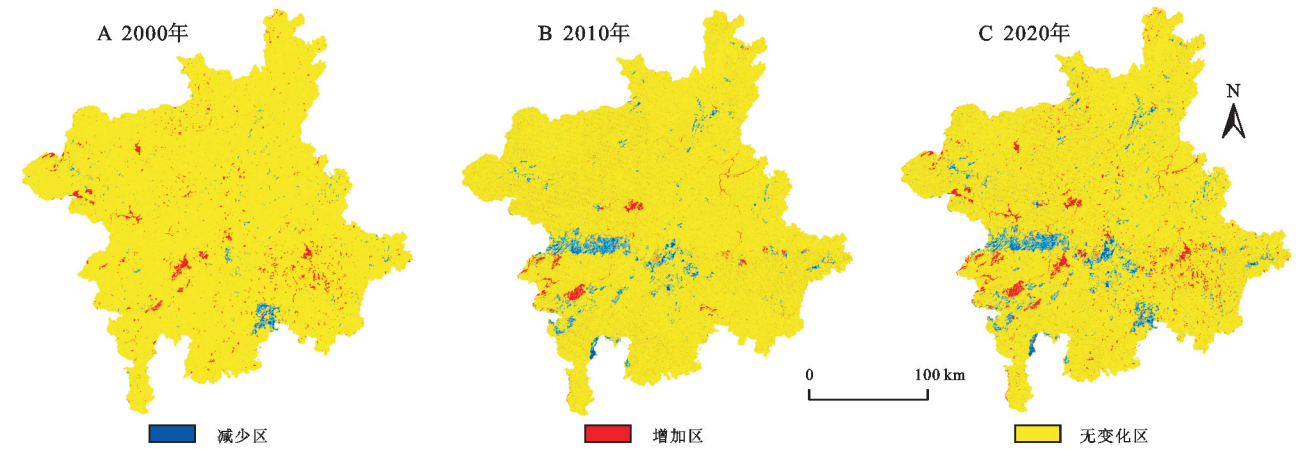


图 3 2000—2020 年黔中城市群 ESV 空间变化

Fig. 3 Spatial change of ESV in central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2020

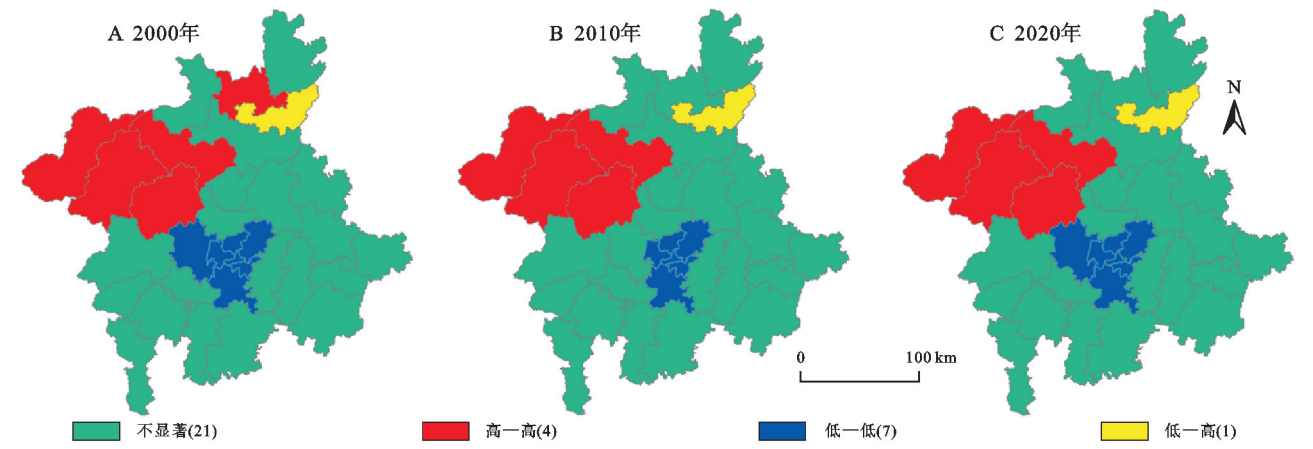


图 4 2000—2020 年黔中城市群 ESV 空间局部自相关

Fig.4 ESV spatial local autocorrelation in central Guizhou urban agglomeration from 2000 to 2020

