

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.03.013

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.03.013

李俊一, 杨慧, 马语婕, 等. 基于FLUS-InVEST模型的珠江流域多情景土地利用变化及生态系统服务评估[J]. 水土保持学报, 2026, 40(3): 253-265.

LI Junyi, YANG Hui, MA Yujie, et al. Assessment of multi-scenario land use change and ecosystem services in pearl river basin based on FLUS-InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 253-265.

## 基于FLUS-InVEST模型的珠江流域多情景 土地利用变化及生态系统服务评估

李俊一<sup>1,2</sup>, 杨慧<sup>1,2</sup>, 马语婕<sup>1</sup>, 唐帅<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>

(1. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南大学国际喀斯特联合研究中心, 昆明 650500)

**摘要:** [目的] 当前大型流域尺度多情景土地利用变化对生态系统服务的耦合影响研究相对不足。[方法] 以珠江流域为研究区域, 基于2000年、2010年和2020年3期土地利用数据, 设定自然发展、生态保护与耕地保护3种情景, 运用FLUS模型模拟2040年土地利用格局, 并结合InVEST模型评估碳储量、产水量与土壤保持3项关键生态系统服务的时空变化。[结果] 不同情景下土地利用结构差异显著, 自然发展情景中建设用地扩张导致生态用地持续萎缩, 生态保护情景有效维持林草植被规模, 耕地保护情景则在保障耕地的同时仍对林灌资源构成转耕压力; 生态系统服务对土地利用变化的响应各异, 生态保护情景在碳储量和土壤保持方面表现最优, 而产水量增幅最小, 反映出生态用地对水源涵养功能的调节作用, 单一耕地保护政策难以全面提升生态系统服务功能; 生态系统服务空间分布呈现“总体稳定、局部敏感”特征, 变化热点区与人类活动密集区高度吻合。[结论] 研究结果揭示了不同政策导向下珠江流域土地利用变化对生态系统服务的影响机制, 可为流域国土空间优化与生态管理策略制定提供科学依据。

**关键词:** 珠江流域; FLUS模型; InVEST模型; 土地利用变化; 多情景模拟; 生态系统服务

中图分类号: X826; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)03-0253-13

## Assessment of Multi-Scenario Land Use Change and Ecosystem Services in Pearl River Basin Based on FLUS-InVEST Model

LI Junyi<sup>1,2</sup>, YANG Hui<sup>1,2</sup>, MA Yujie<sup>1</sup>, TANG Shuai<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. International Joint

Research Center for Karstology, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** [Objective] Currently, research on the coupled impacts of multi-scenario land use change on ecosystem services at the scale of large river basins is relatively insufficient. [Methods] The Pearl River Basin was selected as the study area. Based on land use data from three periods (2000, 2010, and 2020), three scenarios (natural development, ecological protection, and cultivated land protection) were established. The FLUS model was employed to simulate the land use pattern in 2040, and the InVEST model was used to assess the spatiotemporal changes in three key ecosystem services: carbon storage, water yield, and soil conservation. [Results] The land use structure differed significantly under different scenarios. Under the natural development scenario, the expansion of construction land led to the continuous shrinkage of ecological land. The ecological protection scenario effectively maintained the scale of forest and grass vegetation, while the cultivated land protection scenario, although ensuring the preservation of cultivated land, still exerted conversion pressure on forest and shrub resources. Ecosystem services responded differently to land use change. The ecological protection scenario performed optimally in terms of carbon storage and soil conservation, but showed the smallest increase in water yield, reflecting the regulatory role of ecological land in water conservation. A single cultivated land protection

收稿日期: 2025-09-28

修回日期: 2025-11-20

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-15

资助项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作项目(42361144885); 广西重点研发计划项目(桂科AB22035004)

第一作者: 李俊一(2004—), 男, 硕士研究生, 主要从事土地利用研究。E-mail: Lijunyi0717@163.com

通信作者: 杨慧(1981—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境地质研究。E-mail: karstyanghai@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

policy was insufficient to comprehensively improve ecosystem service functions. The spatial distribution of ecosystem services exhibited the characteristics of "overall stability and local sensitivity", and change hotspots were highly consistent with areas of intensive human activity. [Conclusion] The findings reveal the influencing mechanisms of land use change on ecosystem services in the Pearl River Basin under different policy orientations, thereby providing a scientific basis for optimizing territorial space and formulating ecological management strategies in the river basin.

**Keywords:** Pearl River basin; FLUS model; InVEST model; land use change; multi-scenario simulation; ecosystem services

**Received:** 2025-09-28

**Revised:** 2025-11-20

**Accepted:** 2025-12-15

**Online**(www.cnki.net): 2026-01-15

土地利用与土地覆被变化(land use and land cover change, LUCC)是全球环境变化与区域可持续发展研究中的核心议题之一。作为自然过程与人类活动共同作用的结果,LUCC不仅重塑地表景观格局,更深刻影响区域生态系统服务功能的供给能力。随着全球城市化与工业化进程的加快,土地利用格局的演变对区域生态系统服务供给及生态安全格局的塑造愈加重要。已有研究<sup>[1-2]</sup>表明,LUCC是驱动碳循环、土壤侵蚀、水文调节和生物多样性变化的关键因素。因此,在快速城市化与生态保护双重背景下,模拟与预测未来土地利用变化,并结合多情景生态系统服务评估,已成为当前地理学与生态学领域的研究前沿<sup>[3-5]</sup>。

近年来,随着地理信息系统(GIS)、遥感(RS)及空间模拟技术的进步,涌现出多种土地利用变化预测模型。其中,FLUS(Future Land Use Simulation)模型结合了人工神经网络(ANN)、元胞自动机(CA)和马尔可夫链方法,能够有效处理复杂非线性驱动因子关系与空间异质性,已被广泛应用于区域LUCC模拟研究<sup>[6]</sup>。该模型能够基于历史土地利用演变规律及驱动因子,预测不同情景约束下的未来土地利用空间配置;同时,生态系统服务作为衡量土地利用生态效应的重要指标,通常借助生态模型进行定量评估。InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型凭借着其适中的数据需求、合理的模块化设计,成为国际上广泛使用的生态系统服务评估工具之一<sup>[7-8]</sup>。该模型能够对不同时期、不同情景下的碳储量、产水量、土壤保持和生境质量等服务进行空间化定量计算,为土地利用变化的生态效应提供科学评估依据<sup>[9]</sup>。

目前,已有大量研究将LUCC模拟与生态系统服务评估相结合,用以探讨不同发展情景下区域生态环境的演变规律。基于FLUS与InVEST等模型的多情景模拟,能够较好地揭示土地利用变化对碳储量、产水量、土壤保持和生境质量等服务功能总量与空间

格局的影响,并识别其时空分异特征。例如,不同地区的实证研究发现,自然发展情景通常导致建设用地扩张、生态用地减少,从而加剧生态系统服务退化;而生态保护情景则有助于恢复林草地,提升碳储量和水土保持功能;耕地保护情景在维持粮食安全方面成效显著,但对生态服务提升作用有限<sup>[10-17]</sup>。这些成果不仅验证了FLUS-InVEST模型在区域土地利用与生态系统服务耦合研究中的适用性,也为我国不同区域的土地空间规划提供了科学参考<sup>[10]</sup>。

然而,现有研究<sup>[11,18-22]</sup>在大型流域尺度上仍存在一定不足。多数成果集中于城市或省域尺度,对跨区域、跨地貌梯度、同时兼具城市化压力与生态敏感性的综合性流域关注相对较少;而珠江流域作为我国南方最具代表性的综合性大流域,其上游承担生态屏障功能,中游是粮食与林草生产区,下游则是全国经济最活跃的城市群之一,不同区域的发展目标明显不同,使得土地利用变化对生态系统服务的响应规律呈现显著复杂性。

此外,尽管已有研究采用多情景方法开展LUCC模拟,但多数研究仍侧重于描述土地利用结构的变化趋势,缺乏在统一框架下对不同情景下土地利用变化与碳储量、产水量、土壤保持等多项生态系统服务之间耦合关系的系统对比。特别是在珠江流域这种自然过程与人为过程强度均高、生态功能与发展需求并存的区域,多情景模拟与生态系统服务综合评估的研究仍然有限。

