



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405590

引用格式:吴一帆,唐洋博,李玮,等.赤水河流域生态系统服务功能重点保护区识别研究[J].科学技术与工程,2025,25(18):7874-7883.

Wu Yifan, Tang Yangbo, Li Wei, et al. The priority protection areas of water-related ecosystem services in Chishui River Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(18): 7874-7883.

赤水河流域生态系统服务功能重点保护区识别研究

吴一帆^{1,2}, 唐洋博^{1,2*}, 李玮^{1,2}, 李翀^{1,2}, 耿晓君³, 曹燕^{1,2}

(1. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430014; 2. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 武汉 430014; 3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100032)

摘要 赤水河流域是长江上游重要的生态安全屏障,研究未来不同发展情境下赤水河流域的生态系统服务价值,对赤水河流域生态环境保护政策制定和环保措施布局具有重要意义。以赤水河流域为研究区域,利用 FLUS(future land use simulation)模型和 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型,预测 2040 年赤水河流域在自然发展、环境保护和经济发展三种情景下,产水、土壤保持和水质净化等生态系统服务功能,并识别赤水河流域生态系统服务功能重点保护区。结果表明,农田和城镇在不同情景下变化较大,其中经济发展情景较自然发展和环境保护情景分别增加 510.55 km² 和 1 475.76 km²;环境保护情景下高产水功能(>700 mm)和高土壤保持(>2 000 t/hm²)的区域分别约占赤水河流域面积的 36.81% 和 47.15%;遵义市辖区内的生态系统服务功能重点保护区占比最高达 62.65%。研究结果以期对赤水河流域明确重点保护区域,推动实现空间精细化保护和管理提供一定的支持。

关键词 生态系统服务; FLUS 模型; InVEST 模型; 情景预测; 赤水河流域

中图法分类号 X321;

文献标志码 A

The Priority Protection Areas of Water-Related Ecosystem Services in Chishui River Basin

WU Yi-fan^{1,2}, TANG Yang-bo^{1,2*}, LI Wei^{1,2}, LI Chong^{1,2}, GENG Xiao-jun³, CAO Yan^{1,2}

(1. National Engineering Center of Eco-Environments in Pan-Yangtze Basin, Wuhan 430014, China;

2. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China;

3. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design (GIWP), Ministry of Water Resources, Beijing 100032, China)

[Abstract] The Chishui River Basin has been recognized as an important ecological security barrier in the upstream of the Yangtze River Basin. Research on the ecosystem service value of the Chishui River Basin under different future development scenarios is of great significance to carry out the environmental protection policies and the environmental protection measures. Therefore, Chishui River Basin has been selected as the research area and the FLUS (future land use simulation) model and InVEST (integrated valuation of ecosystem services and trade off) model were functioned to predict the ecosystem services, including water yield, soil conservation, and water purification, under three scenarios, such as natural development, environmental protection, and economic development in 2040. The high ecosystem services functions in all three scenarios are identified as the key protected areas. The results show as follows. There are significant changes in agriculture area and urban area under different scenarios, especially, the agriculture area under the economic development scenario has increased 510.55 km² and 1 475.76 km² compared to the natural development and environmental protection scenarios, respectively. In the environmental protection scenario, the areas with high water yield (>700 mm) and high soil conservation function (>2 000 t/hm²) account for approximately 36.81% and 47.15% of the Chishui River basin area, respectively. The proportion of key protected areas for ecosystem services functions in the Zunyi City account for approximately 62.65%. The results of this study aim to provide certain support for identifying key protected areas in the Chishui River Basin and promoting the implementation of spatial refinement protection and management.

[Keywords] ecosystem services; FLUS model; InVEST model; scenario prediction; Chishui River

收稿日期: 2024-07-25 修订日期: 2025-03-28

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3203500); 中国三峡集团科研项目(NBWL202200489)

第一作者: 吴一帆(1992—), 男, 汉族, 江苏苏州人, 博士, 工程师。研究方向: 生态环境保护及生态价值评估。E-mail: wu_yifan92@126.com。

* 通信作者: 唐洋博(1991—), 男, 汉族, 湖南长沙人, 博士, 高级工程师。研究方向: 城市和区域环境系统模拟。E-mail: tang_yangbo@ctg.com.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

生态系统服务是由生态系统提供的人类生产和生活所必需的惠益^[1]。生态系统服务涉及整个生态环境的多个循环,包括物质、能量、信息和动态演化,且对环境变化极为敏感^[2]。大量研究显示,人类活动和气候变化是生态系统服务变化的主要原因。其中,土地利用变化通过改变生态系统格局,影响生态系统中物质流和能量流的传递,改变生态系统服务的时空特征;气候变化则通过改变气温、降水和辐射等气候因子,影响了生态系统从自然环境获取维持系统稳定的资源的路径,从而驱动生态系统服务变化^[3]。根据联合国组织的千年生态系统评估(millennium ecosystem assessment, MA)指出,20世纪后半叶,随着全球城镇化的高速发展和工业生产的规模逐渐扩大,生态系统提供的生态系统服务约有60%处于下降的趋势,极大地影响了全球的气候、水资源和土壤等资源的分布和质量^[4]。

随着科技的发展,基于遥感数据的模型方法逐渐成熟,其中InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)和FLUS(future land use simulation)模型分别为使用较为广泛和成熟的生态系统服务评估模型和土地利用预测模型^[5-6]。InVEST模型可用于评估生态系统提供的多种功能,包括产水、土壤保持、水质净化、固碳和粮食产量等。例如,刘树峰等^[7]利用InVEST模型杨溪河流域1995年、2005年和2015年不同土地利用情况下的水源涵养量和水源涵养服务价值变化特征;王珊珊等^[8]则利用InVEST模型发现了杭州湾南岸植被固碳能力的变化趋势;武翼飞等^[9]则根据InVEST模型对土壤保持功能的评估,提出了银顶格矿区的水土保持和防治策略。为了更好地为环境保护的管理和决策提供科学的支撑,利用FLUS模型预测未来的土地利用变化情况,再通过InVEST模型评估生态系统服务,成为学者们研究的重点。例如,邵壮等^[10]耦合FLUS与InVEST模型,对北京市生态系统碳储量时空演变与预测;刘金环等^[11]应用PLUS和InVEST模型测算贵阳市“两河一库”流域在未来自然发展情景和生态保护情景下的用地类型时空格局变化以及水质净化特征。然而,目前的FLUS和InVEST模型的耦合研究主要集中于土地利用为驱动的因素的固碳和生境质量评估,对气候变化存在影响的产水、土壤保持和水质净化功能研究不足,在一定程度上无法实现对未来生态系统服务变化的预测准确性较弱。

