

李月, 冯霞, 吴路华. 1973—2030年普定县土地利用动态模拟及生态系统服务价值响应[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 555-571.  
DOI: 10.11932/karst2024y036

# 1973—2030年普定县土地利用动态模拟及 生态系统服务价值响应

李月<sup>1</sup>, 冯霞<sup>1</sup>, 吴路华<sup>2</sup>

(1. 贵州财经大学公共管理学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 铜仁学院  
经济管理学院, 贵州 铜仁 554300)

**摘要:** 揭示并预测岩溶山区在不同情景下土地利用变化对生态系统服务价值(ESV)的影响, 对于维护区域生态安全、提升ESV以及制定生态保护与修复政策至关重要。文章以西南典型岩溶山区——贵州省普定县为研究对象, 基于1973年、1989年、2003年、2010年和2020年5期土地利用数据, 采用当量因子法评估各历史时期的ESV, 并运用PLUS模型模拟2030年自然演变、生态保护和经济发展3种情景下的土地利用与ESV变化情况。结果表明: (1) 过去50年间, 普定县耕地面积减少25.08%, 林地和建设用地面积显著增加; ESV经历了“先降后升”的过程, 1989年降至最低(22.38亿元); (2) 2030年, 3种情景下耕地、草地和未利用地面积均有所下降, 建设用地面积在中部地区呈现“点一面”式扩张; (3) 3种情景下的ESV总量分别高出2020年1.29亿元、2.66亿元和0.88亿元, 其中生态保护情景下最高(37.75亿元), 经济发展情景下最低(35.97亿元); (4) ESV在空间分布上呈现“东、西部高, 中部低”的格局, 且各用地类型ESV均通过敏感性检验, 结果具有较高的可信度。

**关键词:** 岩溶山区; 土地利用变化; 生态系统服务价值; 多情景模拟; PLUS模型; 普定县

**创新点:** 基于1973—2020年长时间序列的土地利用数据, 通过本地化修正的当量因子法测算贵州省普定县近50年的生态系统服务价值(ESV), 采用PLUS模型模拟多情景下岩溶山区未来土地利用变化, 量化并阐明ESV时空演变态势。

中图分类号: F301.2; X171.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)03-0555-17

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

生态系统服务是指人类在生态系统的结构和功能中直接或间接地获取用于维持生活和生存所需的惠益<sup>[1-2]</sup>, 是连接人类活动与生态系统之间的重要纽带。近年来, 由于受到人类过度活动的强烈干扰, 生态系统中60%的功能正在或者已经退化, 可能导致土地利用的失衡, 致使调节、供给和文化等方面的生

态系统服务价值(Ecosystem Services Values, ESV)出现损失, 还会影响土地利用效益以及社会可持续发展<sup>[3]</sup>。因此, 深入分析ESV对土地利用变化的响应情况, 且对未来土地利用的变化趋势进行模拟和预测, 可为了解区域资源利用现状、保护区域生物多样性和维护生态系统结构稳定性提供科学依据。

土地利用变化是生态环境变化研究的重要内容, 与生态系统服务之间存在复杂的相互影响、相互制

基金项目: 国家自然科学基金项目(42401358); 教育部人文社科项目(24XJJCZH007); 贵州省科技厅基础研究计划(自然科学)面上项目(黔科合基础-zk[2025]面上223); 贵州省水利科技项目(KT202438)

第一作者简介: 李月(1991—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态恢复与土地变化科学。E-mail: liyue@mail.gufe.edu.cn。

收稿日期: 2024-05-11

约关系,土地利用类型的改变将会影响生态系统原有结构,进而导致生态系统产品、服务和价值发生变动<sup>[4]</sup>。近年来,众多学者围绕土地利用变化对ESV的影响积累了大量的研究成果。1997年, Costanza等<sup>[5]</sup>编制了全球生态系统服务当量因子表,为后续的研究奠定了坚实的基础;随后,谢高地等<sup>[6]</sup>进一步研究制订了适合国内ESV研究的当量因子表,并被广泛用于相关的评估研究中。后续研究工作主要集中于生态系统服务与景观风险协同关系、土地利用变化对生态系统服务价值响应等方面<sup>[7-8]</sup>;研究尺度多侧重于沿海城市<sup>[9]</sup>、流域<sup>[10]</sup>和城市群<sup>[11]</sup>等;在研究方法上,主要采用价值当量估算法<sup>[12]</sup>和主成分分析法<sup>[13]</sup>等手段,大部分研究主要聚焦剖析过去或当前土地利用状态变动所引发ESV的变化情况。然而,随着研究持续深入,一些学者开始探索土地利用变化对未来区域生态系统服务价值的潜在影响,旨在为制定可持续的土地利用政策提供科学依据。例如, Liang等<sup>[14]</sup>通过将PLUS模型与多目标规划结合,预测了武汉市2035年不同情景下的土地利用结构; Egoh等<sup>[15]</sup>运用Marxan模型对不同情境下南非草地的生态系统服务状况进行了模拟分析;李何英等<sup>[16]</sup>运用修正后的PLSR-FLUS-MarKov模型探究了漓江流域2030年多情景下土地利用变化对ESV的影响情况;曲艺等<sup>[17]</sup>利用PLUS模型对新疆自然发展情景、经济发展情景、生态优先情景和可持续发展情景4种情景下的土地利用需求及空间分布进行预测模拟,并采用价值当量法测算其未来情景下的ESV。

虽然,目前关于ESV模拟预测的研究已取得丰硕成果,但仍存在一些局限:研究区实证方面,大多数研究集中在非岩溶山区,主要针对城市、流域等特定尺度,缺乏对中国生态系统脆弱敏感、经济发展相

对滞后且人地矛盾较突出的岩溶山区的关注,特别是,在县域尺度下对土地利用变化预测及其对ESV影响的研究更是鲜见报道,未能连续追踪长时间序列下土地利用变化对区域ESV的时空差异性,难以为区域人地供需状态及未来生态系统可持续发展提供理论参考;研究方法方面,目前学者普遍采用全国性的当量因子法进行ESV的评估,评估结果便于横向比较,但它在一定程度上忽略了地区间的差异性,可能导致评估结果与研究区的实际情况产生偏差,因此,亟需采用本地化修正方法,以更准确反映研究区域的特定条件和需求。

普定县地处中国西南岩溶山区,近年来,随着城镇化进程的加快,面临生态移民的迁入,人口增长、人类活动强度加剧,社会经济快速发展等多重压力,加之岩溶山区的“二元三维”地质结构特征突出、空间分层异质性显著以及生态环境本底脆弱<sup>[18]</sup>,造成区域水土流失、人地矛盾突出、生态退化等问题日益凸显,这已成为限制其区域生态系统服务和经济可持续发展的关键因素。鉴于此,本研究基于普定县1973—2020年土地利用数据,通过本地化修正的当量因子法测算该县近50年的ESV,采用PLUS模型对多种情景下的土地利用模式进行模拟,量化并阐明ESV的时空动态演变趋势,以评估不同发展模式对地区生态和社会经济状况的影响,以期为普定县生态系统服务功能的提升以及未来土地资源管理和生态保护策略的制订提供数据支持和科学依据。

## 1 研究区概况

普定县位于贵州省中部偏西(图1),总面积1091 km<sup>2</sup>,属于亚热带季风湿润气候,年均降水量1378.2

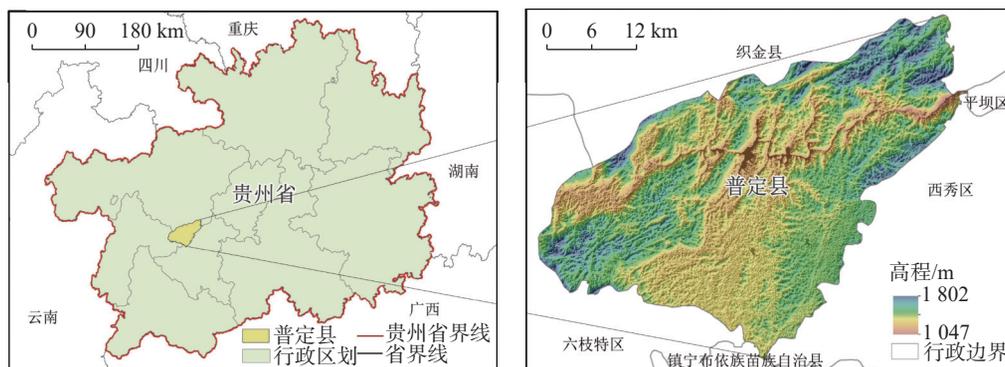


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

mm, 年均气温 15.1 ℃。截至 2021 年, 普定县常住人口为 37.63 万人, 城镇人口为 14.49 万人, 常住人口城镇化率为 38.51%; 全年全县完成地区生产总值 (GDP) 154.63 亿元, 其中, 第一产业增加值 28.08 亿元, 同比增长 8.2%, 第二产业增加值 47.85 亿元, 同比增长 10.06%, 第三产业增加值 78.70 亿元, 同比增长 11.10%。辖区内多以山地、丘陵地形为主, 森林资源分布不均, 植被多为亚热带常绿阔叶林, 2021 年森林覆盖率为 52.70%, 地势南北部高、中部低, 岩溶地貌发育典型, 岩溶出露面积占全省总面积的 61.92%, 2008 年普定县被确定为“全国石漠化综合治理试点县”。在快速城镇化背景下, 普定县土地利用变化剧烈, 造成生物多样性丧失、水土流失、石漠化等生态问题频发, 深刻影响着区域生态系统结构和功能, 对区域生态环境和社会经济可持续发展造成严重影响。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