在快速城市化、生态保护、耕地保护等多重驱动叠加的背景下,珠江流域未来土地利用演变及其生态效应应具有显著的不确定性,不同政策导向下土地利用变化特征与生态系统服务之间的协调关系尚未得到充分揭示。珠江流域集“上游生态屏障-中游农业生产-下游高度城市化”三重功能于一体,区域差异显著,自然过程与人类活动交互作用强烈,使得土地利用变化对碳储量、产水量和土壤保持等生态系统服务的响应更为

敏感。已有研究<sup>[10-12]</sup>虽已开展多情景土地利用模拟与生态系统服务评估,但多数研究仍聚焦于城市或省域尺度,缺乏在大型流域范围内构建统一框架,对不同情景约束下LUCC变化与多项生态系统服务之间的耦合关系进行系统比较,特别是在珠江流域这一自然环境复杂、土地利用冲突突出且生态功能敏感的区域,多情景驱动的LUCC-生态系统服务联合评估仍显不足。

因此,在珠江流域开展面向未来的多情景土地利用模拟,并从生态系统服务视角揭示不同政策导向下的生态响应,不仅具有重要科学意义,也对流域国土空间规划、生态保护红线布局和区域高质量发展具有现实价值。鉴于此,本研究基于2000年、2010年和2020年3期土地利用数据,构建自然发展、生态保护与耕地保护3类具有代表性的未来情景,利用FLUS模型模拟2040年土地利用格局,并结合InVEST模型定量评估碳储量、产水量与土壤保持等关键生态系统服务的时空变化。旨在揭示珠江流域未来土地利用

格局的可能演变路径及其生态效应,为珠江流域土地资源的可持续利用、国土空间结构优化及生态系统服务功能提升提供科学依据与决策参考<sup>[16,23]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

珠江流域(21°31'~26°49'N,102°14'~105°53'E)位于中国南部,地跨云南、贵州、广西、广东、湖南和江西6省区(图1),总面积约45万km<sup>2</sup>,是中国境内面积第3、年径流量第2的大河,约占全国水资源总量的6%<sup>[24]</sup>。该流域由西江、北江和东江三大水系构成,在广州附近汇入珠江口,最终注入南海。干流全长约2 214 km,年平均径流总量超过3 300亿m<sup>3</sup>,水资源禀赋优越。流域地势总体呈西北高、东南低的特点,上游属云贵高原边缘地带,以山地丘陵为主,地形起伏较大;中游过渡为丘陵与盆地相间分布,地形起伏相对平缓;下游则为珠江三角洲冲积平原,地势低平,河网密布,是我国最具代表性的三角洲平原之一。



图1 珠江流域分布位置

Fig.1 Location of Pearl River basin

流域属亚热带季风气候,气候温暖湿润、四季分明。年平均降水量1 600~2 300 mm,时空分布不均,雨季集中于4—9月<sup>[25]</sup>,占全年降水量的80%以上。夏秋季节常受台风影响,对区域水文过程与土地利用格局产生显著影响。年平均气温普遍在15~22℃,自西北向东南递增,光热条件优越,适宜多种农作物与森林植被生长。复杂的地形与气候组合,使珠江流域在维持区域生物多样性、涵养水源与防治水土流失方面具有重要生态功能<sup>[7]</sup>。

流域内经济发展水平差异显著,下游珠江三角洲地区是中国最重要的城市群与制造业基地之一。广深港澳城市群工业发达、城市化水平高,人口密集、建设用地扩张迅速<sup>[26]</sup>。而上游与中游地区经济发展水平相对滞后,却承担着重要的粮食生产与生

态屏障功能。这一特征使得珠江流域成为开展土地利用情景模拟与生态系统服务评估的典型区域。

### 1.2 数据来源与预处理

研究所用的3期土地利用数据(2000年、2010年和2020年)来源于YANG等<sup>[27]</sup>的1990—2020年中国土地覆盖数据集,根据研究区特征将土地利用类型划分为林地、草地、灌木、耕地、水域、裸地和建设用地7类。数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云平台,并基于此提取坡度与坡向信息。降水数据来源于国家青藏高原数据中心,其中降水侵蚀性因子 $R$ 利用1980—2020年逐年降水数据计算得到。潜在蒸散量数据则来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心。土壤数据来自国家地球系统科学数据中心-土壤分中心,包括土壤质地、有机碳含量等指

标。交通与水系数据来源于 DAVIS 等<sup>[28]</sup>的相关研究。道路、铁路与河流数据均为矢量格式,通过计算到公路、铁路及河网的欧式距离,生成连续栅格因子。社会经济数据(人口、GDP)均来源于国家基础地理信息数据库。所有数据的来源见表 1。

所有数据的空间分辨率统一为 500 m×500 m,且均经投影转换与统一栅格化处理,采用 WGS1984\_UTM\_Zone\_49N 坐标系,并统一至相同空间范围与像元大小,以保证数据一致性及模型输入的兼容性(图 2)。

表 1 数据来源信息

Table 1 Information of data sources

| 数据类型         | 数据名称                         | 数据来源   |
|--------------|------------------------------|--|
| 土地利用数据       | 土壤类型                         | <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a>  |
|              | 土地利用类型                       | <a href="https://soil.geodata.cn">https://soil.geodata.cn</a><br><a href="https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021">https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021</a> |
| 自然因子         | DEM                          | <a href="https://www.gscloud.cn">https://www.gscloud.cn</a>  |
|              | 坡向                           |  |
|              | 坡度                           |  |
| 土地利用变化驱动因子数据 | 年平均气温                        | <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a>  |
|              | 年平均降水量                       | <a href="http://www.ngcc.cn">http://www.ngcc.cn</a>  |
|              | 人口密度                         | <a href="https://stevenjdavis.com">https://stevenjdavis.com</a>  |
|              | GDP                          |  |
| 生态系统服务功能评估数据 | 距公路/铁路/河网距离                  | <a href="https://www.fao.org/home/en/">https://www.fao.org/home/en/</a><br><a href="https://soil.geodata.cn">https://soil.geodata.cn</a>                           |
|              | 降水侵蚀性因子( <i>R</i> )          |  |
|              | 土壤可蚀性因子( <i>K</i> )          |  |
|              | 潜在蒸散量                        |  |
|              | 土壤质地数据(砂粒占比、粉粒占比、黏粒占比、有机碳含量) |  |