2021年,“推长办”指出“赤水河是长江上游唯一一条保持自然流态的一级支流,也是长江上游

众多珍惜特有鱼类的重要栖息地和繁殖场所,对构建长江上游重要生态安全屏障具有重大意义”^[12]。因此,通过模型的方法,研究赤水河流域在未来不同发展情境下的用地变化特征以及生态系统服务价值变化趋势,将对更好地指导赤水河流域生态环境保护政策的制定和措施的布局具有重要意义。

基于2000年和2020年赤水河流域两期土地利用数据,现应用FLUS模型,设置自然发展、环境保护和经济发展三种未来发展情景,并通过2000年和2020年的土地利用预测2040年赤水河流域不同情景下的土地利用特征。然后,基于Xu等^[13]制作的全国降尺度气象数据集,利用InVEST模型模拟2020年及2040年生态系统服务价值在三种情景下的特征。最后对2020年和2040年的生态系统服务评估结果进行对比,识别生态环境保护的重点区域,并提出环境质量提升策略,期望为赤水河流域的高质量发展提供一定的思路和支持。

1 研究区及数据来源

1.1 赤水河概况

赤水河是长江干流上游南岸的一级支流,干流全长437 km,发源于乌蒙山北侧,云南省镇雄县赤水源镇银厂村,因水体呈赤红色而得名赤水河^[14]。赤水河由西向东流经云南省、贵州省和四川三省,流域面积20 440 km²。其中,云南省境内流域面积2 117 km²(占流域总面积10.4%)、贵州省境内流域面积12 222 km²(占比59.8%)、四川省境内流域面积6 101 km²(占比29.8%)。赤水河流域处于云贵高原向四川盆地倾斜过渡的斜坡面之上,以高原和山地为主,地势西南高东北低,高程范围为196~2 207 m(图1)。

赤水河流域属亚热带季风气候区,冬干寒、夏热湿,最低-5℃,最高气温39℃,平均气温13.4~19.63℃。云贵川区域气候地域差异较大,整体表现出中、下游夏季炎热、冬季温和的特征^[15]。赤水河流域多年平均年降水量800~1 200 mm,主要集中于每年的6—9月,约占全年的70%。赤水河流域受季风气候的影响,年内径流分配不均,冬春10月至次年4月气候相对干燥,降水量较少,径流量也少;夏秋季5—9月温暖湿润,降水量较多,相应径流量也较多^[16]。

1.2 数据来源

本文研究用于驱动InVEST模型的气温、降水等气象数据来源于CMIP6 SSP126碳排放情景下(考虑全球各国正逐步制定完善的减碳方案,选择碳排放较低的气候情景进行模拟)的气象数据预测

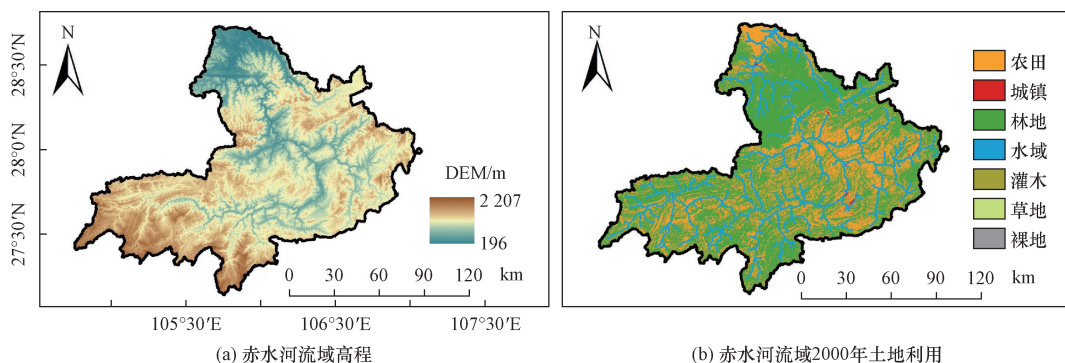


图1 赤水河流域的地理信息分布图
Fig. 1 Geographic information distribution of Chishui River Basin

数据集 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>), 该数据集经过 Xu 等^[13]降尺度处理后用于本次研究;2000 年和 2020 年土地利用数据来源于武汉大学杨杰和黄昕教授团队制作的中国 30 m 年度土地覆盖产品^[17];土壤类型、深度、成分数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>);区域边界数据和 DEM (digital elevation model) 数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心 (<http://www.dsac.cn/DataProduct/Index>);人口分布数据来源于 Worldpop 数据集 (<https://www.worldpop.org/>) 赤水河流域通过 SWAT (soil and water assessment tool) 模型建立,并依照安艳玲等^[18]相关研究所流域边界进行校准。所有数据重采样为 1 km × 1 km 分辨率。