#### 2.1.1 土地利用数据

研究所需遥感影像采用 1973 年的 Landsat 1-3 MSS 影像 (空间分辨率为 60 m), 1989 年的 Landsat 4-5 MSS 影像 (空间分辨率为 30 m), 2003、2010 和 2020 年的 Landsat 7 TM 影像 (空间分辨率均为 30 m)。首先, 为确保解译准确性和时效性, 均选择云量低于 5% 的季节性影像; 其次, 使用 Erdas 9.2 软件增强光谱和辐射, 合成标准假彩色影像, 进行几何精校正和大气校正。根据研究区土地利用特点, 通过监督分类与人机交互式解译等方法提取耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种地类, 并进行野外验证和修正; 最后, 利用 Erdas 9.2 软件验证分类结果, 总体精度均超过 83%, Kappa 系数分别为 0.80、0.85、0.84、0.86 和 0.87, 满足区域土地利用变化分析需求<sup>[19]</sup>。本文涉及数据坐标系统已统一转化为 WGS\_1989\_UTM\_Zone\_48, 所有栅格数据均统一调整为 30 m 分辨率。

#### 2.1.2 动态模拟数据

本研究参考已有研究成果<sup>[20]</sup>, 结合普定县实际情况, 共选取 2 个一级指标、6 个二级指标和 19 个三

级指标构建成为本研究的主要数据集 (表 1), 借助 ArcGIS10.8 软件对数据进行掩膜提取、重分类、克里金插值、栅格化、欧氏距离等处理得到需要利用的相关数据。

### 2.2 PLUS 模型

#### 2.2.1 基于 PLUS 模型的土地利用变化模拟

在土地利用变化模拟中, PLUS (patch-generating land use simulation) 模型以其独特的土地扩张分析策略与多类随机斑块种子机制得到广泛应用, 不仅能够精准识别与诊断各类土地利用类型变化的诱因, 还能有效模拟多类土地利用斑块的变化过程<sup>[21]</sup>。本研究首先依托模型内置的 LEAS 模块对 2010—2020 年间 6 类土地利用类型的扩张情况进行详尽提取与采样分析。随后, 基于设定的土地利用转移概率矩阵 (表 2) 对 2030 年自然演变、生态保护和经济发展情景下各用地类型的需求数量利用 Markov 链进行预测; 最后, 借助内置的 CARS 模块, 并参考已有研究<sup>[22]</sup>及普定县的实际情况, 通过设定领域权重 (表 3) 及过渡矩阵的约束条件模拟 2030 年在不同情景下的土地利用空间分布格局。

#### 2.2.2 土地利用情景设置

(1) 自然演变情景 延续 2010—2020 年发展趋势, 保持原有转移概率和领域权重不变, 不考虑其他规划政策对土地利用变化的约束影响<sup>[23]</sup>。

(2) 生态保护情景 在自然演变情景下, 将林地和草地向建设用地转移概率减少 50%, 耕地向建设用地转移概率减少 30%, 耕地和草地向林地转移概率提高 30%<sup>[19,22]</sup>。

(3) 经济发展情景 在自然演变情境下, 将耕地以及林地、草地、未利用地和水域向建设用地转移概率提高 20%, 建设用地向除耕地外的用地类型转移概率减少 30%<sup>[19,22]</sup>。

### 2.3 ESV 核算及参数修订

参考谢高地等<sup>[24]</sup>在 2015 年修订的当量因子表和已有研究文献<sup>[25]</sup>, 并结合普定县土地利用的实际情况将除建设用地外的 5 种地类分别采用当量表中的旱地、灌木林、灌草丛、水系和裸地的单位面积服务价值当量, 从而确定普定县单位面积 ESV 当量表 (表 4)。按照“当前单位农田所能提供的生产服务经

表 1 主要数据信息  
Table 1 Main data information

一级指标	二级指标	三级指标	数据来源
自然环境	地形因子	高程	地理空间数据云( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )
		坡度	
		坡向	
	气候因子	土壤类型	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
		年均降水量	中国气象站( <a href="https://www.cma.gov.cn/">https://www.cma.gov.cn/</a> )
	年均气温		
社会经济	植被因子	归一化指数	地理遥感生态网( <a href="http://www.gisrs.cn/index.html">http://www.gisrs.cn/index.html</a> )
	人口经济	人口数量	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )
		GDP	
		夜间灯光	
	土地利用	到居民点距离	国家基础地理信息中心( <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a> )
		到政府所在地距离	OpenSteeetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a> )
		到县中心距离	
		到铁路距离	
		到二级道路距离	
	到三级道路距离		
粮食数据	到四级道路距离	马里兰大学( <a href="http://landcover.org/aboutUs/">http://landcover.org/aboutUs/</a> )、 地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )	
	土地利用强度		
		粮食产量、粮食价格	《安顺市统计年鉴》( <a href="http://www.anshun.gov.cn/">http://www.anshun.gov.cn/</a> )、 《全国农产品成本收益资料汇编》( <a href="https://www.yearbookchina.com/">https://www.yearbookchina.com/</a> )

表 2 土地利用转移概率矩阵  
Table 2 Probability matrix of land use transfer

土地利用情景	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然演变	耕地	0.60	0.27	0.00	0.01	0.12	0.00
	林地	0.12	0.80	0.04	0.01	0.03	0.00
	草地	0.30	0.51	0.14	0.01	0.04	0.00
	水域	0.00	0.00	0.00	0.97	0.02	0.00
	建设用地	0.37	0.04	0.00	0.00	0.58	0.00
	未利用地	0.10	0.66	0.00	0.10	0.03	0.12
生态保护	耕地	0.57	0.34	0.00	0.00	0.08	0.00
	林地	0.12	0.82	0.04	0.01	0.02	0.00
	草地	0.26	0.59	0.12	0.01	0.02	0.00
	水域	0.00	0.00	0.00	0.97	0.02	0.00
	建设用地	0.37	0.04	0.00	0.00	0.58	0.00
	未利用地	0.10	0.66	0.00	0.10	0.03	0.12
经济发展	耕地	0.59	0.27	0.00	0.00	0.14	0.00
	林地	0.12	0.80	0.04	0.01	0.04	0.00
	草地	0.30	0.51	0.13	0.01	0.05	0.00
	水域	0.00	0.00	0.00	0.97	0.02	0.00
	建设用地	0.38	0.03	0.00	0.00	0.59	0.00
	未利用地	0.10	0.65	0.00	0.10	0.03	0.12

表 3 3 种模拟情景的领域权重

Table 3 Domain weights for the three simulation scenarios

情景设置	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然演变	0.6	0.4	0.2	0.2	0.7	0.1
生态保护	0.2	1.0	0.9	0.6	0.4	0.1
经济发展	0.7	0.4	0.3	0.2	1.0	0.1

表 4 普定县各土地利用类型单位面积生态价值当量表

Table 4 Ecological value equivalent per unit area of land use types in Puding county

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	粮食生产	0.85	0.19	0.38	0.80	0.00	0.00
	原料生产	0.40	0.43	0.56	0.23	0.00	0.00
	水资源供给	0.02	0.22	0.31	8.29	0.00	0.00
调节服务	气体调节	0.67	1.41	1.97	0.77	0.00	0.02
	气候调节	0.36	4.23	5.21	2.29	0.00	0.00
	净化环境	0.10	1.28	1.72	5.55	0.00	0.10
	水文调节	0.27	3.35	3.82	102.24	0.00	0.03
支持服务	土壤保持	1.03	1.72	2.40	0.93	0.00	0.02
	维持养分循环	0.12	0.13	0.18	0.07	0.00	0.00
文化服务	生物多样性	0.13	1.57	2.18	2.55	0.00	0.02
	美学景观	0.06	0.69	0.96	1.89	0.00	0.01

济价值,是未受人力干扰的自然生态系统所具备的经济价值的七倍”的规则<sup>[26]</sup>,不考虑价格波动因素<sup>[27]</sup>统一选取 2020 年普定县平均粮食产量  $6228.57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和粮食平均收购价格  $2.93 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$  来进行研究区粮食作物的经济价值修正,得出普定县单个 ESV 当量因子价值为  $2607.10 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,根据以下公式计算得到普定县不同土地利用类型的 ESV 系数(表 5)和相应的 ESV<sup>[28]</sup>,计算公式如下:

$$VC_{fi} = V \times C_{if} \quad (1)$$

$$ESV = \sum_i \sum_f (A_i \times VC_{fi}) \quad (2)$$

式中:  $VC_{fi}$  表示第  $i$  种土地利用类型的第  $f$  项 ESV 系数(单位:  $\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $C_{if}$  为  $i$  类土地利用类型第  $f$  项 ESV 系数单位面积生态价值当量(无量纲);  $V$  为普定县单个 ESV 当量因子价值  $2607.10 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $ESV$  为普定县的生态系统服务总价值(单位: 元);  $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积(单位:  $\text{hm}^2$ )。

## 2.4 ESV 敏感度

ESV 敏感度是衡量 ESV 对价值系数依赖程度的重要指标<sup>[29]</sup>,其公式为:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (3)$$

式中:  $VC$  为价值系数,  $i$  和  $j$  分别为调整前后的价值系数;  $k$  表示不同的土地利用类型;  $CS$  为敏感度,是指  $VC$  变动 1% 引起的  $ESV$  变化情况,如果  $CS > 1$ ,说明  $ESV$  对  $VC$  富有弹性;如果  $CS < 1$ ,则说明  $ESV$  对  $VC$  缺乏弹性,研究结果具有可靠性<sup>[30]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用结构变化