3.4 2030 年不同情景下黔中城市群土地利用变化及 ESV 变化特征

3.4.1 不同发展情景下黔中城市群土地利用模拟以 2020 年为基准年,在 PLUS 1.4.0 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特征(图 5)。从图 5 可以看出,从空间分布上来看,2030 年不同发展情景下建设用地面积锐增明显,并以贵阳市、毕节市和遵义市主城区为中心不断向外扩张。由表 5 可知,与 2020 基准年相比,2030 年自然发展情景下研究区耕地面积减少了 550 km<sup>2</sup>,林地面积减少了 635 km<sup>2</sup>,草地面积增加了 284 km<sup>2</sup>,建设用地锐增了 754 km<sup>2</sup>。耕地保护情景下研究区耕地面积增加了 164 km<sup>2</sup>,林地面积

减少了 965 km<sup>2</sup>,草地面积增加了 153 km<sup>2</sup>,建设用地增加了 504 km<sup>2</sup>。生态保护情景下耕地面积减少了 639 km<sup>2</sup>,林地面积增加了 51 km<sup>2</sup>,草地面积增加了 110 km<sup>2</sup>,建设用地增加了 331 km<sup>2</sup>。与自然发展和耕地保护情景相比,生态保护情景下建设用地扩张速度受到明显抑制,使得林地得到很好的保护。3.4.2 不同发展情景下黔中城市群 ESV 变化特征由表 6 可知,2030 年研究区自然情景、耕地保护和生态保护情景下的 ESV 分别为 710.22 亿元、705.33 亿元、720.62 亿元,与 2020 年基准年相比,耕地保护情景下 ESV 下降了 2.4 亿元,自然情景和生态保护情景下 ESV 分别增加了 2.49 亿和 12.89 亿元。从空间分布上来看(图 6),2030 年不同情景下 ESV 在空间



分布上差异并不大,2030 年随着建设用地的持续扩张,低值区在不断侵占中值区和中高值区。3 种不同情景下耕地和草地 ESV 变化不明显,而水域作为限制转化区域在 3 种情景下 ESV 均增加了 13.20 亿元。2030 年引起研究区不同情景下 ESV 差异的主

要原因是林地 ESV,自然情景和耕地保护情景下相对于生态保护情景下林地 ESV 分别下降了 12.89 亿元、19.08 亿元,从而导致整体 ESV 低于生态保护情景。综上所述,2030 年在生态保护情景下更有利于研究区 ESV 的增加。