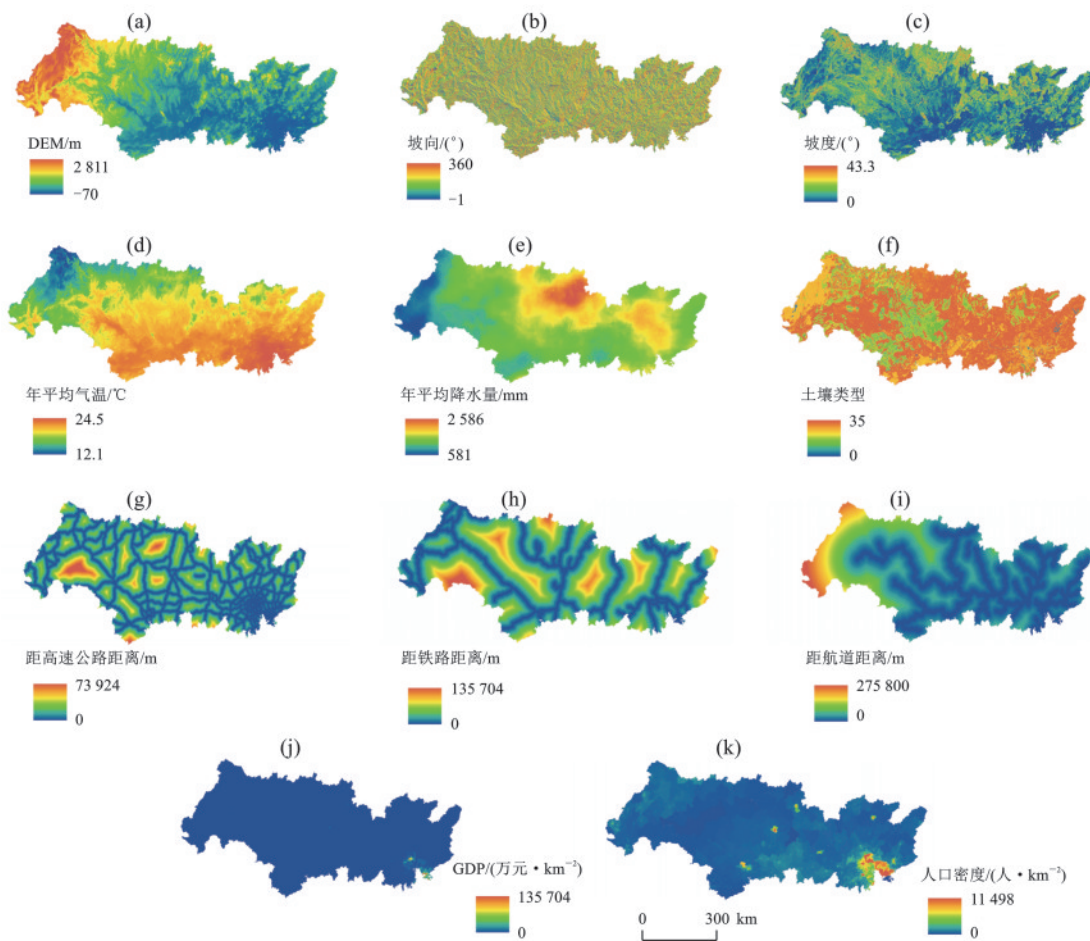


图 2 自然及社会因子空间分布

Fig.2 Spatial distribution of natural and social factors

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

1.3 模型方法

1.3.1 土地利用变化多情景模拟 FLUS 模型是在传统元胞自动机基础上发展的一种土地利用变化空间模拟方法,可综合自然、区位及社会经济等驱动因子影响<sup>[6]</sup>。模型利用人工神经网络训练基期土地利用与驱动因子数据,获取各类用地适宜性概率,并结合未来用地需求、转换规则、邻域权重、自适应惯性系数与转换成本,采用改进轮盘赌竞争机制进行像元转换,从而生成未来土地利用空间格局<sup>[6,11]</sup>。模型主要计算过程为:

1) 基于神经网络的适宜性概率计算。神经网络算法(ANN)包括预测与训练阶段,由输入层、隐含层和输出层组成,计算公式<sup>[29]</sup>为:

$$\rho(p, k, t) = \sum_j w_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-net_j(p,t)}} \quad (1)$$

式中: $\rho(p, k, t)$ 为第  $k$  类地类在栅格  $p$ 、时间  $t$  上的适宜性概率; $w_{j,k}$ 为隐藏层和输出层之间的自适应权重; $net_j(p, t)$ 在隐含层中表示神经元  $j$  在时间  $t$  从栅格单元  $p$  上所接收的信号。

2) 自适应惯性系数。自适应惯性系数由每类土地的现状数量与未来需求决定,并在迭代过程中进行自适应调整使各地类数量向需求目标发展<sup>[30]</sup>。第  $k$  类地类在时间  $t$  上的自适应惯性系数  $A_{ik}^t$  为:

$$A_{ik}^t = \begin{cases} A_{ik}^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ [6pt] A_{ik}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ [10pt] A_{ik}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_k^{t-1}$ 、 $D_k^{t-2}$ 分别为  $t-1$ 、 $t-2$  时第  $k$  类地类栅格数量与需求量之间的差值。

3) 邻域因子与权重。邻域因子表示不同地类间以及邻域范围内不同土地利用单元间的相互作用<sup>[31]</sup>,其表达式为:

$$\Omega_{p,k} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k \quad (3)$$

式中: $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 表示在  $N \times N$  的 Moore 邻域窗口中,上一次迭代结束后第  $k$  类地类的栅格总数; $w_k$ 为各地类邻域作用的权重。本文采用  $3 \times 3$  Moore 邻域,CA 迭代次数为 200 次。根据已有研究<sup>[11,13]</sup>经验与研究区土地利用特征,对各地类邻域权重赋值并反复调试,耕地、林地、灌木、草地、水域、裸地、建设用地邻域作用权重赋值分别为 0.46、0.91、0.28、0.78、0.18、0.01、0.63。

结合研究区的自然地理特征及区域发展战略目标,本研究设置 3 种面向 2040 年的珠江流域土地利用情景,分别为自然发展情景(NDS)、生态保护情景(EPS)和耕地保护情景(FPS)<sup>[12,14-17]</sup>。自然发展情景中,不设额外限制条件,土地类型间可自由转换,模拟在既有发展趋势下的自然演变过程;生态保护情景中,以生态功能优先为导向,设定地类生态价值等级林地 > 灌木 > 草地 > 水域 > 耕地 > 裸地 > 建设用地,在自然发展的基础上,禁止高生态价值用地向低生态价值类型转换;耕地保护情景中,在生态保护情景的限制基础上,进一步强化耕地保护,禁止耕地向其他用地类型转化,同时允许除建设用地外的其他类型向耕地转化,以优先保障区域粮食安全(表 2)。

表 2 土地利用转移成本矩阵  
Table 2 Land use transfer cost matrix

| 项目 | 自然发展情景 |   |   |   |   |   |   | 生态保护情景 |   |   |   |   |   |   | 耕地保护情景 |   |   |   |   |   |   |
|----|--------|---|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|---|
|    | A      | B | C | D | E | F | G | A      | B | C | D | E | F | G | A      | B | C | D | E | F | G |
| A  | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1      | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B  | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0      | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1      | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C  | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0      | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1      | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D  | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0      | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1      | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| E  | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0      | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| F  | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| G  | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

注:A、B、C、D、E、F、G 分别为耕地、林地、灌木、草地、水域、裸地、建设用地;1 表示可以转换,0 表示不可以转换。

为评估模拟结果的可靠性,本研究基于历史期与基期土地利用数据对模拟精度进行验证,计算得到 Kappa 系数均为 0.71 (>0.6),表明 FLUS 模型在本研究区具有较高的模拟精度,能够适用于本研究

的多情景土地利用模拟。

1.3.2 生态系统服务功能评估 本研究采用 InVEST 模型,对珠江流域 3 项生态系统服务功能——碳储量、土壤保持量和产水量进行评估。该模型通过空间显式

的方法量化生态系统服务的供给与变化,适用于多情景下的土地利用变化影响分析 InVEST 模型即生态系统服务综合评估与权衡模型<sup>[32]</sup>。

1) 碳储量。生态系统的碳储量包括植被地上碳储量、植被地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机质碳储量<sup>[33]</sup>。本研究参考 InVEST 模型用户手册及相关研究成果<sup>[34-35]</sup>,确定了珠江流域各土地利用类型的碳密度(表 3)。碳储量的计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{total}}$ 为总体碳储量,t; $C_{\text{above}}$ 为植被地上碳储量,t; $C_{\text{below}}$ 为植被地下碳储量; $C_{\text{soil}}$ 为土壤碳储量,t; $C_{\text{dead}}$ 为死亡有机质碳储量,t。

表 3 各土地利用类型碳密度

Table 3 Carbon density of different land use types

| 类型   | $C_{\text{above}}$ | $C_{\text{below}}$ | $C_{\text{soil}}$ | $C_{\text{dead}}$ |
|------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 耕地   | 4.60               | 0.30               | 21.60             | 0                 |
| 林地   | 46.20              | 8.62               | 136.98            | 13.00             |
| 灌木   | 24.27              | 7.96               | 90.35             | 6.55              |
| 草地   | 2.33               | 7.30               | 43.72             | 0.10              |
| 水域   | 2.75               | 0                  | 144.13            | 0                 |
| 裸地   | 1.00               | 1.82               | 34.08             | 0                 |
| 建设用地 | 0.40               | 6.90               | 28.80             | 0                 |