2 研究方法

2.1 FLUS 模型

FLUS 模型是利用元胞自动机 (cellular automata, CA) 和神经网络算法 (artificial neural network, ANN) 等方法,用于模拟和预测不同情境下的土地利用变化以及未来土地利用情景的模型。FLUS 模型是在地理模拟与优化系统 (GeoSOS) 的基础上发展和优化形成的。本文研究采用 FLUS 模型软件^[19],FLUS 模型目前已被大量学者作为研究的工具,应用于地理、景观、生态和经济社会等领域的研究中^[20-22]。FLUS 模型的构建和预测流程:首先,应用气温、降水、人口、地形、交通、政策、经济等多种环境、经济社会为驱动力因子作为输入条件 (表 1),模型以这类驱动力因子生成适宜性概率集,既是不同土地利用类型在多重驱动力因子干扰下存在转换可能的概率;其次,FLUS 模型采用从某一期土地利用数据中采样的计算方式和自适应惯性竞争机制进行分析,实现多种土地利用类型在生态环境和经济社会活动共同影响下发生相互转换的高效处理。

表 1 FLUS 模型运行驱动数据说明

数据类型	数据名称	时间
自然环境数据	赤水河流域边界	2000 年、2020 年
	赤水河流域水系	
	高程数据	
	坡度数据	
经济社会	NDVI	2000 年、2020 年
	土地利用类型人口	
气候数据	气温降水	降尺度后的 CMIP6 SSP126 数据集 ^[13]

2.2 InVEST 模型

2.2.1 产水功能

InVEST 模型的产水模块是区域水源涵养能力和供水保证的重要组成部分,区域的产水量将影响居民的生活质量和生态系统的可持续性^[23]。模型中产水量是依据 Budyko 方法计算,所需要的输入数据包括降水、蒸散、根深和土地利用等^[24],模型主要算法如式(1)~式(3)所示。

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right)P_x \quad (1)$$

式(1)中: Y_{xj} 为网格 x 中土地类型 j 的年产水量; AET_{xj} 为网格 x 中土地类型 j 的实际蒸散量; P_x 为网格 x 的年降水量。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x + R_{xj}}{1 + \omega_x + R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad (2)$$

进一步的, AET_{xj}/P_x 为实际蒸散发与降雨的比值,主要通过 Budyko 方法得到; R_{xj} 为第 j 种土地利用类型在某一网格上的 Budyko 指数;式(2)中 ω_x 为植被蓄水量与降雨量的比值,在 InVEST 模型中根据植被可利用含水量 AWC_x 和降雨量 P_x 进行计算 $\omega_x = z(AWC_x/P_x)$,其中 z 为季节常数,范围在 1~10。

2.2.2 土壤保持功能

InVEST 模型中的土壤保持模块主要用于分析坡面土壤侵蚀和流域输沙空间过程特征^[25],土壤保

持功能是防治水土流失、保护、改良与合理利用山区、丘陵区 and 风沙区水土资源, 维护和提高土地生产力的保证, 对于赤水河流域具有重要意义^[26]。其主要原理是利用通用土壤流失方程 (universal soil loss equation, USLE) 计算, 即

$$SR_x = R_x K_x LS_x - R_x K_x LS_x C_x P_x \quad (3)$$

式(3)中: SR_x 为考虑植被拦截后的网格 x 的土壤实际侵蚀量; R_x 为降雨侵蚀力; K_x 为土壤可蚀性; LS_x 为坡度坡长因子; C_x 为植被覆盖因子; P_x 为土壤保持措施因子。

2.2.3 水质净化功能

InVEST 模型的水质净化模块主要用于评估生态系统中植被和不同土地类型对污染物的截留和释放能力^[27]。模型中主要针对总氮 (total nitrogen, TN) 和总磷 (total phosphorus, TP) 面源污染进行模拟, 其中, 模拟结果污染物负荷越高, 则水质净化水平越低^[28]。其主要算法如式(4)~式(6)所示。

$$A_{LV} = H_{SS} P_{ol} \quad (4)$$

$$H_{SS} = \frac{\lambda}{\bar{\lambda}_w} \quad (5)$$

$$\lambda = \lg \sum Y_u \quad (6)$$

式中: A_{LV} 为调整后污染物输出量; H_{SS} 为网格的水文敏感性得分; P_{ol} 为污染物输出系数; λ 为每个网格的径流系数; $\bar{\lambda}_w$ 为平均径流系数; $\sum Y_u$ 为河道的总产水量。

2.3 重点生态系统服务功能保护区识别

本文研究采用空间自相关方法分析识别赤水河流域重点生态系统服务功能。本文研究在 InVEST 模型模拟水相关生态系统服务功能的分布特征后, 应用 ArcGIS 软件中的空间自相关 (空间冷热

点分析模块), 识别不同情景下水相关生态系统服务功能集中的区域^[29]。值得注意的是, 与水源涵养功能和土壤保持功能数值高的为高服务功能区域不同, 水土保持和水质净化 (氮磷面源污染) 模块分析得到的结果中, 数值较低的区域生态系统服务功能较高。本研究首先通过对不同生态系统服务功能数值标准化在 $[0, 1]$ 的区间, 以便统一单位进行分析。进一步的, 本文研究认为 2040 年 3 种情景下均为高生态系统服务功能的集中区域, 可被识别为重点生态系统服务功能保护区。

2.4 情景设置

2.4.1 FLUS 模型校准

采用 2000 年和 2020 年的土地利用数据进行模型校准。以 2000 年的土地利用数据通过 FLUS 模型, 预测 2020 年的土地利用类型, 并将模拟结果和实际图像进行 Kappa 分析。Kappa 系数取值介于 0~1, 取值越大说明模拟结果与实际结果更相符, 一般 Kappa 系数在 0.8 以上, 即满足统计意义的预测预期。本研究预测和实际的对比图如图 2 所示, 其 Kappa 系数为 0.87, 符合模拟要求。

2.4.2 未来土地利用情景设置

利用 FLUS 模型, 通过调整不同的土地利用类型转换概率权重, 设置 3 种未来发展情景, 包括自然发展情景、环境保护情景和经济发展情景。其中, 自然发展情景是假设目前土地利用变化趋势保持不变进行预测的; 环境保护情景是通过降低生态用地 (林地、灌木、草地) 向其他用地类型 (农田、城镇、裸地) 转换的概率权重进行预测的; 经济发展情景则是增强其他用地 (林地、草地、灌木、裸地) 向经济性用地 (农田、城镇) 转换的概率权重进行预测的。此外, 需要说明的是, 研究中水域被认定为保持不变。不同情景的土地利用类型转换概率权重参数矩阵如表 2 所示。