由表 6 可知,1973—2020 年,普定县土地利用变化表现为耕地面积减少,建设用地面积增加的态势。耕地作为研究区的主要土地利用类型之一,平均占比 50.00%。但近 50 年间其面积共减少  $12172.80 \text{ hm}^2$ ,减少率为 25.08%;林地面积呈“V”字型增长趋势,增加率为 12.52%;草地面积在近 50 年间表现为不规则的波动特征,在 2010 年达到峰值( $8209.92 \text{ hm}^2$ );随着城镇化和生态移民等政策的推进,建设用地面积也在迅速扩张,1973—2020 年建设用地共增长  $9408.00 \text{ hm}^2$ ,增加率达 6681.82%;水域面积总体呈增加趋势,增加率为 233.73%;由于未利用地面积占比较小,其面积变化不明显。

由图 2 可知,耕地、林地和建设用地面积变化最

表 5 普定县不同土地利用类型 ESV 系数/元·hm<sup>-2</sup>  
Table 5 ESV coefficients for different land use types in Puding county /yuan·hm<sup>-2</sup>

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	粮食生产	2216.04	495.35	990.70	2085.68	0.00	0.00
	原料生产	1042.84	1121.05	1459.98	599.63	0.00	0.00
	水资源供给	52.14	573.56	808.20	21612.86	0.00	0.00
调节服务	气体调节	1746.76	3676.01	5135.99	2007.47	0.00	52.14
	气候调节	938.56	11028.03	13582.99	5970.26	0.00	0.00
	净化环境	260.71	3337.09	4484.21	14469.41	0.00	260.71
	水文调节	703.92	8733.79	9959.12	266549.90	0.00	78.21
支持服务	土壤保持	2685.31	4484.21	6257.04	2424.60	0.00	52.14
	维持养分循环	312.85	338.92	469.28	182.50	0.00	0.00
	生物多样性	338.92	4093.15	5683.48	6648.11	0.00	52.14
文化服务	美学景观	156.43	1798.90	2502.82	4927.42	0.00	26.07
总计		10454.47	39680.06	51333.80	327477.83	0.00	521.42

表 6 普定县各类用地面积及占比/hm<sup>2</sup>  
Table 6 Area and proportion of various land types in Puding county/ hm<sup>2</sup>

地类		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1973年	面积/hm <sup>2</sup>	48527.36	50608.64	7255.04	645.12	140.80	903.68
	占比/%	44.90	46.82	6.71	0.60	0.13	0.84
1989年	面积/hm <sup>2</sup>	75681.28	22105.60	6179.84	765.44	384.00	3351.04
	占比/%	69.77	20.38	5.70	0.71	0.35	3.09
2003年	面积/hm <sup>2</sup>	58378.24	26677.76	6853.12	1758.72	2060.80	2012.16
	占比/%	59.73	27.29	7.01	1.80	2.11	2.06
2010年	面积/hm <sup>2</sup>	42621.44	49730.56	8209.92	1328.64	4282.88	2229.76
	占比/%	39.32	45.88	7.57	1.22	3.95	2.06
2020年	面积/hm <sup>2</sup>	36354.56	56947.20	3200.00	2152.96	9548.80	302.08
	占比/%	33.51	52.48	2.95	1.98	8.80	0.28
1973—2020年面积变化量/hm <sup>2</sup>		-12172.80	6338.56	-4055.05	1507.84	9408.00	-601.60
1973—2020年面积变化率/%		-25.08	12.52	-55.89	233.73	6681.82	-66.57

为显著。耕地面积在 1973—1989 年间急剧上升,仅 16 年就增加了 27153.92 hm<sup>2</sup>,增长率达 55.96%,主要原因可能是该时期内当地居民为了维持生计大量兴修房屋,开垦耕地以种植农作物;林地面积在 1973—1989 年期间呈现断崖式下降,下降率达 56.32%,自 2000 年普定县启动退耕还林还草工程以来,将西南、东北部不适合耕种的土地退耕为林地和草地,使得 1989—2000 年期间林地和草地面积分别增加了 20.68%、10.89%,此后林地面积呈逐年增加态势,近 50 年来共增加 6338.56 hm<sup>2</sup>;随着社会经济的快速发展,普定县建设用地面积在中部和南部呈现出“点一面”扩张趋势,2010—2020 年是建设用地面积增长得最多的 10 年,增长率高达 122.95%,主要

原因是由于当地政府积极响应易地扶贫搬迁政策,在中心城区周围大量兴修居民住所和基础公共设施;剩余的草地、水域和未利用地在研究期内空间变化幅度并不明显。

### 3.2 ESV 分析

由表 7 可知,1973—2020 年,普定县 ESV 分别为 31.00 亿元、22.38 亿元、25.98 亿元、32.77 亿元和 35.09 亿元,总体呈先减少后增加的变化趋势。其中,水域的 ESV 变化最为显著,近 50 年间增加了 4.94 亿元,增幅高达 233.73%;林地对 ESV 的贡献最大,五个时段分别为 20.08 亿元、8.77 亿元、10.59 亿元、19.73 亿元和 22.60 亿元,但在 1973—1989 年期

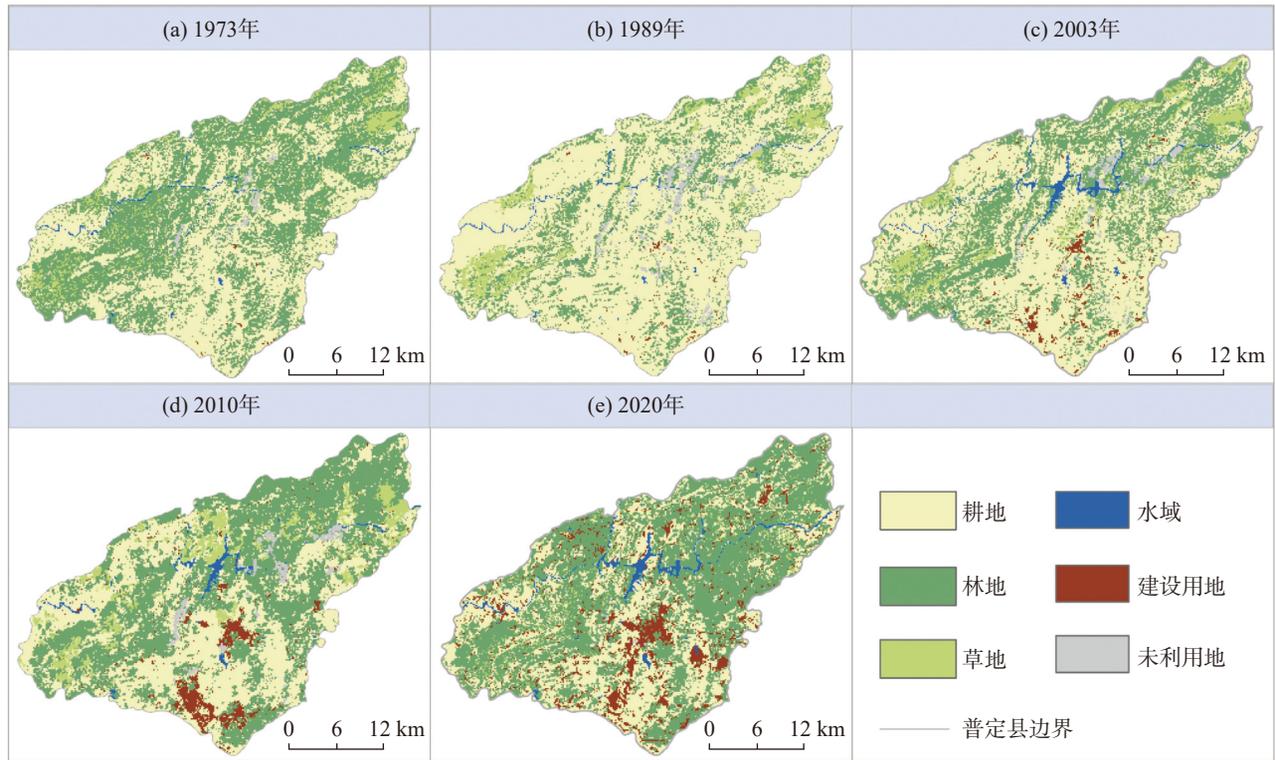


图 2 普定县土地利用时空格局分布

Fig. 2 Spatial and temporal pattern distribution of land use in Puding county

表 7 普定县各类用地 ESV 量变化/亿元

Table 7 Changes in the ESV for various land use types in Puding county /10<sup>8</sup> yuan

土地利用类型		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
1973年	ESV	5.07	20.08	3.72	2.11	0.00	0.0047	31.00
	比例%	16.37	64.79	12.02	6.82	0.00	0.02	100.00
1989年	ESV	7.91	8.77	3.17	2.51	0.00	0.0175	22.38
	比例%	35.35	39.19	14.17	11.20	0.00	0.08	100.00
2003年	ESV	6.10	10.59	3.52	5.76	0.00	0.0105	25.98
	比例%	23.49	40.75	13.54	22.17	0.00	0.04	100.00
2010年	ESV	4.46	19.73	4.21	4.35	0.00	0.0116	32.77
	比例%	13.60	60.22	12.86	13.28	0.00	0.04	100.00
2020年	ESV	3.80	22.60	1.64	7.05	0.00	0.0016	35.09
	比例%	10.83	64.39	4.68	20.09	0.00	0.00	100.00
1973—2020年ESV变化量		-1.27	2.52	-2.08	4.94	0.00	-0.0031	4.09
1973—2020年ESV变化率/%		-25.08	12.52	-55.89	233.73	0.00	-66.57	98.71