2) 产水量。产水量模块基于 Budyko 水热耦合平衡原理,计算各栅格单元的年度产水量<sup>[8]</sup>。产水量的计算公式为:

$$Y(x) = \left[ 1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (5)$$

$$\frac{\text{AET}(x)}{P(x)} = 1 + \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} - \left\{ 1 + \left[ \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} \right]^w \right\}^{\frac{1}{w}} \quad (6)$$

$$\text{PET}(x) = K_c(l_x) \times \text{ET}_0(x) \quad (7)$$

$$w(x) = Z \times \frac{\text{AWC}(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (8)$$

式中: $Y(x)$ 为产水量,mm; $\text{AET}(x)$ 为珠江流域每个栅格单元的实际蒸散发量,mm; $P(x)$ 为降水量,mm; $\text{PET}(x)$ 为潜在蒸散发量,mm; $w$ 为自然气候下土壤性质的非物理参数; $K_c(l_x)$ 为植被蒸散系数; $\text{ET}_0(x)$ 为参考蒸散量,mm; $\text{AWC}(x)$ 为植物可利用水分含量,mm; $Z$ 为季节性因子<sup>[36]</sup>。本研究取  $Z=1.2$ <sup>[37]</sup>,该值经多次模拟验证与广东省水资源公报<sup>[25]</sup>数据吻合较好。

3) 土壤保持量。土壤保持量通过泥沙滞留比模块(SDR),基于通用土壤流失方程(USLE)估算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量,二者之差即为土壤

保持量<sup>[38]</sup>。土壤保持量的计算公式为:

$$\text{RKLS} = R \times K \times LS \quad (9)$$

$$\text{USLE} = R \times K \times LS \times C \times P \quad (10)$$

式中:RKLS为栅格单元潜在土壤流失量; $R$ 为降雨侵蚀力因子; $K$ 为土壤可蚀性因子; $LS$ 为坡度坡长因子; $\text{USLE}$ 为实际土壤侵蚀量; $C$ 和 $P$ 分别为植被覆盖因子和水土保持措施因子。 $C$ 、 $P$ 值可参考相关文献确定<sup>[39-41]</sup>。

本研究中,年降水量采用 2000—2020 年平均值。生物系数表的各参数根据相关研究<sup>[42]</sup>设置。植物可利用水分含量( $A_{\text{wc}}$ )通过经验模型估算<sup>[43]</sup>。同时,本研究将产水量核算结果与广东省和贵州省的水资源公报进行对比,将碳储量和土壤保持量的核算结果与现有研究进行对比,对比结果表明本研究核算结果在正常范围内,可用于下一步研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 珠江流域 2020—2040 年土地利用结构时空变化特征

基于 FLUS 模型的模拟结果(图 3)显示,2040 年珠江流域在 3 种情景下的土地利用格局既延续 2020 年的总体分布特征,也表现出显著的情景差异。林地始终是流域内优势地类,建设用地则高度集中于珠江三角洲地区与广西壮族自治区柳州市、来宾市等经济较为发达的地区。整体呈现以核心区向外“草地→建设用地→耕地→林地”的圈层式分布结构。

在自然发展情景下,城市化推进迅速,建设用地显著扩张,尤其集中在珠江三角洲等经济核心区。模拟结果显示,珠江流域 2020—2040 年,建设用地面积增加 2 848.50 km<sup>2</sup>,耕地面积增加 1 474.75 km<sup>2</sup>。而灌木面积大幅减少 2 833.00 km<sup>2</sup>,同时草地和水域面积也持续萎缩。该情景下生态用地被大量挤占,尤其灌木损失严重,反映出发展模式对区域生态造成的压力较大。

在耕地保护情景下,土地利用变化相对较为平稳,以保障耕地和抑制建设用地无序扩张为重点。与自然发展情景相比,该情景下建设用地的扩张速度得到明显减缓,且扩张范围主要局限于现有城市的边缘地带。林地和草地等生态用地的面积保持高度稳定,体现该情景在平衡发展与保护方面的积极作用。

在生态保护情景下,生态用地恢复与保护成为主导,林地和草地总面积占比在 2040 年将达到 68.80%,为 3 种情景中最高。空间上,森林恢复集中于生态脆弱的山区及自然保护区。部分原有的高效农耕地被转为生态用地,导致耕地面积的相应减少,显示该情景强调生态优先于农业生产的发展导向。

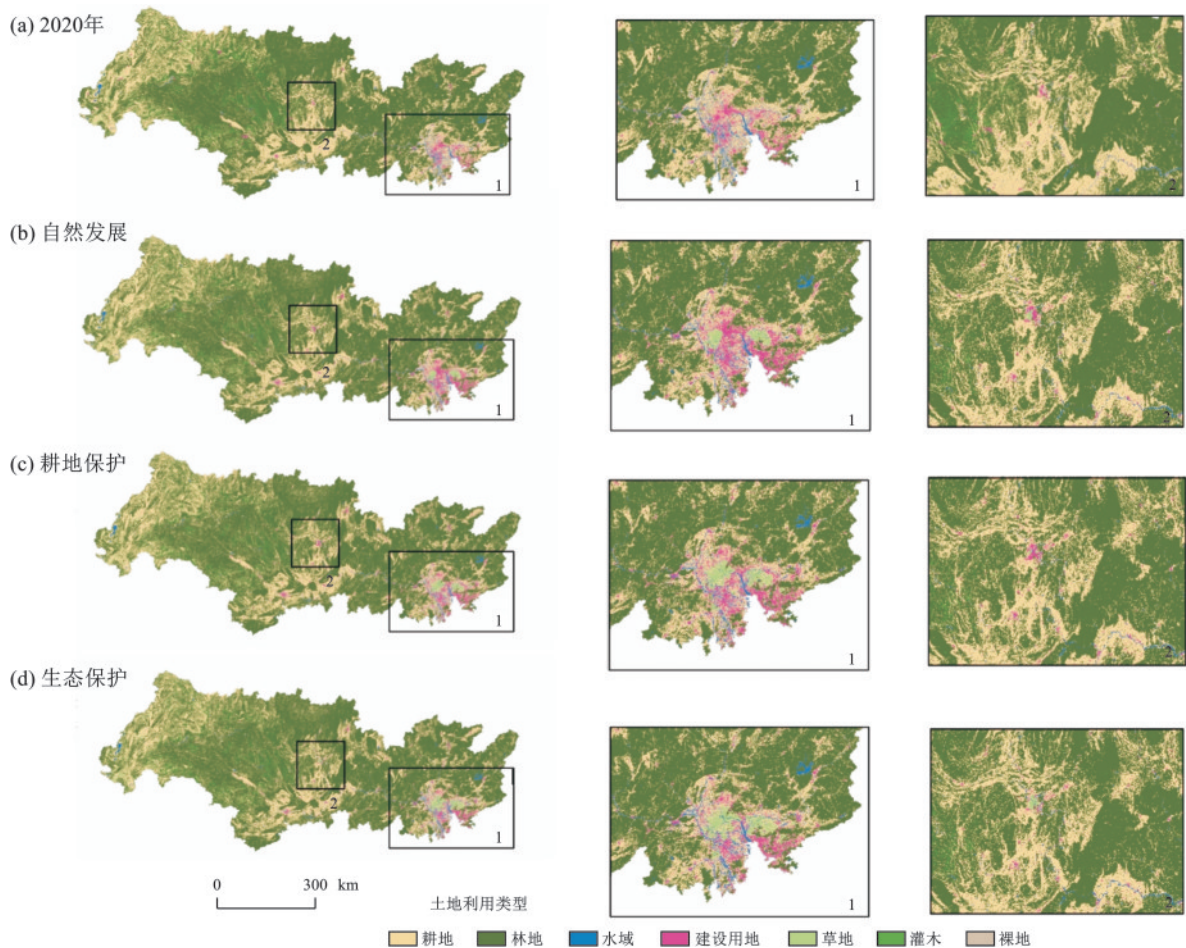


图3 2020年土地利用与2040年3种不同情景下土地利用模拟

Fig.3 Land use in 2020 and simulated land use under three scenarios in 2040

## 2.2 珠江流域2020—2040年不同情景下生态系统服务时空变化

2.2.1 生态系统服务供给量变化 2020—2040年,珠江流域3种情景下的生态系统服务指标表现出不

同的变化特征(表4)。总体来看,产水量在所有情景下均呈增加趋势,而碳储量和土壤保持量的变化则在不同情景中存在较为明显的差异,产水量的变化幅度相对最大,土壤保持量变化幅度则相对较小。