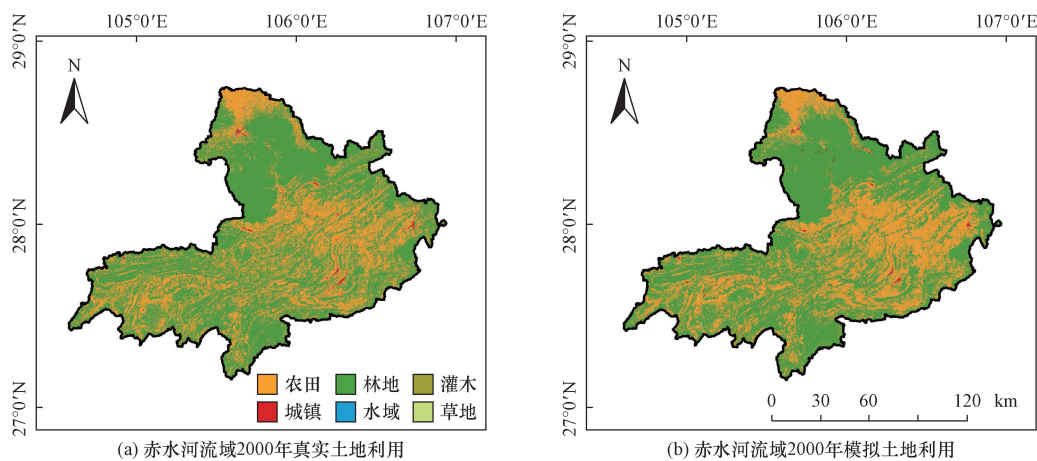


图2 土地利用预测校准结果
Fig. 2 Calibration results of land use prediction

表2 不同情景的土地利用类型转换概率权重参数矩阵

Table 2 Probability weight parameter matrix of land use type conversion in different scenarios

类型	自然发展情景						环境保护情景						经济发展情景					
	农田	林地	草地	灌木	水域	城镇	农田	林地	草地	灌木	水域	城镇	农田	林地	草地	灌木	水域	城镇
农田	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1
林地	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1
草地	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1
灌木	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
水域	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
城镇	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1

注:0和1表示土地利用类型之间的转换逻辑,其中1为可以转换;0为不能转换。

3 结果与讨论

3.1 不同情景土地利用变化特征

自然发展、环境保护和经济发展情景下,2040年赤水河流域土地利用预测结果如表3和图3所示。总量上来看(表3),不同情景下的林地依旧是赤水河流域土地利用占比最高的类型,均超过55%,不同情景下主要的土地利用变化在于农田和城镇土地利用类型。农田变化方面,自然发展和经济发展情景下农田面积较2020年均有所上升(由于未考虑永久基本农田面积和分布,环境保护情景下农田面积出现了下降),其中2040年经济发展情景

下农田面积增加最高,较自然发展和环境保护情景分别增加510.55 km²和1475.76 km²。3种情景下的城镇与农田土地利用变化趋势一致,2040年环境保护情景下的城镇面积和2020年保持一致,经济发展情景下较2020年城镇面积变化较大,约上升了95.12%,自然发展情景下城镇面积缓慢增加,约增长了43.91%。

空间上来看(图3),由于城镇占比较少,整体分布分散,呈现沿赤水河干支流分布的特征,2020—2040年各情景间变化趋势较不明显,不同情景下的主要变化区域在于赤水河流域中游(遵义市西部、泸州市东部),以及下游(泸州市赤水河流域北部)

表3 不同情景的土地利用类型面积及占比统计表

Table 3 Statistical table of land use type area and proportion in different scenarios

类型	2020 实际		2040 年					
			自然发展		环境保护		经济发展	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
农田	7 933.44	38.81	8 386.90	41.03	7 421.69	36.31	8 897.45	43.53
林地	12 184.57	59.61	11 746.11	57.47	12 840.27	62.82	11 282.26	55.20
灌木	186.38	0.91	136.38	0.67	33.22	0.16	48.03	0.23
草地	16.63	0.08	14.99	0.07	25.27	0.12	13.63	0.07
水域	35.28	0.17	35.28	0.17	35.28	0.17	35.28	0.17
城镇	83.71	0.41	120.33	0.59	84.27	0.41	163.35	0.80