间, 普定县 ESV 骤然下降, 下降率达到 27.81%, 这很可能是由于该时间段恰好处于改革开放初期, 普定县为了满足当地居民日益增长的生活需求, 进行农业结构调整, 增加粮食产量, 导致大量林地面积转化为耕地面积; 1989—2020年, 普定县林地和水域 ESV 量总体呈上升的趋势。其中, 自 2000 年起, 普定县积极推行退耕还林还草工程, 促进了林地面积的快

速增长, 导致其价值量不断提升; 除 2020 年外耕地的 ESV 仅次于林地, 但由于城镇化快速发展的需要, 建设用地急速扩张, 使得一部分耕地被侵占, 导致耕地的 ESV 下降至 3.80 亿元, 下降率为 25.08%; 草地 ESV 变化趋势与其面积变化趋势相同, 1973—1989 年 ESV 减少了 0.55 亿元; 未利用地因其面积小且单位 ESV 较低, 对总的 ESV 影响可忽略不计<sup>[27]</sup>。总体

来说,虽然建设用地的面积急速扩张,但是对 ESV 贡献率较高的林地、水域等用地类型的面积仍处于增加的变化态势,导致研究区整体的 ESV 上升趋势较为明显,1973—2020 年 ESV 变化率达 98.7%;与此同时,林地、草地和水域作为 ESV 的主要贡献者,其合理规划与管理对于保护研究区的生态安全具有至关重要的作用。因此,需要严格划定林地、草地等生态用地的红线,以确保其得到有效保护,从而维护整个研究区的生态平衡与可持续发展。

由图 3 可知,各类用地面积的变化影响了每项生态系统服务的价值量,并表现出不规则的变化趋势。根据单项 ESV 的数值大小可将其划分为三个梯度:水文调节和气候调节属于第一梯度,研究期间水文调节 ESV 分别为 7.20、5.12、8.11、9.00 和 11.29 亿元,气候调节 ESV 分别为 7.06、4.03、4.53、7.08 和 7.18 亿元,年均占比均高于 17.00%,其主要原因可能是水文调节和气候调节的单位 ESV 较高,最终导致其 ESV 数值较大<sup>[31]</sup>;粮食生产、气体调节、净化环境、土壤保持和生物多样性属于单项 ESV 的第二梯度,年均占比高于 5.00%,大部分年份表现为土壤保持>气体调节>生物多样性>净化环境>粮食生产;原料生产、水资源供给、维持养分循环和美学景观是单项 ESV 的第三梯度,ESV 均值为 0.77 亿元,年均占比不到 4.00%,主要原因可能是其 ESV 系数不高所致。

### 3.3 多情境下普定县土地利用变化模拟

运用 PLUS 模型中内置的 LEAS 模块对 2010—2020 年的扩张驱动力进行识别,得到 6 类土地利用类型适宜性图集<sup>[22]</sup>。再将各类适宜性图集、2010 年的土地利用图像和 2020 年的 Markov 链预测结果输入到模型的 CARS 模块中,模拟 2020 年普定县的土地利用情况,最后经多次调试,得到 2020 年预测图像的 Kappa 系数为 0.84,总体精准度为 87.92%,说明模拟得到的 2020 年土地利用现状图和真实地物分布具有较高的一致性,能够满足研究需要。

由表 8 可知,在自然演变情境下,耕地的面积变化最大,相比与 2020 年面积减少了 3313.98 hm<sup>2</sup>,建设用地和林地面积增加了 22.55% 和 2.15%,其主要原因可能是随着社会经济的不断发展,城市化进程的加快以及农业现代化技术的广泛应用,耕地逐渐被转化为建设用地,以满足城市扩张和基础设施建设的需求。此外,生态保护措施也可能导致部分耕地转化为林地,以改善生态环境和增加森林覆盖率;在生态保护情境下,由于设定了退耕还林、严格控制建设用地扩张等生态保护措施,林地面积增加显著,较 2020 年增加了 5453.55 hm<sup>2</sup>,耕地和未利用地面积减少的同时,草地和建设用地面积也存在小幅度减少,下降率分别为 12.96% 和 0.79%;在经济发展情景下,由于城镇化发展速度的不断加快,建设用地面积

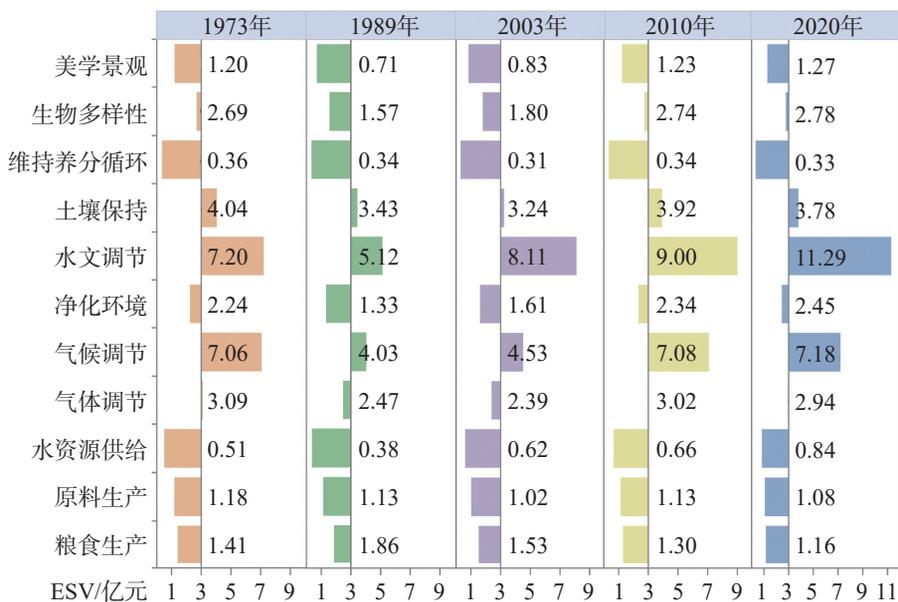


图 3 普定县生态系统单一服务功能价值变化

Fig. 3 Change of single service function value of ecosystem in Puding county

表 8 不同情境下各土地利用类型面积变化情况  
Table 8 Changes in area of each land-use type under different scenarios

用地类型	不同情景用地类型变化/hm <sup>2</sup>		
	自然演变情景	生态保护情景	经济发展情景
耕地	-3 313.98	-5 196.42	-3 899.61
林地	1 225.26	5 453.55	537.66
草地	-319.14	-414.81	-341.64
水域	488.16	468.81	467.64
建设用地	2 153.07	-75.69	3 470.58
未利用地	-233.46	-235.44	-234.63

不断扩张,相较于 2020 年增加了 36.35%,主要来源于对大部分耕地以及少量草地和未利用地的侵占。整体来看,在三种情景模拟的状态下,耕地是受侵占最为严重的用地类型,为确保区域耕地资源的可持续利用,应严格执行耕地保护制度。

由图 4 可知,相较于 2020 年的土地利用情况,自然演变情景下普定县的中心城市范围急速扩张,建设用地面积激增,增长率达 22.02%,侵占了大部分耕地,除此之外,研究区西部和南部建设用地均有所扩张。在生态保护情景下,由于设定了退耕还林和严格限制建设用地扩张等措施,西部和南部的耕地大

量退耕转化为林地,中部和东部严格限制中心城区继续向外围扩张,将大量规划建设用地转化为林地、草地等生态用地,使得林地面积持续上升,累计增加 5 453.55 hm<sup>2</sup>。在经济发展情景下,建设用地变化情况与自然演变情景下的情况基本一致,中心城区的建设用地向外围急速扩张,其中西部和南部的两个乡镇也得到了快速发展,东部大量修建高速公路、乡村道路便于城乡一体化建设,区内少量未利用地和草地也被纳入建设用地扩张的侵占范围,使得建设用地相比于 2020 年扩张了 3 470.58 hm<sup>2</sup>,增幅达 36.35%,虽然普定县社会经济发展得到了大幅度提升,但也应加强对生态环境问题的关注,使经济建设和生态安全相互促进,形成有序的循环发展趋势。

### 3.4 多情境下普定县ESV 变化特征

相较于 2020 年的各 ESV,2030 年不同情景下的水资源供给、净化环境、水文调节和美学景观 4 项服务价值均有所上升,其中以水资源供给和水文调节功能的增长幅度较大,均高于 10.00%,剩余的 7 项 ESV 增减幅度并不显著。从图 5 可知,在自然演变情境下各功能 ESV 的增减幅度不均,总体呈现“波浪式”的变化形态,累计增幅为 15.48%;在生态保护