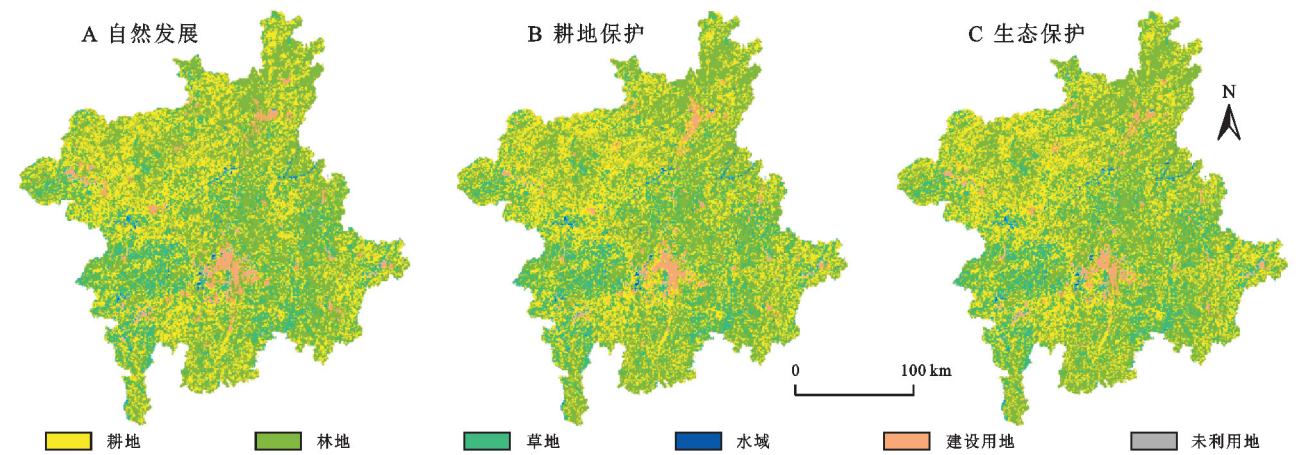


图 5 2030 年不同发展情景下黔中城市群土地利用空间分布

Fig.5 Spatial distribution of land use in central Guizhou urban agglomeration under different development scenarios in 2030

表 5 2030 年不同发展情景下土地利用面积

Table 5 Land use area under different development scenarios in 2030

	scenarios in 2030						km <sup>2</sup>
情景模式	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2020 年	16988	26096	8871	446	1367	13	
自然情景	16438	25461	9155	593	2121	13	
耕地保护	17152	25131	9024	593	1868	13	
生态保护	16349	26147	8981	593	1698	13	

3.5 敏感性分析

通过将各类用地的生态系统服务价值系数±50%，对黔中城市群历史和未来时间序列下的 ESV 进行敏感性检验。经检验不同时间序列下敏感性指数均小于 1(表 7),说明调整后系数稳定,缺乏弹性,结果可信。林地作为黔中城市群主要的用地类型,敏感性在 2000—2030 年间均为最高。

表 6 2030 年不同发展情景下黔中城市群 ESV 变化

Table 6 ESV changes in central Guizhou urban agglomeration under different development scenarios in 2030 亿元

情景设置	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2020 年	68.94	490.41	108.27	40.10	0	0.0147	707.73
自然发展	66.71	478.47	111.73	53.30	0	0.0147	710.22
耕地保护	69.60	472.28	110.14	53.30	0	0.0147	705.33
生态保护	66.35	491.36	109.60	53.30	0	0.0147	720.62

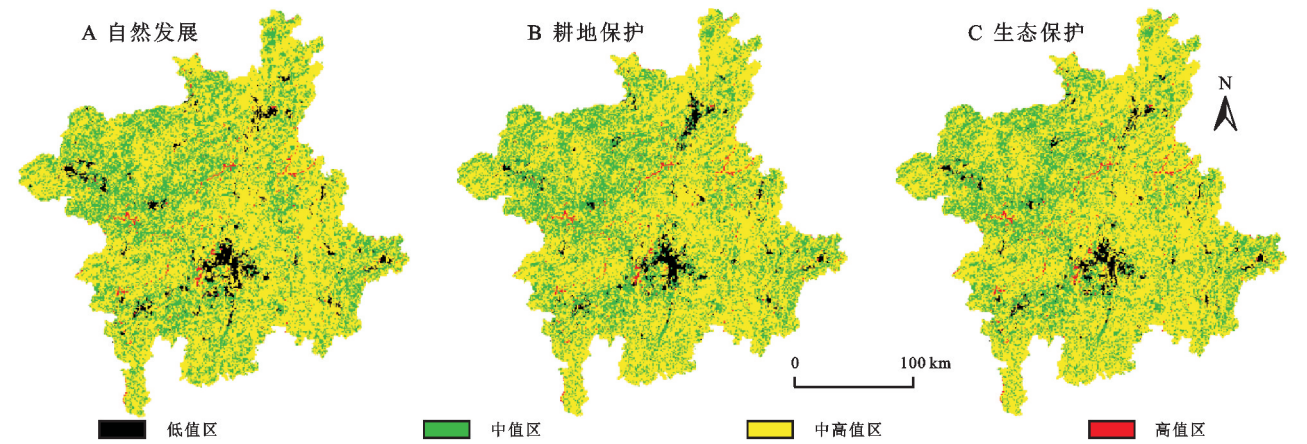


图 6 2030 年不同发展情景下黔中城市群 ESV 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of ESV of ecosystem service value in central Guizhou urban agglomeration next year under different development scenarios in 2030