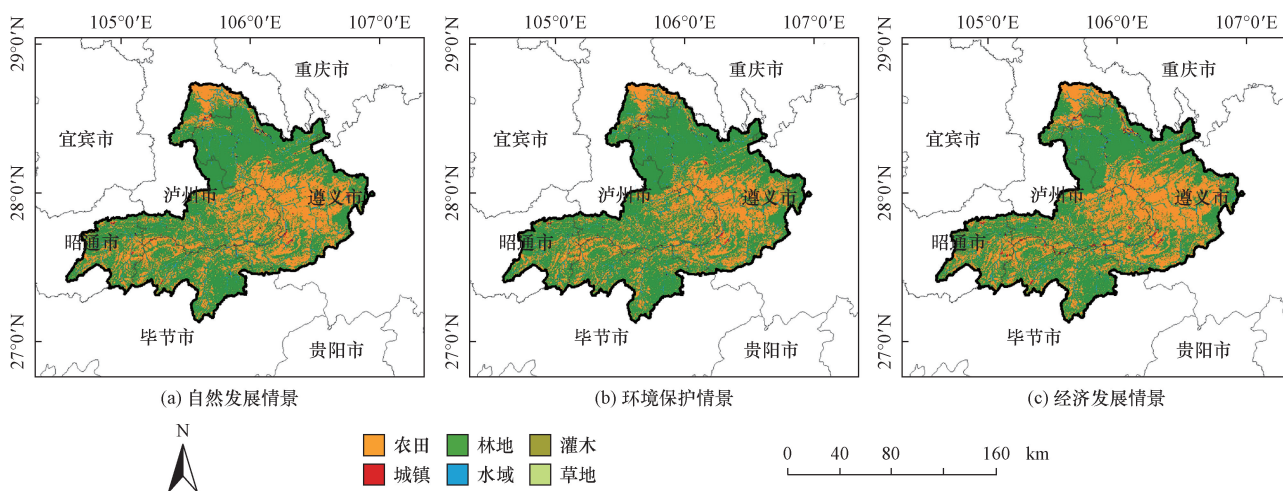


图3 不同情境下2040年赤水河流域土地利用变化

Fig. 3 Land use change of Chishui River Basin in 2040 under different scenarios

区域。农田的变化集中在中游(中部区域),2040年经济发展情景下农田主要集中在该区域,对比2020年土地利用分布图(图2),新增的农用地主要由林地转化而来。此外,赤水河流域下游(北部)的新增农田和城镇面积也较为突出,可能是未来赤水河流域保护的重点区域。

3.2 不同情景下水相关生态系统服务特征

从总量变化上来看,自然发展、环境保护和经济发展情景下,赤水河流域产水量分别约为 $769 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、 $917 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $710 \times 10^7 \text{ m}^3$;土壤保持量分别约为 $2\,723 \times 10^6 \text{ t}$ 、 $2\,416 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $2\,811 \times 10^6 \text{ t}$;总氮污染分别约为 $3\,875.12 \text{ t}$ 、 $3\,176.13 \text{ t}$ 和 $4\,588.19 \text{ t}$;总磷污染分别约为 789.84 t 、 654.32 t 和

897.18 t 。

从空间变化上分析,2040年不同情景下赤水河流域生态系统服务功能中产水功能和土壤保持功能的空间差异较大。总氮和总磷的面源污染分布在三种情景的分布保持较高的一致性,高面源污染风险区域主要沿着赤水河干支流河道分布,这与土地利用变化中城镇和农田的分布特征相关。总氮和总磷的分布也与污染物在环境中迁移的距离有关,有研究提出总磷在自然环境中的迁移距离较总氮较短^[30],因此从空间上看总磷污染风险较高区域的分布较总氮污染更集中。对于产水和土壤保持,环境保护情景下高产水功能($>700 \text{ mm}$)和高土壤保持功能($>2\,000 \text{ t}/\text{hm}^2$)区域占比更大,分别约占

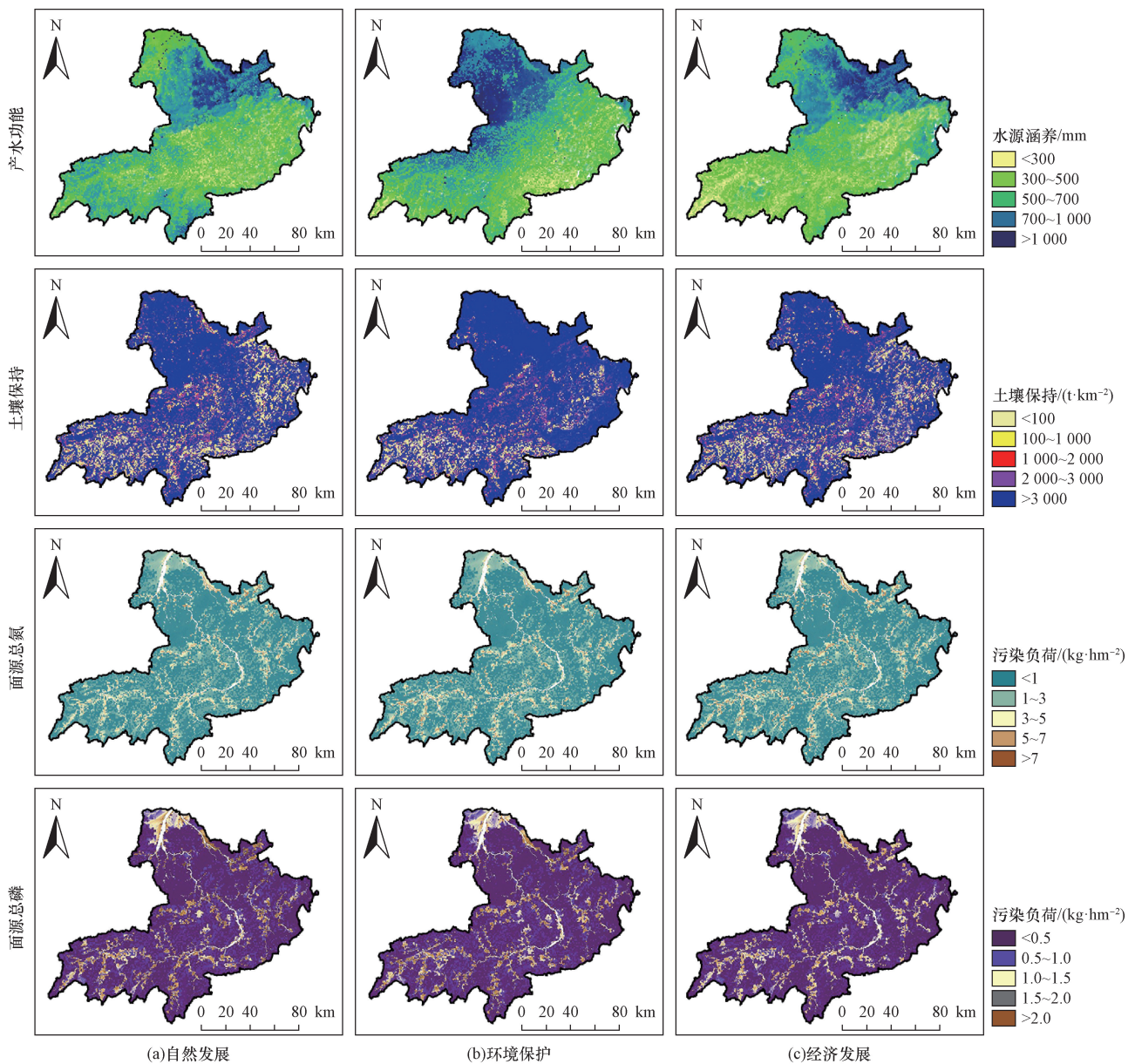


图4 2040年不同情景下赤水河流域水相关生态系统服务功能特征

Fig. 4 Characteristics of water-related ecosystem service functions in Chishui River Basin under different scenarios in 2040