表4 2020年和2040年3种不同情景下的生态系统服务供给及其相对变化百分比

Table 4 Supply of ecosystem services in 2020 and 2040 under three different scenarios and their relative changes

| 指标      | 碳储量/( $10^8$ t) | 变化率/%  | 产水量/( $10^{11}$ m <sup>3</sup> ) | 变化率/% | 土壤保持量/( $10^{10}$ t) | 变化率/%  |
|---------|-----------------|--------|----------------------------------|-------|----------------------|--------|
| 2020年现状 | 2.677 4         |        | 2.913                            |       | 2.728 39             |        |
| 自然发展情景  | 2.675 1         | -0.085 | 2.933                            | 0.678 | 2.728 37             | -0.001 |
| 耕地保护情景  | 2.674 5         | -0.108 | 2.930                            | 0.571 | 2.728 54             | 0.006  |
| 生态保护情景  | 2.686 1         | 0.326  | 2.925                            | 0.413 | 2.728 53             | 0.005  |

具体而言,在自然发展情景下,碳储量下降  $2.289 \times 10^5$  t(降幅0.001%),土壤保持量减少  $2.050 \times 10^5$  t(降幅0.006%),而产水量则增加  $1.975 \times 10^8$  m<sup>3</sup>(增幅0.678%)。在耕地保护情景下,碳储量继续下降  $2.882 \times 10^5$  t(0.108%),土壤保持量小幅提升  $1.532 \times 10^6$  t(0.006%),产水量增长  $1.663 \times 10^8$  m<sup>3</sup>(0.571%)。相比之下,生态保护情景表现最优,碳储量增加  $8.720 \times 10^5$  t(0.326%),土壤保持量提升

$1.461 \times 10^6$  t(0.005%),均为各情景中最高;产水量增幅为  $1.203 \times 10^8$  m<sup>3</sup>(0.413%),略低于其他2种情景。

从情景对比来看,生态保护情景在多项生态系统服务中表现最为均衡。该情景下碳储量较其他情景显著增长,主要是因为林地和草地资源的有效保护与扩展,增强植被的固碳能力。尽管各情景下产水量普遍上升,生态保护情景的增幅最小,是由于在该情景下林地和草地面积扩大,且建设用地扩张受

到有效抑制,相较于其他情景增加面积最小,反映出林草等生态用地对水源涵养功能具有重要的维持作用。耕地保护情景在维持耕地面积和保障粮食安全方面作用明显,但碳储量下降幅度略高于自然发展情景,主要原因在于部分林地和灌木被转为碳密度较低的耕地,表明单一耕地保护政策对生态系统整体服务功能的提升有限。自然发展情景则呈现碳储量与土壤保持量下降、产水量略有上升的态势,与建设用地扩张最多、生态用地占比最低密切相关,反映出缺乏系统性生态调控的发展模式难以保障生态系统服务的稳定供给。

2.2.2 生态系统服务空间分布格局变化 2020—2040年,珠江流域3项生态系统服务在不同情景下的

空间格局虽总体保持相似,但各生态系统服务之间的空间分异特征仍存在明显差异。

具体而言,碳储量的高值区在3种情景下均主要分布于珠江流域中西部(广西西部和贵州省南部)、中东部(广西东部)及东部(广东省、江西省和福建省交界处)的山区丘陵地带,这些区域通常对应着森林覆盖度较高的林地。低值区则集中出现在云南省东南部、广西中部和广东省中部,其空间分布与建设用地和耕地的扩展范围高度吻合。从变化趋势来看,珠江三角洲地区单位面积碳储量在各种情景下均呈现增加态势,主要是因为该区域有较多建设用地和耕地转为草地。相比之下,西江、北江和东江流域的碳储量变化则相对平缓(图4)。

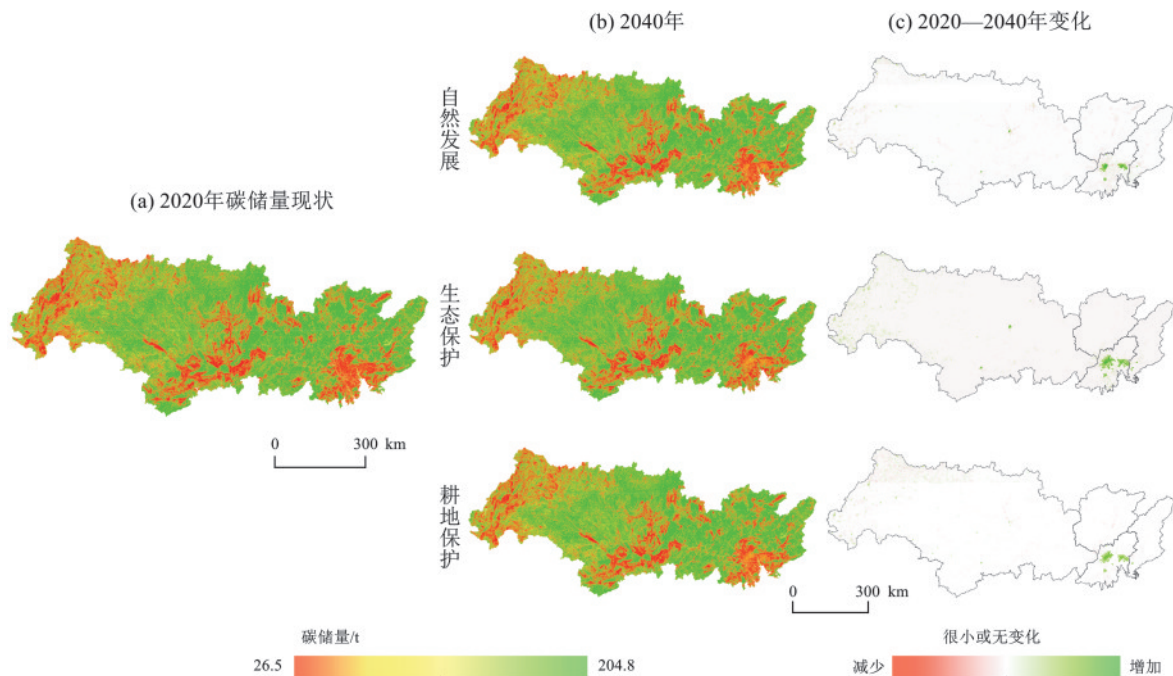


图4 珠江流域碳储量空间分布及其变化

Fig.4 Spatial distribution of carbon storage and its variations in Pearl River basin

产水量的空间分布与流域降水格局高度一致。高值区主要集中在流域北部(桂林市和柳州市)及东部(清远市和韶关市)等降水丰沛的区域;而低值区则分布在东南部珠江三角洲、西部(红河州、玉溪市、昆明市和曲靖市)和南部(南宁市和崇左市)等降水相对较少的区域。3种情景下,北江、东江和珠江三角洲流域的单位面积产水量普遍呈上升趋势,其中梅州市、河源市和广州市等东部地区增幅较为明显。西江流域的曲靖市和文山州等地上升幅度较小,而北部的河池市和桂林市则呈现下降趋势(图5)。产水量的增加主要发生在城区周边受城镇扩张影响的区域,这是因为不透水地表比例增高导致地表径流增加和蒸散发减少;此外,部分毁林造田和退耕还草

的地区也出现了产水量的上升,这主要是由于森林转变为其他地类后,植被蒸散耗水减少所致。

土壤保持量的高值区主要分布在流域北部(桂林市和柳州市)和东北部(贺州市、韶关市和清远市)的山地丘陵区,这些区域植被覆盖度高,以林地为主,受人类活动干扰较小。低值区广泛分布于南部平原地区(如百色市、南宁市、崇左市、佛山市、中山市等),这些区域建设用地和耕地集中,植被覆盖率低,人类活动干扰强烈。3种情景中,土壤保持量变化较为显著的区域多位于珠江三角洲以及各市中心城区周边,这些生态系统脆弱的区域对土地利用变化和人类活动干扰的响应尤为敏感(图6)。