表 7 黔中城市群各地类 ESV 敏感性检验

Table 7 Class ESV sensitivity tests in central Guizhou urban agglomeration

土地类型	2000 年	2010 年	2020 年	自然情景	耕地情景	生态情景
耕地	0.1030	0.1014	0.0974	0.0939	0.0987	0.0921
林地	0.7061	0.7154	0.6929	0.6737	0.6696	0.6819
草地	0.1638	0.1470	0.1530	0.1573	0.1562	0.1521
水域	0.0271	0.0361	0.0567	0.0750	0.0756	0.0740
建设用地	—	—	—	—	—	—
未利用地	2.4840E-0.5	2.2408 E-0.5	2.0771E-0.5	2.0698E-0.5	2.0841E-0.5	2.0399E-0.5

4 讨论

本研究以典型喀斯特山地城市群为研究对象,分析了黔中城市群在历史和未来时间序列下土地利用变化状况,并评估了其 ESV 变化特征。研究结果表明 2000—2020 年黔中城市群 ESV 呈现上升趋势,在西部大开发的背景下人类活动和城市化发展虽然给研究区生态系统造成了一定的负面影响,但由于黔中城市群独特的地理位置,自“十一五”规划以来贵州省首个大型黔中水利枢纽工程成功将乌江三岔河水引入贵阳市,不仅解决了黔中地区用水问题,也使得整个黔中城市群 ESV 得到提高。随着经济发展的深入,建设用地不断侵占其他生态用地,2010—2020 年 ESV 增长速度逐渐缓慢,未来应增强对耕地、草地等 ESV 贡献较高的生态用地保护,不可一味地让建设用地无序扩张,同时也应该提高区域内土地集约利用水平和生态保护工作。2030 年自然保护情景下延续了 2010—2020 年 ESV 变化特征,呈现缓慢上升趋势;耕地保护情景下保护农业生产,一定程度上却降低了生态效益,整体 ESV 相比基准年在下降;生态保护情景下建设用地扩张速度明显减缓,比自然发展情景和耕地保护情景下分别少了 423,170 km<sup>2</sup>,而林地面积却增加了 686,1 016 km<sup>2</sup>,使得生态保护情景下 ESV 远大于比其余两种发展情景。张晓瑶<sup>[29]</sup>、姜栋栋<sup>[30]</sup>等对未来不同情景下 ESV 研究发现,生态保护情景下更利于区域 ESV 增长,与本研究结果相符,在生态保护情景下可以有效解决城市化发展导致的生态环境问题,且与现行政策和可持续发展理念相符。

本研究对生态系统服务评估方法采用的是价值当量法,在计算研究区生态服务经济价值时,主要以过去贵州省主要粮食作物的产量、种植面积平均价格为基准,在预测未来 ESV 可能会存在一定的差异,但估算结果仍能反映出 ESV 对土地利用变化的大体趋势,对研究区未来国土空间规划以及生态保护具有一定的参考价值。此外在修正耕地生态服务价值量系数时主要采用的是水田、旱地。撂荒地也是一种耕地类型,其所能提供的 ESV 是否与农耕地相差不大,

当下贵州省内进行撂荒地复耕对研究计算的耕地 ESV 会产生什么影响,这在未来研究中有待商榷。本研究在 PLUS 模型中选取土地利用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。