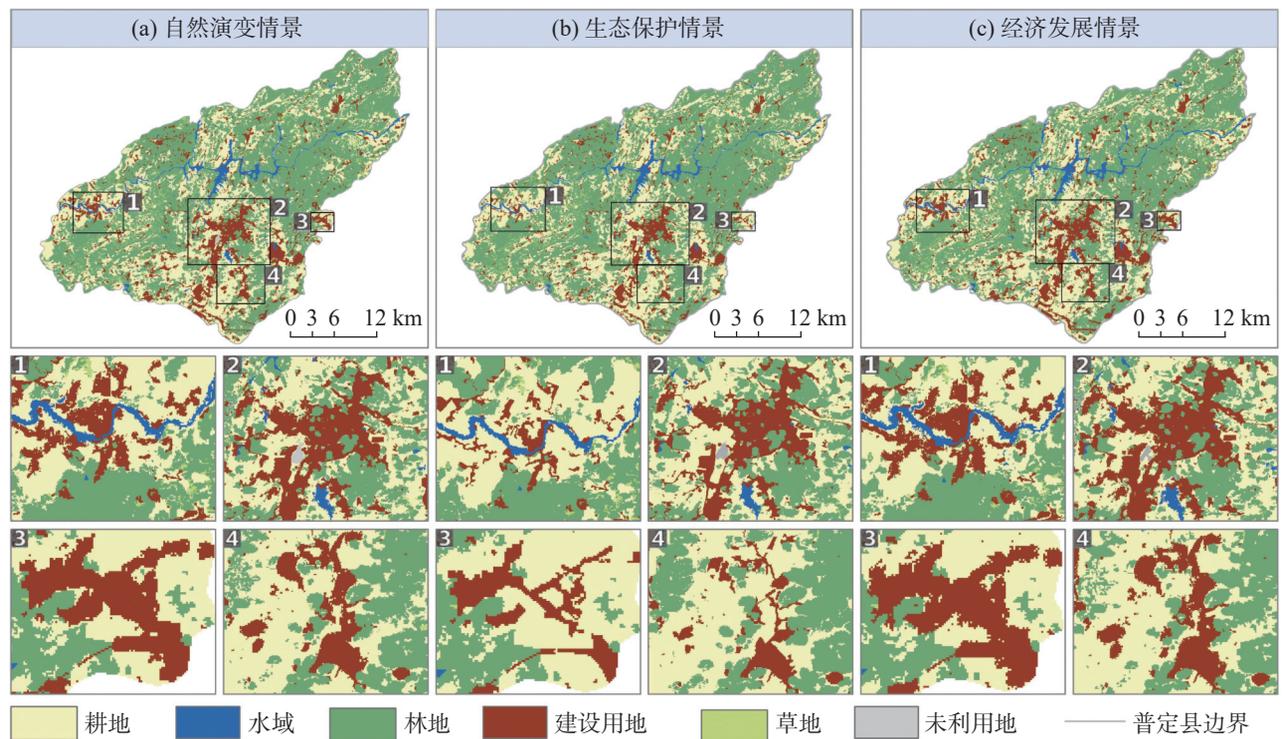


图 4 不同情境下普定县土地利用变化模拟情况

注:图中 1、2、3、4 分别代表局部区域放大效果图的序号。

Fig. 4 Simulation of land use changes in Puding County under different scenarios

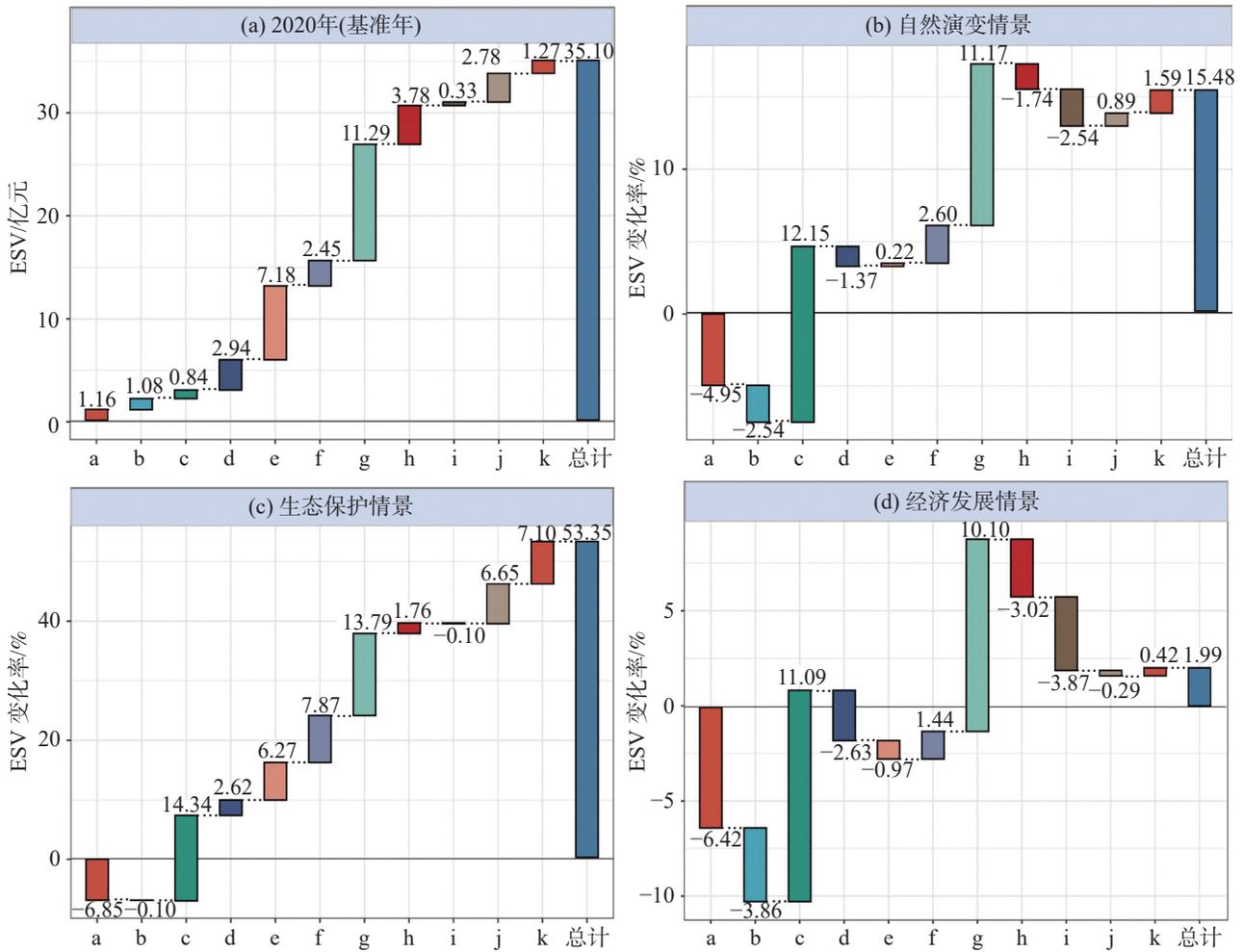


图5 2030年3个模拟情景下ESV相对于2020年的变化率

a.粮食生产 b.原料生产 c.水资源供给 d.气体调节 e.气候调节 f.净化环境 g.水文调节 h.土壤保持 i.维持养分循环 j.生物多样性 k.美学景观

Fig. 5 Rates of changes in ESV of 2030 compared with those in 2020 under three simulation scenarios

情景下原料生产、粮食生产和维持养分循环服务价值相较于基准情景均出现下降趋势,降幅分别为0.10%、6.85%和0.10%,其余8项功能的ESV都有所改善,共增加了2.74亿元,增幅高达60.40%,主要原因可能是在生态保护情景下,设定了退耕还林还草措施,导致耕地面积持续减少,而林地和草地等生态用地得到了保护;与基准情景下的各单项ESV相比,在经济发展情景下的原料生产、粮食生产和气体调节等7项服务价值均有所减少,其中粮食生产ESV下降最多(0.07亿元),降幅为6.42%,主要原因可能是在经济发展的推动下,城市化快速发展使得建设用地面积不断增加,挤占了大量宝贵的耕地面积,同时地方经济的发展在一定程度上会导致生态系统的结构和功能发生变化,致使大部分功能ESV存在不同程度的下降。

为深入分析研究区在不同情景下ESV的空间变

化规律,本研究采用ArcGIS软件构建1 km×1 km的格网来评估每个格网单元的ESV,通过自然断点法将研究区ESV从低到高划分为I(0.00~0.01)、II(0.01~0.02)、III(0.02~0.03)、IV(0.03~0.06)、V(0.06~0.13)和VI(0.13~0.30)6个等级。

由图6可知,2020年普定县ESV整体呈“东、西部高,中部低”的分布特征,与主要以林地、草地为主的地形地貌分布相符,故ESV较高;而中部主要是城市中心区域,以建设用地为主,导致ESV普遍较低。在自然发展情景下,各土地利用类型的ESV相较于2020变化幅度不明显;在生态保护情景下,I级类ESV明显减少,II级、III级类ESV存在不同程度的增加,这是因为在生态保护情景中设定了退耕还林和限制建设用地扩张等措施,导致林地、草地等生态用地面积相应增加,ESV也随之增加;在经济发展情景下,建设用地的需求迅猛增长,导致大量耕地和林