赤水河流域面积的 36.81% 和 47.15%。高产水功能和土壤保持功能区域主要分布在赤水河流域中游和下游,上游由于山地为主,且主要为喀斯特地貌,土壤保持和产水功能较弱,结论与相关文献结论一致^[31-32]。对比来看,经济发展情景下高产水功能和高土壤保持功能区域占赤水河流域面积比例分别减少至 20.01% 和 31.23%。根据产生差异的主要区域判断,该现象发生的主要原因之一可能是经济发展情景下林地向农田大量的转化导致的。相关研究证实林地的产水和土壤保持功能高于其他土地利用类型^[33-34],因此林地的减少对赤水河流域生态系统服务功能的维持将产生较大的负面影响。

3.3 重点水相关生态系统服务功能保护区识别

首先对自然发展、环境保护和经济发展情景下的高生态系统服务区进行了识别,如图 5(a)~图 5(c)所示。结果发现,环境保护情景下的高生态系统服务区占赤水河流域面积较自然发展和经济发展情景较大,分布较广,整体占赤水河流域面积

的 41.57%。环境保护情景下高生态系统服务功能区集中在赤水河中游和下游,按照市域划分主要位于遵义市、泸州市、毕节市和昭通市,各市所辖范围内的高生态系统服务功能区占比分别为 61.24%、13.23%、13.12% 和 12.37% (极少部分位于重庆)。相较于环境保护情景,自然发展和经济发展情景下高生态系统服务功能区面积较小,分别占赤水河流域面积的 35.26% 和 33.47%。自然发展情景下,各市所辖范围内的高生态系统服务功能区域面积排序与环境保护情景一致,仍然为遵义市 > 泸州市 > 毕节市 > 昭通市。值得注意的是,经济发展情景下,赤水河上游的高生态系统服务功能区域面积显著萎缩,主要集中在毕节市,少部分位于昭通市。

本文研究认为在未来可能的自然发展、环境保护和经济发展的情景下均保持较高的生态系统服务功能的区域,是生态系统服务功能需要重点保护的关键区域。将 3 种情景下均为高生态系统服务功能区域进行识别,结果如图 5(d)所示,区域分布特征与文献^[35]基本一致。研究结果显示,生态系统

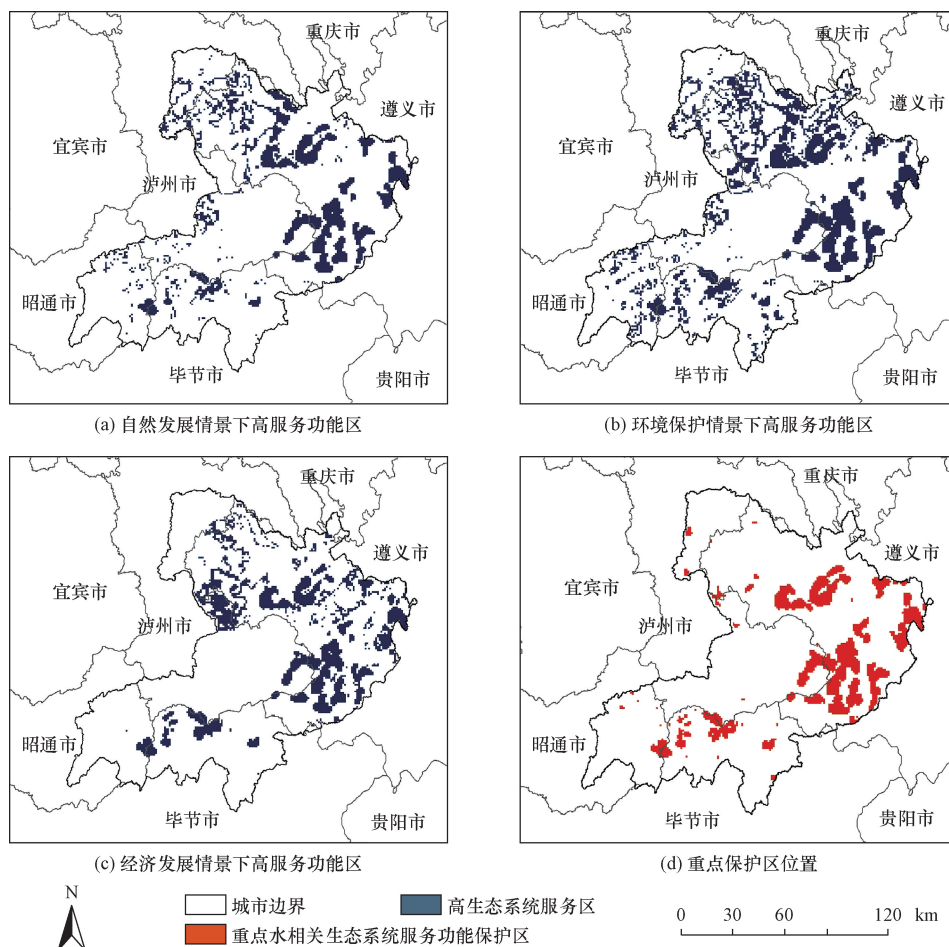


图 5 2040 年不同情景下赤水河流域高水相关生态系统服务功能区域与重点保护区识别
Fig. 5 Identification of high-water-related ecosystem service function areas and key protected areas in Chishui River Basin under different scenarios in 2040