5 结论

- (1) 2000—2020 年研究区土地利用变化主要表现为耕地、草地向建设用地和水域转化,受土地利用变化的影响 2000—2020 年研究区 ESV 增加了 11.28 亿元,呈波动上升趋势,水域扩张是引起研究区 ESV 变化的主要原因。
- (2) 2000—2020 年 ESV 在空间上呈现“中间低南北高”的分布格局,ESV 减少区主要分布在经济发展较好的城市中心,增加区主要分布在河流、湖泊等水域附近。空间自相关分析表明研究区高集聚区和低集聚区分布范围较广且集聚性较强,高一高集聚区主要集中在研究区西北部,低—低集聚区主要集中在研究区中部。
- (3) 2030 年自然情景、耕地保护和生态保护情景下的 ESV 分别为 710.22 亿元、705.33 亿元、720.62 亿元,生态保护情景下对研究区 ESV 增长具有明显的积极作用。

参考文献 (References):

[1] 谢高地,肖玉,鲁春霞.生态系统服务研究:进展、局限和基本范式[J].植物生态学报,2006,30(2):191-199.  
Xie G D, Xiao Y, Lu C X. Study on ecosystem services: Progress, limitation and basic paradigm[J]. Journal of Plant Ecology, 2006,30(2):191-199.

[2] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387:253-260.

[3] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].地理学报,2019,74(3):446-459.  
Zhu W B, Zhang J J, Cui Y P, et al. Assessment of terri-



- torial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 446-459.
- [4] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [5] 孔琳, 苏世伟. 基于土地利用的杭州市生态系统服务价值时空动态[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(11): 1539-1545.
- Kong L, Su S W. Spatiotemporal variation of ecosystem service value in Hangzhou based on land use[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, 44(11): 1539-1545.
- [6] 谈旭, 王承武. 伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2747-2756.
- Tan X, Wang C W. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value in Ili Valley and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2747-2756.
- [7] 严长安, 杨汝兰, 付潇华, 等. 土地利用变化对滇池流域生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(15): 6194-6202.
- Yan C A, Yang R L, Fu X H, et al. Impact of land-use change on ecosystem services value in Dianchi Lake Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6194-6202.
- [8] Promila, Mothi Kumar K E, Sharma P. Assessment of ecosystem service value variation over the changing patterns of land degradation and land use/land cover[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(1): 54.
- [9] Shrestha S, Poudyal K N, Bhattarai N, et al. An assessment of the impact of land use and land cover change on the degradation of ecosystem service values in kathmandu valley using remote sensing and GIS[J]. *Sustainability*, 2022, 14(23): 15739.
- [10] 周寒冰, 王志泰, 王志杰, 等. 喀斯特山地城市生态系统服务价值地形梯度响应: 以贵阳市中心城区为例[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 337-347.
- Zhou H B, Wang Z T, Wang Z J, et al. Response of ecosystem service value of Karst mountainous city to terrain gradient: A case study of downtown of Guiyang City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 337-347.
- [11] 刘家福, 席兰兰, 张尧, 等. 基于 CA-Markov 与 InVEST 模型的吉林省生态系统服务价值模拟及预测[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 153-159, 329-330.
- Liu J F, Xi L L, Zhang Y, et al. A study on simulation and prediction of ecosystem service value in Jilin Province based on CA-Markov and InVEST model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 153-159, 329-330.
- [12] Hakim A M Y, Baja S, Rampisela D A, et al. Quantifying future environmental carrying capacity based on land use/land cover data and ecosystem services valuation: A case study in Makassar City, Indonesia[J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2022, 79(4): 686-697.
- [13] 牛潜, 周旭, 许幼霞, 等. 基于土地利用的贵州省乌江流域生态系统服务价值演变分析[J]. *生态科学*, 2018, 37(5): 165-173.
- Niu Q, Zhou X, Xu Y X, et al. Analysis of ecosystem service value evolution of Wujiang River Basin of Guizhou Province based on land use[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(5): 165-173.
- [14] 祁育汀, 张平, 刘雷, 等. 关中平原城市群土地利用结构多情景优化和生态系统服务价值预测[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2507-2517.
- Qi Y T, Zhang P, Liu L, et al. Multi-scenario optimization of land use structure and prediction of ecosystem service value in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9): 2507-2517.
- [15] El-Hamid H T A, Nour-Eldin H, Rebouh N Y, et al. Past and future changes of land use/land cover and the potential impact on ecosystem services value of Damietta governorate, Egypt[J]. *Land*, 2022, 11(12): 2169.
- [16] 杨伟青, 张会兰. 基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 253-262.
- Yang W Q, Zhang H L. Ecosystem service value assessment and multi-scenario simulation of Fujiang River Basin based on GeoSOS-FLUS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 253-262.
- [17] Liang X, Guan Q F, 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.
- [18] Tian L, Tao Y, Fu W X, 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 王媛, 周长威. 黔中城市群景观生态安全格局构建[J].