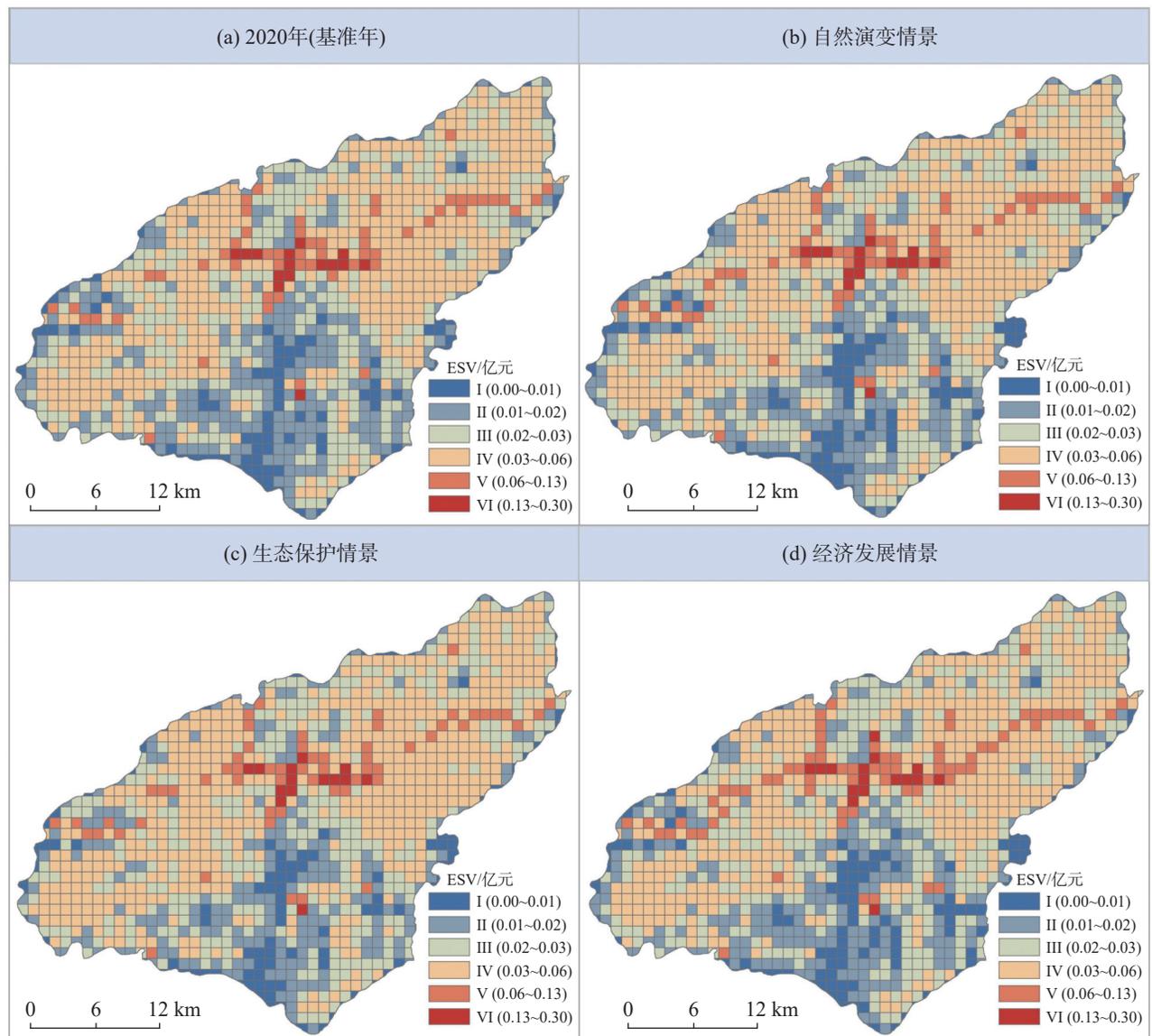


图 6 2030 年不同情境下普定县 ESV 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of ESV in Puding County under different scenarios in 2030

地被占用,使得土地利用结构发生了显著变化,致使 I 级、II 级 ESV 增加,III 级、IV 级 ESV 减少。

## 4 讨 论

### 4.1 基于本地化的当量因子价值修正

通过阐明普定县土地利用时空动态演变态势,测算其 ESV,借助 PLUS 模型模拟预测 2030 年 3 种演变情景下的土地利用和 ESV 变化趋势,研究结果表明:林地对普定县 ESV 的贡献占主导地位,这主要归因于林地具有较高的 ESV 系数,并且作为普定县的主要土地利用类型之一,其面积的增加对 ESV 的提升起到了显著作用,这一结论与胡玉雪等<sup>[32]</sup>在贵

州省生态系统服务价值研究方面所得出的结论相吻合。在修正当量因子价值的过程中,为避免直接引用而忽视区域差异的现象,减少当量表与研究区现状的脱节,同时充分考量普定县土地利用类型的实际情况,将全国范围内的单位面积 ESV 系数进行基于粮食价格的本地化调整,以确保其更贴近该区域的实际情况,该处理方法与岩溶地区部分相关研究具有一致性<sup>[28,32-34]</sup>,这些研究利用粮食价格对当量因子价值进行修正,修正后其数值范围介于 1 230~2 602.91 元·hm<sup>-2</sup> 之间,与本文修正后的当量因子价值 2 607.10 元·hm<sup>-2</sup> 比照参考,本研究修正后的数值处于正常且合理范围内,一定程度上证明了基于本地化修正当量因子价值方法的科学性与可行性。然而,ESV 受

到多种因素的共同影响,包括极端气候(洪涝、干旱)、地形地貌、生物多样性、城市化进程、生态工程等自然、人文因素,仅采用间隔年份作为研究时段可能无法充分捕捉极端气候等事件对ESV的影响情况,导致预测结果与实际发展之间产生偏差,并且探索ESV间的非线性关系仍是当前阶段需重点关注并亟待解决的科学问题。因此,为更准确地评估区域ESV,未来的研究应考虑包括极端气候事件在内的连续年期的长时间序列数据,探究多因素驱动下ESV动态演变情况。

#### 4.2 ESV对土地利用变化的响应

已有研究证实,土地利用变化是衡量人类活动对生态系统服务影响的一项关键指标,其作为生态系统服务的主要驱动力之一,不仅会直接影响生态系统服务的提供,而且对生态系统的结构及功能产生改变,从而引起ESV发生变化<sup>[35-36]</sup>。近50年来,普定县土地利用变化主要表现为耕地面积减少,林地面积增加区域主要集中在研究区东北部和西南部,建设用地面积在中心城区以及各周边乡镇中迅速扩张,这与秦罗义等<sup>[37]</sup>研究的结果相符合,这主要由于研究区受到地形起伏较大、岩溶发育不均等自然条件的限制,城镇化发展往往依赖于对类似耕地这种地势平缓的用地类型的占用<sup>[38]</sup>。普定县ESV以1989年为拐点呈现出“先减后增”的变化趋势,ESV累计增加4.09亿元,增长率为13.19%;空间上主要表现为“东、西部高,中部低”的分布特征,这可能是

因为在1989年之前,工矿用地和交通用地等建设用地的快速扩张导致分布在地势较为平坦的耕地和部分林地面积下降,降低了研究区的ESV。虽然1989年后,建设用地仍表现为扩张趋势(但建设用地ESV无法估算,故计为0),但由于退耕还林还草工程的实施,耕地面积减少的同时,研究区东北及西南部ESV系数较大的林地面积有所增加,水域面积也表现为增长趋势,导致普定县ESV在1989年后出现持续上升。多情景模拟预测的研究结果表明:2030年普定县在自然演变、生态保护和经济发展情景下的ESV均呈现增加趋势,但耕地的面积仍在持续减少,因此,在土地开发利用的同时应注重对耕地资源的保护,严格控制建设用地的无序扩张。

#### 4.3 ESV测算结果可靠性诊断

为进一步检验ESV测算结果的可靠性,本文通过参考林栋等<sup>[39]</sup>在兰州城市生态系统服务价值动态分析中采用的处理方法,对各土地利用类型的ESV系数进行了增减50%的调整。由表9可知,各类型土地的敏感性均小于1,说明普定县各地类的ESV相较于调整后的系数是缺乏弹性的,研究结果具有可靠性,这一结论与多数相关研究的观点基本吻合<sup>[29,35,39]</sup>。其中,林地作为普定县主要用地类型之一,其敏感度高于其他地类,2020年与2030年3种情景模拟下的CS分别为0.64、0.63、0.65和0.63,林地价值系数每增加1.00%,对应的ESV系数分别增加64.18%、62.74%、64.91%、62.70%。另外,相比于

表9 ESV及敏感性指数(经价值系数修正)

Table 9 ESV and sensitivity indices (corrected for value coefficients)

土地类型	价值系数	ESV/亿元				CS			
		2020年	自然演变	生态保护	经济发展	2020年	自然演变	生态保护	经济发展
耕地	VC+50%	36.7223	38.1223	39.3924	37.6789	0.1101	0.0958	0.0871	0.0952
	VC-50%	32.8911	34.6377	36.1046	34.2554	-	-	-	-
林地	VC+50%	45.9760	47.7924	49.9998	47.2432	0.6418	0.6274	0.6491	0.6270
	VC-50%	23.6374	24.9676	25.4972	24.6912	-	-	-	-
草地	VC+50%	35.6199	37.1113	38.4552	36.6927	0.0467	0.0402	0.0374	0.0403
	VC-50%	33.9935	35.6487	37.0418	35.2417	-	-	-	-
水域	VC+50%	38.3112	40.6838	42.0206	40.2374	0.2014	0.2366	0.2263	0.2374
	VC-50%	31.3022	32.0762	33.4764	31.6970	-	-	-	-
建设用地	VC+50%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	VC-50%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-	-	-	-
未利用地	VC+50%	34.8075	36.3802	37.7487	35.9673	4.44515E-05	9.06824E-06	8.46599E-06	9.0027E-06
	VC-50%	34.8059	36.3798	37.7483	35.9670	-	-	-	-

2020 年的 CS, 2030 年的 3 种情景模拟中, 水域的 CS 均呈现增长趋势, 而耕地、草地和未利用地的 CS 则均有所下降, 表明水域 CS 的提升对研究区 ESV 总量的增加具有显著的正向影响, 而耕地、草地和未利用地 CS 的下降则在一定程度上制约了 ESV 总量的提升, 这一认识与白元等<sup>[40]</sup>在塔里木河干流区土地利用与生态系统服务价值变化研究中所得到的结论基本一致。

## 5 结 论

(1) 1973—2020 年普定县耕地面积锐减, 近 50 年间耕地面积减幅达到 25.08%, 林地和建设用面积逐年增加, 分别增加了 6338.56 hm<sup>2</sup>、9408.00 hm<sup>2</sup>。

(2) 1973—2020 年研究区 ESV 总体呈波动上升趋势。从各类土地 ESV 来看, 林地、草地和水域 ESV 在 1989—2020 年均呈逐年增加, 是 ESV 增加的主要贡献者; 从单项生态系统服务功能价值来看, 水文调节和气候调节服务的 ESV 贡献最为显著, 两者之和占 ESV 总量的 47.97%。