服务功能重点保护区主要位于遵义市、泸州市和毕节市,在昭通市分布较少,其中遵义市分布最多,占生态系统服务功能重点保护区的 62.65%,泸州市分布次之,为 20.83%。值得注意的是,遵义市和泸州市交界区域的重点保护区(仁怀市),同时也是我国重要的白酒产地。因此,该区域的发展与保护如何协同,将对赤水河流域生态系统服务功能稳定发挥作用起到重要的影响^[36]。

4 结论与展望

4.1 主要结论

赤水河流域生态环境保护是长江生态环境保护和管理的重要区域。本文研究通过 FLUS 模型预测了 2040 年赤水河流域在自然发展、环境保护和经济发展三种情景下的土地利用变化情况。结果发现,未来不同情景下土地利用的主要变化在于农田面积和分布的差异,城镇虽然增长幅度较高,但总量较低,城镇土地利用在经济发展情景下面积占比约为 0.8%,因此,生态环境保护的重点可能在于农业面源污染的控制,包括源头消减、过程控制和终端阻断技术的应用等。进一步的,本文研究考虑通过识别生态系统服务功能重点保护区,以实现生态环境的精细化管理。本文研究将三种情景下的高生态系统服务功能区域的重合部分进行识别,并认为在未来情景下均为高生态系统服务功能的区域,将对赤水河流域生态系统的稳定起到至关重要的作用,因此可以被认定为生态系统服务功能重点保护区。结果显示,生态系统服务功能重点保护区主要位于遵义市、泸州市和毕节市,在昭通市分布较少,其中遵义市和泸州市分布最多分别为 62.65% 和 20.83%。此外,遵义市和泸州市交界区域的重点保护区,大部分位于仁怀市,因此如何平衡生态系统服务功能和白酒产业的发展,是赤水河流域实现绿色发展的关键之一。

4.2 不足与展望

土地利用进行预测分析是辅助管理者制定“生态-发展”协同方案的重要手段之一。本文研究针对赤水河流域近自然的特点,较少的选取了与人类活动相关的数据(如公路、铁路等)作为分析因素,预测结果仍然存在一定的误差(Kappa 系数 0.87)。因此,未来的研究可增加更多的经济社会、生态环境等因素驱动 FLUS 模型,更加准确进行土地利用预测,更精确的支持管理决策的提出。此外,数据的分辨率也是实现更精细模拟的关键,未来的研究中可考虑应用分辨率更高的数据开展研究,为赤水河生态环境保护提出更精细的建议。