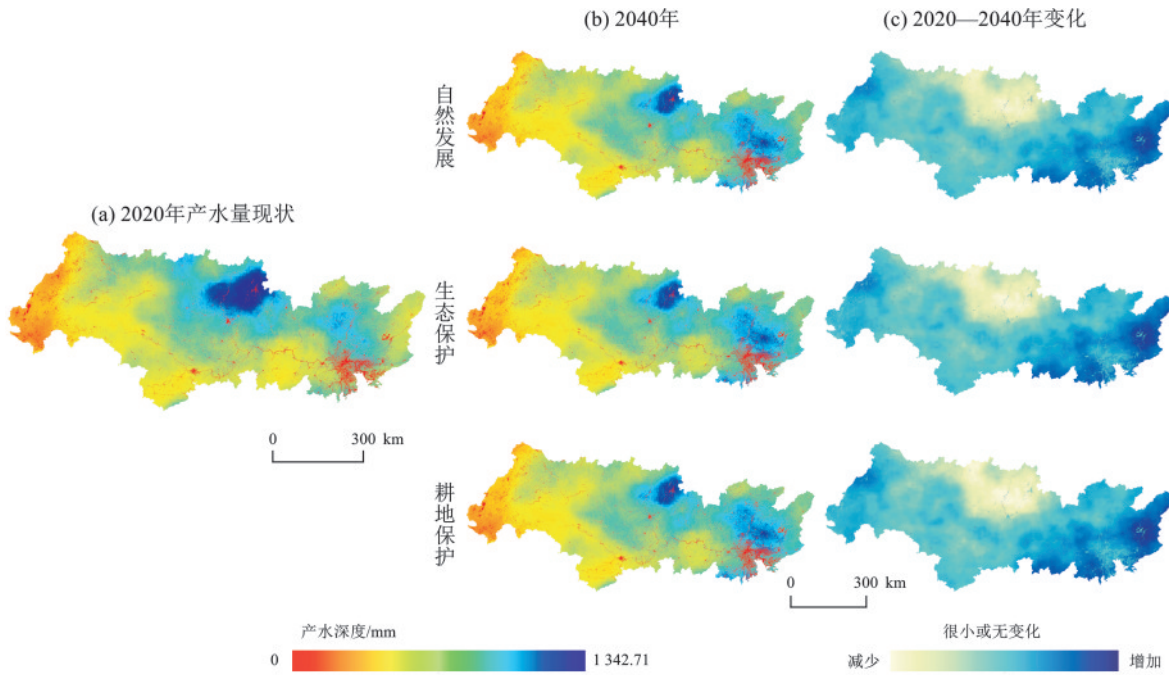


图 5 珠江流域产水深度空间分布及其变化

Fig.5 Spatial distribution of water yield depth and its variations in Pearl River basin

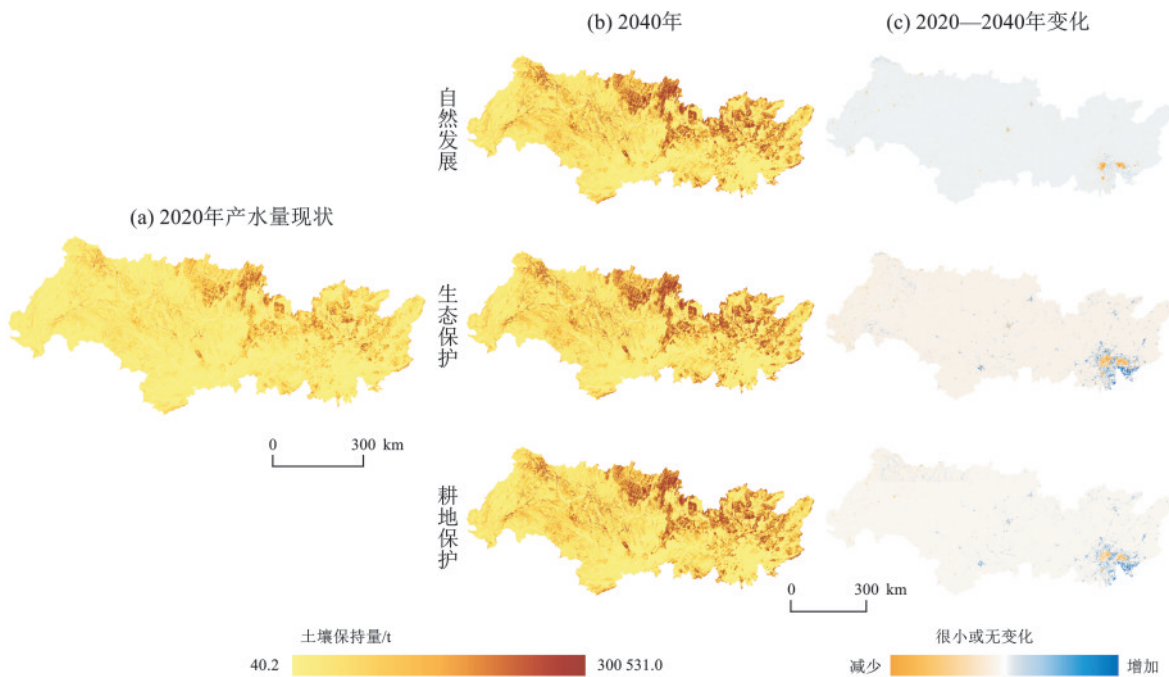


图 6 珠江流域土壤保持量空间分布及其变化

Fig.6 Spatial distribution of soil conservation and its variations in Pearl River basin

### 3 讨论

本研究通过耦合 FLUS 与 InVEST 模型模拟珠江流域在自然发展(NDS)、生态保护(EPS)和耕地保护(FPS)3种情景下2040年的土地利用格局,并评估其对碳储量、产水量与土壤保持等关键生态系统服务的影响。结果表明,不同政策导向对土地利用结构与生态系统服务功能具有显著调控作用,与研究区自然地理特征及发展阶段密切相关。

本研究设置的3类情景较好地反映了不同政策目标下土地利用格局的响应特征。自然发展情景下建设用地持续扩张、生态用地萎缩,与李媛等<sup>[44]</sup>在云贵高原的研究结论一致。生态保护情景通过限制高生态价值用地转出,有效促进林草生态系统的恢复,耕地保护情景在抑制建设用地无序扩张方面作用显著,但也因限制耕地转出而间接导致灌草面积下降,与邓光蔓<sup>[45]</sup>在粤北地区、贾艳红等<sup>[46]</sup>在漓江流域的

研究结果相互印证。值得注意的是,本研究设置的生态保护情景在碳储量、产水量和土壤保持量等方面均表现较优,说明在当前珠江流域生态本底压力较大的背景下,强化生态用地保护是提升生态系统服务的关键路径。

碳储量的变化与土地利用类型和碳密度密切相关。生态保护情景下碳储量增长主要得益于林地与草地面积的提升,与吴欣芋等<sup>[47]</sup>在西江清水河的研究结论类似;而耕地保护情景中碳储量下降幅度略高于自然发展情景,反映出单一耕地保护政策可能导致林灌等高效碳汇用地被侵占,进而削弱区域碳汇功能。产水量的情景差异主要受地表覆被变化影响:自然发展情景下建设用地扩张导致不透水地表增加,地表径流增大,产水量因而上升;生态保护情景下林草植被恢复增强冠层截留与土壤蓄水能力,反而使产水量增幅最小。土壤保持量的变化则与植被覆盖度和水土保持措施密切相关,生态保护情景下林草植被恢复有效减轻土壤侵蚀风险,提升土壤保持能力。

本研究进一步揭示3项生态系统服务在空间上的分异规律:碳储量高值区集中于森林覆盖率高的中西部与东部山区,低值区与城市扩展区高度重叠;产水量变化与降水格局及下垫面性质密切相关;土壤保持服务的高值区主要分布于植被完好的北部与东北部丘陵地带。此空间格局与熊国来等<sup>[48]</sup>在滇东南地区、黄贤凤等<sup>[49]</sup>在贵州省的研究结果高度吻合,说明流域内生态系统服务的空间分异具有较强的规律性和稳定性,为实施差异化生态修复与空间管控提供了科学依据。