(3) 在 2030 年自然演变、生态保护和经济发展情景中, 普定县耕地、草地和未利用地面积均下降, 主要转化为林地和建设用地, 其中生态保护情景下耕地面积流失最多, 达到 5196.42 hm<sup>2</sup>; 空间分布中 3 种模拟情景均表现出建设用地面积在研究区中部呈“点一面”扩张趋势。自然演变、生态保护和经济发展情景下的 ESV 均高于 2020 年研究区 ESV; 普定县 ESV 整体呈现“东、西部高, 中部低”的特点, 且各类用地 ESV 均通过敏感性检验, 结果具有较强的可信度。

## 参考文献

- [1] 刘志勇, 方朝阳, 蔡振饶, 李慧中, 夏阳, 陈浩. 多情景下鄱阳湖滨湖区生态系统服务价值预测[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 218-227.  
LIU Zhiyong, FANG Chaoyang, CAI Zhenrao, LI Huizhong, XIA Yang, CHEN Hao. Multi-scenario simulation and prediction of ESV for Poyang Lake lakeside area[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(7): 218-227.
- [2] 陈金珂, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶. 基于土地利用情景模拟的喀斯特关键带生态系统服务权衡与协同分析: 以蒙自喀斯特断陷盆地为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 94-108.  
CHEN Jinke, PU Junbing, LI Jianhong, ZHANG Tao. Trade-off and synergy of ecosystem services of a karst critical zone based on land use scenario simulation: Take Mengzi karst graben basin as a study case[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(1): 94-108.
- [3] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以长株潭城市群为例[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 93-102.  
OU Yangxiao, HE Qingyun, ZHU Xiang. The influence of simulated land use change in urban agglomeration on ecosystem service value under multiple scenarios: Taking Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration as an example[J]. Economic Geography, 2020, 40(1): 93-102.
- [4] 祁育汀, 张平, 刘雷, 马雪楠, 王欢, 赵娟. 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 Yuting, ZHANG Ping, LIU Lei, MA Xuenan, WANG Huan, ZHAO Juan. Multi-scenario optimization of land use structure and prediction of ecosystem service value in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Journal of Applied Ecology, 2023, 34(9): 2507-2517.
- [5] Costanza R, D' Arge R, Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O' Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Belt M V D. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [6] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.  
XIE Gaodi, ZHEN Lin, LU Chunxia, XIAO Yu, CHEN Cao. Expert knowledge based valuation method of Ecosystem Services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.
- [7] Liu F L, Yang L, Wang S. Spatial and Temporal Evolution and Correlation Analysis of Landscape Ecological Risks and Ecosystem Service Values in the Jinsha River Basin[J]. Journal of Resources and Ecology, 2023, 14: 914-927.
- [8] 梁锦桃, 邓艳, 曹建华, 靳振江, 李旭尧. 典型断陷盆地流域生态系统服务价值时空差异研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 476-486.  
LIANG Jintao, DENG Yan, CAO Jianhua, JIN Zhenjiang, LI Xurao. Temporal and spatial differentiation of the ecosystem service value in typical fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 476-486.
- [9] 周道媛, 王娟, 周凤娟. 基于 PLUS 模型多情景分析的土地利用变化及生态系统服务价值评估: 以福州市为例[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(3): 198-209.  
ZHOU Daoyuan, WANG Juan, ZHOU Fengjuan. Assessment of land use change and ecosystem service value based on multi-scenario analysis of PLUS model: Take Fuzhou City as an example[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(3): 198-209.
- [10] 范利瑶, 文倩, 李青松, 汪潇, 韩婧. 沙颍河流域河南段生态系统服务价值及影响因素评估[J]. 人民黄河, 2023, 45(3): 90-96.  
FAN Liyao, WEN Qian, LI Qingsong, WANG Xiao, HAN Jing. Evaluation of ecosystem service value and influencing factors in

- Henan section of Shaying River Basin[J]. *Yellow River*, 2023, 45(3): 90-96.
- [11] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 邓越. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1654-1665.
- LI Zhuo, JIANG Weiguo, WANG Wenjie, LYU Jinxia, DENG Yue. Study on the leading service function of wetland in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration based on ecosystem service value[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1654-1665.
- [12] 胡玉雪, 周旭, 袁稳玲, 张文彬, 敖杨, 王小华. 贵阳市景观格局对生态系统服务价值的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(5): 34-43.
- HU Yuxue, ZHOU Xu, YUAN Wenling, ZHANG Wenbin, AO Yang, WANG Xiaohua. The influence of landscape pattern on the value of ecosystem service in Guiyang city[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 41(5): 34-43.
- [13] Grafius D R, Corstanje R, Harris J A. Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis[J]. *Landscape Ecology*, 2018, 33: 557-573.
- [14] 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: 101569.1-101569.14.
- [15] Egoh B N, Reyers B D, Rouget M, Richardsob D M. Identifying priority areas for ecosystem service management in South African grasslands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92: 1642-1650.
- [16] 李何英, 何文, 王金叶, 杨帅琦, 姚月锋. 基于 PLSR-FLUS-MarKov 模型的生态系统服务价值多情景预测: 以漓江流域为例[J]. *水生态学杂志*, 2025, 46(1): 203-212.
- LI Heying, HE Wen, WANG Jinye, YANG Shuaiqi, YAO Yuefeng. Multi-scenario prediction of ecosystem service value based on the PLSR-FLUS-MarKov model: A case study of Lijiang River basin[J]. *Journal of Hydroecology*, 2025, 46(1): 203-212.
- [17] 曲艺, 丁建丽, 包青岭, 王颖慧, 许梦珠. 多情景模拟下的新疆生态系统服务价值评估[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(4): 195-204.
- QU Yi, DING Jianli, BAO Qingling, WANG Yinghui, XU Mengzhu. Evaluation of the value of Xinjiang ecosystem services under multi-scenario simulation[J]. *Environmental Science and Technology*, 2023, 46(4): 195-204.
- [18] 卢泓杏, 赵宇鸾. 基于生态安全格局的岩溶山地国土空间生态修复关键区识别: 以贵州省关岭县为例[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(2): 349-363.
- LU Hongxing, ZHAO Yuluan. Identification of key areas for the ecological restoration of karst mountainous territorial space based on the construction of ecological security pattern: A case study of Guanling, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(2): 349-363.
- [19] 李月, 罗红芬. 黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例[J]. *环境科学*, 2024, 45(2): 961-973.
- LI Yue, LUO Hongfen. Spatio-temporal evolution of carbon reserves and multi-scenario simulation prediction in typical counties in central Guizhou: Take Puding county as an example[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(2): 961-973.
- [20] 谢向东, 林孝松, 王莹, 涂荣誉, 张吉祥. 基于 PLUS 模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(6): 86-92,113.
- XIE Xiangdong, LIN Xiaosong, WANG Ying, TU Rongyu, ZHANG Jixiang. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan District, Chongqing based on PLUS model[J]. *News of Yangtze River Academy of Sciences*, 2023, 40(6): 86-92,113.
- [21] Gounarids D, Chorionopoulos I, Symeonakis E, Koukoulas S. A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use/cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 21: 769-776.
- [22] 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: Taking Hanzhong city as an example[J]. *Resources and Environment in arid Zone*, 2022, 36(10): 86-95.
- [23] 喇露梦, 勾蒙蒙, 李乐, 王娜, 胡建文, 刘常富, 肖文发. 三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟: 以秭归县为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(11): 1368-1377.
- LA Lumeng, GOU Mengmeng, LI Le, WANG Na, HU Jianwen, LIU Changfu, XIAO Wenfa. Spatiotemporal dynamics and scenarios analysis on trade-offs between ecosystem service in Three Gorges reservoir area: A case study of Zigui county[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(11): 1368-1377.
- [24] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Changshun, XIAO Yu, LU Chunxia. Value of ecosystem services in China[J]. *Resource Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [25] 隋露, 蒲春玲, 刘志有, 柏鹏飞, 刘涛. 基于 PLUS 模型的乌鲁木齐市生态服务价值权衡协同探究[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(1): 159-168.
- SUI Lu, PU Chunling, LIU Zhiyou, BAI Pengfei, LIU Tao. Collaborative exploration of ecological service value trade-off in Urumqi city based on PLUS model[J]. *Geography of Arid Region*, 2023, 46(1): 159-168.
- [26] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, ZHENG Du, LI Shuangcheng. Ecological assets valuation of the Tibetan Plat-