参 考 文 献

- [1] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. 资源科学, 2001, 23(6). DOI: 10. 3321/j. issn: 1007-7588. 2001. 06. 002.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Cheng Shengkui. Progress in evaluating the global ecosystem services[J]. Resources Science, 2001, 23(6). DOI: 10. 3321/j. issn: 1007-7588. 2001. 06. 002.
- [2] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 19-25.
Oyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 19-25.
- [3] Wu Y, Zhang X, Li C, et al. Ecosystem service trade-offs and synergies under influence of climate and land cover change in an afforested semiarid basin, China [J]. Ecological Engineering, 2021, 159. DOI: 10. 1016/j. ecoleng. 2020. 106083.
- [4] 张永民, 赵士洞. 全球生态系统服务的状况与趋势[J]. 地球科学进展, 2007, 22(5): 515-520.
Zhang Yongmin, Zhao Shidong. The condition and trends of the world's ecosystems[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(5): 515-520.
- [5] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
Li Yifeng, Luo Yuechu, Liu Gang, et al. Effects of land use change on ecosystem services: a case study in Miyun reservoir watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 726-736.
- [6] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(4): 532-542.
Wu Xinxin, Liu Xiaoping, Liang Xun, et al. Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(4): 532-542.
- [7] 刘树锋, 陈记臣, 关帅, 等. 基于 InVEST 模型的杨溪河流域土地利用变化对水源涵养功能的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4746-4751.
Liu Shufeng, Chen Jichen, Guan Shuai, et al. Influence of land use change on water conservation function in Yangxi River Basin based on InVEST model[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4746-4751.
- [8] 王珊珊, 徐明伟, 韩宇, 等. 杭州湾南岸滩涂湿地多年蓝碳分析及情景预测[J]. 中国环境科学, 2022(9): 4380-4388.
Wang Shanshan, Xu Mingwei, Han Yu, et al. Analysis and scenario prediction of multi-year blue carbon in intertidal wetland on the south bank of Hangzhou Bay[J]. China Environmental Science, 2022(9): 4380-4388.
- [9] 武翼飞, 陈国光. 基于 InVEST 模型的矿区土壤保持功能评估——以银顶格矿区为例[J]. 华东地质, 2022(2): 184-195.
Wu Yifei, Chen Guoguang. Assessment on soil conservation service based on InVEST model: a case study of Yindingge mining area [J]. East China Geology, 2022(2): 184-195.
- [10] 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 Zhuang, Chen Ran, Zhao Jing, 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.
- [11] 刘金环, 李威, 吕思思. 基于 PLUS-InVEST 模型的“两湖一库”流域水质净化时空演变[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(24): 10184-10193.
- Liu Jinhuan, Li Wei, Lü Sisi, et al. Spatial-temporal evolution of water quality purification in “two lakes and one reservoir” basin based on PLUS-InVEST model[J]. *Science Technology and Engineering Science*, 2024, 24(24): 10184-10193.
- [12] 刘飞, 刘焕章. 长江上游赤水河示范区水生态修复的成效与挑战[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(12): 1883-1893.
- Liu Fei, Liu Huangzhang. Effectiveness and challenges of aquatic ecological restoration of Chishui River in upper Yangtze River[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(12): 1883-1993.
- [13] Xu Y, Zhang X, Hao Z, et al. Projections of future meteorological droughts in China under CMIP6 from a three-dimensional perspective[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106849.
- [14] 丁访军, 王兵, 钟洪明, 等. 赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 179-231.
- Ding Fangjun, Wang Bing, Zhong Hongming, et al. Physical characteristics of soil and function of soil and water conservation for three main forest land types in the lower reaches of Chuishuihe River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 179-231.
- [15] 叶宗达, 许进龙, 黄天能, 等. 滇桂黔石漠化片区土地生态系统服务价值时空演变研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(26): 11136-11144.
- Ye Zongda, Xu Jinlong, Huang Tianneng, et al. Spatial and temporal evolution of land ecosystem service value in the rocky desertification area of Yunnan, Guangxi and Guizhou Yangtze River[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(26): 11136-11144.
- [16] 刘家威, 蔡宏, 郑婷婷, 等. 基于 SWAT 模型的赤水河流域径流年内分配特征及其对降水的响应研究[J]. *水土保持通报*, 2022(3): 180-187.
- Liu Jiawei, Cai Hong, Zhang Tingting, et al. Annual distribution characteristics of chishui river watershed runoff and its response to precipitation based on SWAT model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022(3): 180-187.
- [17] 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.
- [18] 安艳玲, 吕婕梅, 罗进, 等. 赤水河流域岩石化学风化及其对大气 CO₂ 的消耗[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(2): 179-188.
- An Yanling, Lü Jiemei, Luo Jin, et al. Chemical weathering and CO₂ consumption of Chishuihe River Basin, Guizhou Province [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(2): 179-188.
- [19] Liu X, 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 & Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [20] 吴梓鑫, 刘小平, 罗明. 基于 GEE 平台的粤港澳大湾区建筑物高度时空演变特征分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2022(38): 48-54.
- Wu Ziluan, Liu Xiaoping, Luo Ming. Analysis on characteristics of temporal and spatial evolution of building heights in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area based on GEE platform[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2022(38): 48-54.
- [21] 张韶月, 刘小平, 闫士忠, 等. 基于“双评价”与 FLUS-UGB 的城镇开发边界划定——以长春市为例[J]. *热带地理*, 2019, 39(3): 377-386.
- Zhang Shaoyue, Liu Xiaoping, Yan Shizhong, et al. Delimitation of urban development boundaries using two basic evaluations and FLUS-UGB: a case study of Changchun[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3): 377-386.
- [22] 王旭, 马博文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242.
- Wang Xu, Ma Bowen, Li Dan, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei Province based on FLUS model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 230-242.
- [23] Vigerstol K, Aukema J. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011(10): 2403-2409.
- [24] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015(10): 1024-1034.
- Yang Dawen, Zhang Shulei, Xu Xiangyu, et al. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2015(10): 1024-1034.
- [25] 吴一帆, 张璇, 李冲, 等. 生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升——以潮河流域为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5168-5178.
- Wu Yifan, Zhang Xuan, Li Chong, et al. Improvement of ecosystem service function in watershed by ecological restoration measures: a case study in Chaohe River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5168-5178.
- [26] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念, 核算方法与案例研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(21): 6747-6761.
- Ouyang Zhiyun, Zhu Chunquan, Yang Guangbin, et al. Gross ecosystem product: concept, accounting framework and case study [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [27] 郭云, 李鹏, 程维金, 等. 洞庭湖土地利用和生态服务功能时空变化及其耦合效应分析[J]. *环境科学学报*, 2022(1): 121-130.
- Guo Yun, Li Peng, Cheng Weijin, et al. Evaluation and complex relations analysis of ecosystem services based on spatial-temporal change of land use in Dongting Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022(1): 121-130.
- [28] 刘纯军, 周国富, 黄启芬, 等. 基于 InVEST 模型的山地流域生境质量时空分异研究——以贵州省境内赤水河流域为例[J]. *人民长江*, 2021, 52(10): 62-69.
- Liu Chunjun, Zhou Guofu, Huang Qifen, et al. Spatio-temporal evolution analysis on habitat quality in mountainous watershed based on InVEST model: case of Chishui River Basin in Guizhou Province[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(10): 62-69.

- [29] 吴一帆,唐洋博,李玮,等. 生态系统优先保护区识别及生态治理成效分析——以六安主城区为例[J]. 人民长江, 2023, 54(5): 112-120.
Wu Yifan, Tang Yangbo, Li Wei, et al. Identification of priority protection areas of ecological system and ecological restoring effectiveness analysis: case of urban area of Liu'an City[J]. Yangtze River, 2023, 54(5): 112-120.
- [30] Gao J, Li F, Gao H, et al. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 148-155.
- [31] 贾婉琳,吴赛男,陈昂. 基于 InVEST 模型的赤水河流域生态系统服务功能评估研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(4): 313-320.
Jia Wanlin, Wu Sainan, Chen Ang. Research on evaluation of ecosystem services in Chishui River basin based on InVEST[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(4): 313-320.
- [32] 田义超,白晓永,黄远林,等. 基于生态系统服务价值的赤水河流域生态补偿标准核算[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 312-322.
Tian Yichao, Bai Xiaoyong, Huang Yuanlin, et al. Ecological compensation standard accounting of Chishui River Basin based on ecosystem service value[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 312-322.
- [33] 周彬,余新晓,陈丽华,等. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9-13.
Zhou Bin, Yu Xinxiao, Chen Lihua, et al. Soil erosion simulation in mountain areas of Beijing based on INVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 9-13.
- [34] 余新晓,周彬,吕锡芝,等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
Yu Xinxiao, Zhou Bin, Lü Xizhi, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(10): 1-5.
- [35] 杨应增,周来丰,夏伟,等. 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, et al. Ecosystem service value change analysis of Chishui River Basin based on land use change[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 694-703.
- [36] 黄小刚. 赤水河流域酱香型白酒经济共同体构建研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(12): 256-261.
Huang Xiaogang. Study on the construction of sauce-flavor Baijiu economic community in Chishui River Basin[J]. China Brewing, 2023, 42(12): 256-261.