尽管本研究在多情景模拟与生态系统服务评估方面取得一定进展,但仍存在一定局限性。首先,FLUS模型的模拟精度在很大程度上依赖于驱动因子的选择与情景设置的合理性,未来可考虑纳入更多元的社会经济驱动因子(如生态补偿政策、产业转型等),使情景设置更贴近现实决策。其次,InVEST模型作为一种静态评估工具,其部分参数(如碳密度、生物物理量表等)依赖于文献经验值,可能因区域差异带来一定误差,后续研究可通过实地采样与遥感数据相结合的方式参数本地化,以提升评估精度。需要特别指出的是,本研究采用的土地利用数据,在空间分辨率和分类精度上有待提高。分辨率偏粗会导致细微的土地利用变化信息遗失,例如,小规模耕地、破碎化林地的转换难以被有效探测;而分类体系偏粗则使得果园、茶园等具有独特生态功能的地类无法被准确识别。但由于所采用的公

开土地利用数据中缺乏此类细分类型,本研究未能将其作为独立地类予以考虑,可能导致对土地利用变化生态效应的评估存在偏差。未来研究可采用更高分辨率的遥感数据,或利用无人机多光谱技术进行重点区域补测,以构建更精细、地类更完备的土地利用本底数据。

## 4 结论

1)不同情景下的土地利用结构变化差异显著,较为直观地反映了政策目标对区域发展的深刻影响。在自然发展情景中,建设用地的快速扩张主要侵占灌木、草地等生态用地,导致生态空间不断萎缩,体现出以经济发展为主导的土地演变路径。生态保护情景则通过限制高生态价值地类转出,有效维持了林地、草地的规模,土地利用格局趋于稳定,生态功能得到较好维护。而在耕地保护情景下,尽管耕地资源得到严格保障,建设用地扩张也受到一定控制,但部分林地和灌木仍面临转耕压力,提示单一强调耕地保护可能难以兼顾整体生态系统的完整性。

2)3类生态系统服务对土地利用变化的响应表现出明显差异。碳储量仅在生态保护情景下有所提升(增加至 $2.686 \times 10^8$  t,增加 $8.720 \times 10^5$  t),而在自然发展和耕地保护情景中均出现下降,反映出生态用地保护对维持区域碳汇功能的关键作用。产水量在所有情景下均保持增长,与珠江流域降水充沛的背景相符;不过在生态保护情景下,由于植被恢复增强水分涵养能力,其增幅最为有限。土壤保持量的整体变化幅度虽小,但在珠江三角洲等人类活动密集区的响应较为明显,表明这些生态脆弱区对土地利用变化更为敏感。综合来看,生态保护情景有助于多项生态系统服务的协同提升,而单一的耕地保护政策难以实现生态功能的全面改善。

3)生态系统服务的空间分布呈现出“总体稳定、局部敏感”的典型特征。碳储量与土壤保持功能的高值区长期稳定分布于森林茂密的中西部和东部山区,构成珠江流域重要的生态屏障;产水量则主要受气候格局控制,高值区与多雨带高度吻合。在变化趋势上,各类服务的敏感区域均与土地利用剧烈转变区相对应:自然发展情景下,珠三角等快速城市化区域因生态用地被侵占,出现碳储量和土壤保持功能的明显衰退;而在生态保护情景下,部分生态脆弱区通过植被恢复实现服务功能的提升。这一空间规律表明,未来的生态保护与土地管理应依据不同区域的变化敏感性和功能重要性,实施精准、差异化的空间治理策略。

## 参考文献:

- [1] FOLEY JA, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [2] VERBURG P H, CROSSMAN N, ELLIS E C, et al. Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective [J]. *Anthropocene*, 2015, 12: 29-41.
- [3] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1172-1189.
- ZHANG Y S, WU D Y, LU X. A review on the impact of land use/land cover change on ecosystem services from a spatial scale perspective[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1172-1189.
- [4] 于德永, 郝蕊芳. 生态系统服务研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(8): 804-815.
- YU D Y, HAO R F. Research progress and prospect of ecosystem services[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(8): 804-815.
- [5] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [6] LIU X P, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [7] 李婷, 吕一河. 生态系统服务建模技术研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5287-5296.
- LI T, LU Y H. A review on the progress of modeling techniques in ecosystem services [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5287-5296.
- [8] InVEST User Guide—InVEST 3.9.0 documentation [EB/OL]. [2026-01-05]. <https://natcap.github.io/invest.release-metadata/3.17.2.html>.
- [9] OUYANG Z Y, ZHENG H, XIAO Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital[J]. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [10] 郑荣宝, 董玉祥, 陈梅英. 基于GECM与CA+ANN模型的土地资源优化配置与模拟[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 497-509.
- ZHENG R B, DONG Y X, CHEN M Y. Simulation on optimized allocation of land resource based on GECM and CA+ANN model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(3): 497-509.
- [11] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于FLUS-InVEST模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4473-4487.
- REN Y M, LIU X P, XU X C, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4473-4487.
- [12] 李井浩, 柳书俊, 王志杰. 基于FLUS和InVEST模型的云贵高原土地利用与生态系统服务时空变化多情景模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3): 287-298.
- LI J H, LIU S J, WANG Z J. Multi-scenario simulation of spatiotemporal changes of land use pattern and ecosystem services in Yunnan-Guizhou Plateau based on FLUS and InVEST models[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 287-298.
- [13] 邵壮, 陈然, 赵晶, 等. 基于FLUS与InVEST模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *生态学报*, 2022, 42(23): 9456-9469.
- SHAO Z, CHEN R, ZHAO J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [14] WU D F, MO J Z, ZENG L C, et al. Ecosystem services scenario simulation in Guangzhou based on the FLUS-InVEST model[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): e14054.
- [15] 何宇辰, 景晓栋, 孙媛媛. 基于FLUS模型的常州市土地利用多情景模拟与生态系统服务价值变化[J]. *湖北农业科学*, 2024, 63(11): 47-56.
- HE Y C, JING X D, SUN Y Y. Multi-scenario simulation of land use and changes of ecosystem service value in Changzhou City based on FLUS model[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2024, 63(11): 47-56.
- [16] 陈绮桐, 林锦耀. 多情景下珠江三角洲地区土地利用变化对生态系统服务的影响预测[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(5): 612-621.
- CHEN Q T, LIN J Y. Prediction of the impact of land use change on ecosystem service in the Pearl River Delta under different scenarios[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(5): 612-621.
- [17] LI Y X, LIU Z S, LI S J, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use and carbon storage changes in Changchun City based on FLUS and InVEST model[J]. *Land*, 2022, 11(5): e647.
- [18] 包逸涛, 吴朝明, 朱骊, 等. 耦合InVEST与FLUS模型的无锡市产水量时空变化与预测[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(3): 119-128.
- BAO Y T, WU C M, ZHU L, et al. Temporal and spatial variation and prediction of water yield in Wuxi City by coupling InVEST and FLUS models [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*,