- eau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.
- [27] 高星, 杨刘婉青, 李晨曦, 宋昭颖, 王杰. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 7974-7988.
- GAO Xing, YANG Liuwanqing, LI Chenxi, SONG Zhaoying, WANG Jie. Spatial response of land use change and ecosystem service value in Baiyangdian Basin under multiple scenarios[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 41(20): 7974-7988.
- [28] 杨应增, 周来丰, 夏伟, 王敏姿. 基于土地利用变化的赤水河流域生态系统服务价值变化分析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(2): 694-703.
- YANG Yingzeng, ZHOU Laifeng, XIA Wei, WANG Minzi. Analysis of the value change of ecosystem services in the Chishui River Basin based on land use change[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(2): 694-703.
- [29] 李安林, 周艳, 唐丽毅, 牛乐德, 潘媚. 怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估: 基于 PLUS 模型的多情景分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(1): 140-149.
- LI Anlin, ZHOU Yan, TANG Liyi, NIU Ledede, PAN Mei. Land use simulation and ecosystem service value assessment in Nujiang Prefecture: A multi-scenario analysis based on the PLUS model[J]. *Agricultural Resources and Regionalization*, 2023, 44(1): 140-149.
- [30] 赖元长, 李贤伟, 冯帅, 王鹏, 唐骄萍, 赵安玖, 赖家明. 退耕还林工程对四川盆周低山丘陵区生态系统服务价值的影响: 以洪雅县为例[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 755-768.
- LAI Yuanchang, LI Xianwei, FENG Shuai, WANG Peng, TANG Jiaoping, ZHAO Anjiu, LAI Jiaming. The impact of the project of returning farmland to forest on the ecosystem service value in the hilly area of Sichuan Basin: Take Hongya County as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 755-768.
- [31] 金声甜, 肖文海, 杨胜苏, 赵丹丹. 长江经济带土地利用变化及其生态系统响应[J]. *经济地理*, 2020, 40(7): 166-173.
- JIN Shengtian, XIAO Wenhai, YANG Shengsu, ZHAO Dandan. Land use change and its ecosystem response in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(7): 166-173.
- [32] 胡玉雪, 周旭, 敖杨, 袁稳玲, 张文彬, 王小华. 贵州省生态系统服务价值演变及影响因素分析[J]. *测绘科学*, 2023, 48(9): 120-130.
- HU Yuxue, ZHOU Xu, AO Yang, YUAN Wenling, ZHANG Wenbin, WANG Xiaohua. Analysis of the evolution and influencing factors of ecosystem service value in Guizhou Province[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(9): 120-130.
- [33] 黄秀雨, 严志强, 胡宝清, 严钦强, 彭定新, 盛凯. 喀斯特地区土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析: 以广西百色市为例[J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(8): 44-53.
- HUANG Xiuyu, YAN Zhiqiang, HU Baoqing, YAN Qinqiang, PENG Dingxin, SHENG Kai. Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in karst area: A case study of Baise City, Guangxi[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2023, 62(8): 44-53.
- [34] 郜红娟, 罗绪强, 韩会庆, 王后阵. 贵州山区公路沿线生态系统服务价值变化[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(1): 135-141.
- GAO Hongjuan, LUO Xuqiang, HAN Huiqing, WANG Houzhen. Changes in ecosystem service value along highways in Guizhou mountainous areas[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2016, 40(1): 135-141.
- [35] Zhang F, Ayinuer Y S J, Jing Y Q. Assessing and predicting changes of the ecosystem service values based on land use/cover change in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 1133-1144.
- [36] 李金雷, 刘欢, 哈斯娜, 陆学岩, 刘旭隆, 王立新, 温璐. 岱海流域土地利用动态模拟及生态系统服务价值测算[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(2): 343-350.
- LI Jinlei, LIU Huan, HA Sina, LU Xueyan, LIU Xulong, WANG Lixin, WEN Lu. Dynamic simulation of land use and calculation of ecosystem service value in Daihai River Basin[J]. *Journal of Ecology*, 2022, 41(2): 343-350.
- [37] 秦罗义, 白晓永, 王世杰, 周德全, 陈伟燕, 罗光杰, 张斯峙, 崔泽银. 近 40 年来贵州高原典型区土地利用变化及驱动机制[J]. *山地学报*, 2015, 33(5): 619-628.
- QIN Luoyi, BAI Xiaoyong, WANG Shijie, ZHOU Dequan, CHEN Weiyan, LUO Guangjie, ZHANG Siyu, CUI Zeyin. History of land use change and driving mechanism of typical Guizhou plateau region during 40 years[J]. *Mountain Research*, 2015, 33(5): 619-628.
- [38] 马欢, 冯朝阳, 宋婷, 计伟, 杨娇, 李付杰. 1990—2018 年赤水河流域土地利用变化分析[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 428-436.
- MA Huan, FENG Chaoyang, SONG Ting, JI Wei, YANG Jiao, LI Fujie. Study on the characteristics of land use change in Chishui River Basin from 1990 to 2018[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(3): 428-436.
- [39] 林栋, 马晖玲, 任正超, 李元恒. 基于 LUCC 的兰州城市生态系统服务价值动态分析[J]. *生态科学*, 2016, 35(2): 134-142.
- LIN Dong, MA Huiling, REN Zhengchao, LI Yuanheng. Dynamic analysis of the service value of Lanzhou urban ecosystem based on LUCC[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(2): 134-142.
- [40] 白元, 徐海量, 凌红波, 傅萼仪. 塔里木河干流区土地利用与生态系统服务价值的变化[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1912-1920.
- BA Yuan, XU Hailiang, LING Hongbo, FU Jinyi. Changes in land use and ecosystem service value in the mainstream of the Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(6): 1912-1920.

## Dynamic simulation of land use and its response to the ecosystem service value in Puding county from 1973 to 2030

LI Yue<sup>1</sup>, FENG Xia<sup>1</sup>, WU Luhua<sup>2</sup>

(1. College of Public Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. School of Economics and Management, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China)

**Abstract** Puding county is located in the west-central part of Guizhou Province, covering a total area of 1,091 km<sup>2</sup>. It experiences a humid subtropical monsoon climate, characterized by an average annual precipitation of 1,378.2 mm and an average annual temperature of 15.1 °C. As of 2021, Puding county had a resident population of 376,300, including an urban population of 144,900, resulting in an urbanization rate of 38.51%. The county's annual Gross Domestic Product (GDP) was 15.463 billion yuan, with the value added of the primary industry contributing 2.808 billion yuan, reflecting a year-on-year increase of 8.2%. The value added of the secondary industry was 4.785 billion yuan, a year-on-year increase of 10.06%, while the value added of the tertiary industry contributed 7.870 billion yuan, up 11.10%. This region is characterized by the typical development of karst geomorphology, and it frequently faces ecological challenges such as soil erosion and rocky desertification. Therefore, uncovering and predicting the impacts of land use change on Ecosystem Service Value (ESV) in karst mountainous areas under different scenarios is of great significance for maintaining regional ecological security, enhancing the value of ecosystem services, and formulating ecological protection and restoration policies. In order to deeply analyze the land use patterns and their response to ecosystem service value over an extended time series in Puding county, research and discussion were carried out across the three temporal dimensions: past, present, and future. This study aims to provide a scientific foundation and valuable insights for the sustainable development of ecosystems in the study area.

Based on five periods of land use data from 1973, 1989, 2003, 2010 and 2020, the equivalent factor method, which incorporates localized adjustments of food prices, was used to assess the ESV for each historical period. Additionally, the PLUS model was applied to simulate land use and ESV changes projected for 2030 under three scenarios, natural evolution, ecological protection, and economic development. The results indicate as follows.

(1) The area of cultivated land in Puding county decreased sharply from 1973 to 2020, with a total reduction of 25.08% over the last 50 years. In contrast, the areas of forest land and construction land increased annually, with increases of 6,338.56 hm<sup>2</sup> and 9,408.00 hm<sup>2</sup>, respectively.

(2) The ESV of the study area from 1973 to 2020 was recorded at 3.100 billion yuan, 2.238 billion yuan, 2.598 billion yuan, 3.277 billion yuan, and 3.510 billion yuan, respectively, exhibiting a general fluctuating upward trend. Regarding the ESV of various land types, the ESVs of forest land, grassland, and watershed all showed annual increases from 1989 to 2020, serving as main contributors to the overall increase in ESV. Specifically, in terms of the value of individual ecosystem service functions, hydrological regulation and climate regulation services made the most significant contribution to ESV, with the combined total of these two services accounting for 47.97% of the total ESV.

(3) In the natural evolution scenario, the ecological protection scenario, and the economic development scenario projected for 2030, the areas of cultivated land, grassland, and unused land in Puding county are all expected to decline, mainly converted into forested land and construction land. Notably, the area of cultivated land is projected to experience the greatest loss under the ecological protection scenario, amounting to 5,196.42 hm<sup>2</sup>. The spatial distribution across the three simulation scenarios shows that the area of construction land is point-surface in the central part of the study area.

(4) The ESVs for the natural evolution scenario, ecological protection scenario, and economic development scenario are projected to be 3.638 billion yuan, 3.778 billion yuan, and 3.597 billion yuan, respectively, all of which

exceed the ESVs recorded for the study area in 2020. From a spatial distribution perspective, the ESVs for Puding county as a whole present the characteristics of being higher in the east and west and lower in the center. Furthermore, the ESV of each land use type has passed the sensitivity test, indicating strong credibility in the results.

**Key words** karst mountainous area, land use change, ecosystem service value, multi-scenario simulation, PLUS model, Puding county

(编辑 黄晨晖)

(上接第 543 页)

development is strictly controlled by tectonics and lithology, indicating that the overall geomorphic evolution of the study area has reached the mature stage. In the area where calcareous conglomerate is distributed, the drainage basin landforms exhibit significantly higher HI values than the regional average due to the highest solubility of the rock mass. This results in geomorphic evolution predominantly in the youthful stage, corresponding to active karst development. However, the low degree of actual evolution of karst landforms in these basins highlights a tectonically induced geomorphic rejuvenation process. The core of the Gaojiachang Anticline and the limbs of the Nanbaoshan Syncline, characterized by intensive structural fracture development, actively respond to tectonic uplift and are currently undergoing geomorphic rejuvenation.

These results reveal significant differences in spatial distribution patterns and formation-evolution models between red-bed karst and carbonate karst. This study examines the spatial differentiation characteristics of red-bed karst and its primary developmental drivers, thereby enriching the theoretical framework of red-bed karst research. The findings provide a theoretical basis for analyzing potential red-bed karst hazards in transportation and water diversion projects in this region.

**Key words** red-bed karst, the Dadu-Minjiang water diversion project, karst morphological characteristics, western Sichuan foreland basin, the Longmenshan Fault Zone

(编辑 张玲)