- 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1111-1117.
- Wang Y, Zhou C W. Landscape ecological security pattern in central Guizhou urban agglomeration [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(9): 1111-1117.
- [22] 王志杰, 代磊. 黔中喀斯特山地城市土地利用/覆被变化及其生态效应评价: 以贵阳市花溪区为例 [J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3429-3440.
- Wang Z J, Dai L. Assessment of land use/cover changes and its ecological effect in Karst mountainous cities in central Guizhou Province: Taking Huaxi District of Guiyang City as a case [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3429-3440.
- [23] 周长威, 陈祁蔚. 黔中城市群生态旅游资源开发适宜性评价 [J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2022, 37(1): 109-117.
- Zhou C W, Chen Q W. Suitability evaluation of ecotourism resources development in central Guizhou urban agglomeration [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2022, 37(1): 109-117.
- [24] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [25] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究 [J]. 地理科学, 2005, 25(4): 393-400.
- Meng B, Wang J F, Zhang W Z, et al. Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 393-400.
- [26] 赵霖雨, 崔柳, 王佳, 等. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究: 以湛江市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320.
- Zhao J Y, Cui L, Wang J, et al. Multi-scenario simulation of urban green space development and construction Timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6307-6320.
- [27] 丁星明, 朱诗渊. 赣州不同情景土地利用变化对生态系统服务价值影响 [J]. 北京测绘, 2023, 37(3): 415-419.
- Ding X M, Zhu S Y. Impact of land use change on ecosystem service value in different scenarios [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2023, 37(3): 415-419.
- [28] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337.
- Chen W X, Li J F, Zhu L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the middle Yangtze River Region [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 325-337.
- [29] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟: 以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2086-2097.
- Zhang X Y, Zhang X, Li D H, et al. Multi-scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2086-2097.
- [30] 姜栋栋, 杨帆, 马伟波, 等. 大娄山区生态系统服务价值变化与情景预测 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(7): 1670-1680.
- Jiang D D, Yang F, Ma W B, et al. Evolution and scenario prediction of ecosystem service value in dalou mountain area [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(7): 1670-1680.

(上接第 247 页)

- [26] 刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 等. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(2): 408-420.
- Liu Y S, Yang Z S, Huang Y H, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949 [J]. Scientia Sinica: Terrae, 2019, 49(2): 408-420.
- [27] 王万忠, 焦菊英, 魏艳红, 等. 近半个世纪以来黄土高原侵蚀产沙的时空分异特征 [J]. 泥沙研究, 2015(2): 9-16.
- Wang W Z, Jiao J Y, Wei Y H, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics of erosion sediment yield on the Loess Plateau during the recent half century [J]. Journal of Sediment Research, 2015(2): 9-16.
- [28] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 等. 黄土高原生态恢复程度及恢复潜力评估 [J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 779-794.
- Niu L N, Shao Q Q, Ning J, et al. Evaluation on the degree and potential of ecological restoration in Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(3): 779-794.
- [29] 任洪玉, 杜俊, 丁文峰, 等. 基于 GIS 的全国山洪灾害风险评估 [J]. 灾害学, 2018, 33(4): 86-92.
- Ren H Y, Du J, Ding W F, et al. Risk assessment of mountain torrents disaster in China based on GIS [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 86-92.