- 2025,49(3):119-128.
- [19] 李雪,李文,高宇.基于FLUS-InVEST模型的大庆市土地覆盖模拟与碳储量评估[J].环境科学,2024,45(10):5983-5993.  
LI X, LI W, GAO Y. Land cover simulation and carbon storage assessment in Daqing City based on FLUS-InVEST model [J]. Environmental Science, 2024, 45(10):5983-5993.
- [20] 吴先雯,郭风成.基于Invest模型和Flus模型的江苏省碳储量变化模拟与预测[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(2):230-239.  
WU X W, GUO F C. Analysis and prediction of carbon storage changes in Jiangsu Province based on the Invest model and Flus model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(2):230-239.
- [21] 刘涛,张雪梅,林长存.基于InVEST与FLUS模型的准格尔旗水源涵养功能分析[J].草地学报,2023,31(12):3831-3840.  
LIU T, ZHANG X M, LIN C C. Functional analysis of water conservation in Zhungeer banner based on InVEST and FLUS models [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12):3831-3840.
- [22] 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 X J, CHE L G, HU B Q. 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.
- [23] ZOMER R J, XU J C, TRABUCCO A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database[J].Scientific Data,2022,9(1):e409.
- [24] 珠江水利委员会.2023年珠江片水资源公报[EB/OL]. [2024-10-09]. <http://www.pearlwater.gov.cn/zwgkcs/lygb/szygb/>.  
Pearl River Water Resources Committee.2023 Pearl River basin water resources bulletin [EB/OL]. [2024-10-09]. <http://www.pearlwater.gov.cn/zwgkcs/lygb/szygb/>.
- [25] 广东省水利厅.2023年广东省水资源公报[EB/OL]. [2024-05-20]. <https://slt.gd.gov.cn/szygb/index.html>.  
Department of Water Resources of Guangdong Province. 2023 Guangdong water resources bulletin [EB/OL]. [2024-05-20]. <https://slt.gd.gov.cn/szygb/index.html>.
- [26] 林媚珍,刘汉仪,周汝波,等.多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J].地理研究,2021,40(9):2657-2669.  
LIN M Z, LIU H Y, ZHOU R B, et al. Assessment and trade-offs of ecosystem services in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under multi-scenario simulation[J].Geographical Research,2021,40(9):2657-2669.
- [27] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J].Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925.
- [28] DAVIS S J, QIAN M, ZENG W. A comprehensive GIS database for China's surface transport network with implications for transport and socioeconomics research: w33515 [R].National Bureau of Economic Research,2025.
- [29] 林沛锋,郑荣宝,洪晓,等.基于FLUS模型的土地利用空间布局多情景模拟研究:以广州市花都区为例[J].国土与自然资源研究,2019(2):7-13.  
LIN P F, ZHENG R B, HONG X. Simulation of land use spatial layout based on FLUS model: A case study of Huadu district, Guangzhou [J]. Territory and Natural Resources Study, 2019(2):7-13.
- [30] 张晓荣,李爱农,南希,等.基于FLUS模型和SD模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟[J].地球信息科学学报,2020,22(12):2393-2409.  
ZHANG X R, LI A N, NAN X, et al. Multi-scenario simulation of land use change along China-Pakistan economic corridor through coupling FLUS model with SD model [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(12):2393-2409.
- [31] 秦琦瑞,李雪梅,陈庆伟,等.基于FLUS模型的天山山区未来土地利用变化预估[J].干旱区研究,2019,36(5):1270-1279.  
QIN Q R, LI X M, CHEN Q W, et al. Estimation of future land use change in the Tianshan mountainous based on FLUS model [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5):1270-1279.
- [32] GASHAW T, BANTIDER A, ZELEKE G, et al. Evaluating InVEST model for estimating soil loss and sediment export in data scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implications for land managers [J].Environmental Challenges,2021,5:e100381.
- [33] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.  
PIAO S L, FANG J Y, HE J S, et al. Spatial distribution of grassland biomass in China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4):491-498.
- [34] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合FLUS-InVEST模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2021,41(2):222-229.  
ZHU Z Q, MA X S, HU H. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou City by coupling FLUS-InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):222-229.
- [35] 赖晓凤,李和燕,李欢,等.基于PLUS-InVEST模型的

- 南涧县碳储量的时空演变与预测[J].湖北大学学报(自然科学版),2025,47(6):955-967.
- LAI X F, LI H Y, LI H, et al. Spatial and temporal evolution and prediction of carbon stocks in Nanjian County based on the PLUS-InVEST model[J].Journal of Hubei University (Natural Science),2025,47(6):955-967.
- [36] 潘丽娟.未来土地利用情景下的南京市生态系统水质净化功能模拟[D].南京:南京信息工程大学,2017.
- PAN L J. Simulation of water purification function of ecosystem in Nanjing City under future land use scenarios [D].Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology,2017.
- [37] 曹源飞,刘伟,赵世民,等.降雨和土地利用变化对抚仙湖流域产水量影响的多情景模拟研究[J].水文,2025,45(5):77-85.
- CAO Y F, LIU W, ZHAO S M, et al. A multi-scenario simulation study on the impact of precipitation and land use changes on water yield in the Fuxian Lake basin[J]. Journal of China Hydrology,2025,45(5):77-85.
- [38] 杨薇,靳宇弯,孙立鑫,等.基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度[J].自然资源学报,2019,34(12):2516-2528.
- YANG W, JIN Y W, SUN L X, et al. Determining the intensity of the trade-offs among ecosystem services based on production-possibility frontiers: Model development and a case study[J].Journal of Natural Resources, 2019,34(12):2516-2528.
- [39] 韩晶,崔金芳,杨威,等.基于InVEST模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析[J].水土保持研究,2022,29(5):32-39.
- HAN J, CUI J F, YANG W, et al. Analysis of soil erosion change and driving factors in low hilly areas based on InVEST model[J].Research of Soil and Water Conservation,2022,29(5):32-39.
- [40] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等.基于USLE的东江流域土壤侵蚀量估算[J].自然资源学报,2010,25(12):2154-2164.
- PAN M H, WU Y Q, REN F P, et al. Estimating soil erosion in the Dongjiang River basin based on USLE[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(12):2154-2164.
- [41] 张林,刘晓凤,林敏,等.RUSLE模型融合遥感影像的土壤保存量核算研究[J].价值工程,2025,44(22):148-150.
- ZHANG L, LIU X F, LIN M, et al. Research on soil conservation accounting using RUSLE model fused with remote sensing images [J]. Value Engineering, 2025, 44 (22):148-150.
- [42] YAN F P, SHANGGUAN W, ZHANG J, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters[J].Scientific Data,2020,7(1):e2.
- [43] ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J, et al. Distribution of available soil water capacity in China[J].Journal of Geographical Sciences,2005,15(1):3-12.
- [44] 李媛,彭玉玲,彭浩纳,等.基于InVSET-Ridge Regression-PLUS模型的云贵高原碳储量时空演变及多情景预测[J].环境科学,2026,47(3)1928-1940.
- LI Y, PENG Y L, PENG H N, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scenario prediction of carbon stock in the Yunnan-Guizhou Plateau based on the InVSET-Ridge Regression-PLUS Model [J]. Environmental Science, 2026,47(3)1928-1940.
- [45] 邓光蔓.2000—2020年粤北山区土地利用变化与生态系统服务动态分析与预测[D].广州:广州大学,2025.
- DENG G M. Dynamic analysis and prediction of land use change and ecosystem services in northern Guangdong from 2000 to 2020 [D].Guangzhou: Guangzhou University,2025.
- [46] 贾艳红,黄俊忠,吴春竹,等.基于PLUS-InVEST模型的漓江流域生态系统服务多情景评估研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2025,43(3):156-169.
- JIA Y H, HUANG J Z, WU C Z, et al. Multi-scenario ecosystem service assessment of Lijiang River basin based on PLUS-InVEST model[J].Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 43 (3):156-169.
- [47] 吴欣芋,覃盟琳,蒋红波,等.基于碳储量最大化的流域多目标土地利用分区优化模拟:以广西西江清水河为例[J].环境工程技术学报,2023,13(5):1752-1762.
- WU X Y, QIN M L, JIANG H B, et al. Simulation of land use zoning optimization under multi-objective scenarios based on maximizing carbon storage: Taking Qingshui River of Xijiang River in Guangxi as an example[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2023, 13(5):1752-1762.
- [48] 熊国来,吴学群,杨明龙,等.基于PLUS-InVEST模型的喀斯特地区碳储量时空变化及影响因素分析[J].水土保持研究,2025,32(6):307-315.
- XIONG G L, WU X Q, YANG M L, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of carbon storage in Karst regions based on PLUS-InVEST model [J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(6):307-315.
- [49] 黄贤凤,勾容,苏维词.贵州省生态系统服务权衡/协同与簇情景模拟[J].中国环境科学,2025,45(2):966-980.
- HUANG X F, GOU R, SU W C. Scenario simulation of ecosystem service tradeoff-synergy and bundles in Guizhou Province[J].China Environmental Science,2025,45 (2):966-980.