

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.005

林志, 李石华, 易邦进, 等. 多情景视角下云南省“三生”空间变化模拟与效应评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 220-230.

LIN Zhi, LI Shihua, YI Bangjin, et al. Multiple scenario perspective of production-living-ecological space change simulation and effect evaluation in yunnan province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 220-230.

多情景视角下云南省“三生”空间变化模拟与效应评价

林志¹, 李石华², 易邦进³, 傅涛³, 高七算⁴, 孙星玥⁴, 邱利丹⁴

(1.昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2.云南省基础地理信息中心,

昆明 650034; 3.云南省地质科学研究所, 昆明 650051; 4.云南师范大学地理学部, 昆明 650500)

摘要: [目的] 优化国土空间开发格局和统筹协调“三生”空间格局配置, 是实现未来可持续发展的重点任务 and 根本途径。[方法] 以云南省土地利用为基础, 结合自然和社会发展因素, 采用 MOP-PLUS 耦合模型模拟 2030 年经济优先、生态优先和协同发展 3 种情景下“三生”空间及效应变化。[结果] (1) 3 种情景下经济效益分别增长 40.29%, 32.10%, 34.79%, 生态效益分别减少 0.89%, 0(未变), 0.06%, 生境质量均值分别下降 0.78%, 0.38%, 0.43%, 空间冲突强度均值分别增长 2.79%, 下降 1.21%, 下降 2.32%; (2) 3 种情景生活空间均呈上升, 生态空间呈下降趋势, 生产空间仅在经济优先情景有较小增长; 均存在生活空间侵占生产空间、生产空间再掠夺生态空间的情况, 生活空间扩张呈中心向四周蚕食趋势; (3) 不同发展情景下均伴随一定程度的生境质量下降, 通过优化空间布局可平衡空间冲突; 相较于其他情景, 协同发展情景经济效益增幅适中, 生境质量变化幅度相对均衡, 空间冲突强度下降最多, 符合兼顾生态保护、经济发展、社会进步的多重目标。[结论] 形成的模拟—效应—优化的反馈调控机制, 可与不同尺度、不同目标结合开展土地利用变化模拟与效应分析, 为国土空间配置提供决策依据。

关键词: 三生空间; MOP-PLUS 模型; 多情景模拟; 生境质量; 空间冲突; 云南省

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0220-11

Multiple Scenario Perspective of Production-Living-Ecological Space Change Simulation and Effect Evaluation in Yunnan Province

LIN Zhi¹, LI Shihua², YI Bangjin³, FU Tao³, GAO Qisuan⁴, SUN Xinyue⁴, QIU Lidan⁴

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093,

China; 2. Yunnan Provincial Geomatics Centre, Kunming 650034, China; 3. Yunnan Institute of Geological

Science, Kunming 650051, China; 4. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: [Objective] To optimizing the pattern of territorial space development and coordinating the pattern of production-living-ecological space is the key task and fundamental way to achieve sustainable development in the future. [Methods] Based on the land use in Yunnan Province and combined with the natural and social development factors, the MOP-PLUS coupling model was used to simulate the changes of production-living-ecological space and its effects under three scenarios of economic priority, ecological priority and collaborative development in 2030. [Results] (1) Under the three scenarios, the economic benefit increased by 40.29%, 32.10% and 34.79%, the ecological benefit decreased by 0.89%, 0 (unchanged) and 0.06%, the average habitat quality decreased by 0.78%, 0.38% and 0.43%, and the average spatial conflict intensity increased by 2.79%, decreased by 1.21% and decreased by 2.32%. (2) Living space increased and ecological space decreased in the three scenarios. Production space only increased slightly in the economic priority scenario. In all cases, living space encroached on production space, and then production space plagued

收稿日期: 2023-04-24

修回日期: 2023-05-26

录用日期: 2023-06-05

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-09-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(41861051); 云南省自然科学基金项目(202101AT070052); 云南省高层次人才及创新团队选拔专项—中青年学术和技术带头人后备人才项目(202205AC160014)

第一作者: 林志(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事地理信息技术开发与应用研究。E-mail: linzhi8989@qq.com

通信作者: 李石华(1980—), 男, 博士, 教授级高工, 硕士生导师, 云南省中青年学术与技术带头人后备人才, 主要从事资源环境遥感技术应用研究。E-mail: Lsh8010@163.com

ecological space. The expansion of living space showed a trend of encroaching from the center to the periphery. (3) Habitat quality decreased to some extent under different development scenarios, and spatial conflicts could be balanced by optimizing spatial layout. Compared with other scenarios, the growth of economic benefits in the collaborative development scenario was moderate, the variation range of habitat quality was relatively balanced, and the intensity of spatial conflicts decreased the most, which was in line with the multiple goals of ecological protection, economic development and social progress. [Conclusion] The simulation-effect-optimization feedback regulation mechanism formed in this paper can be combined with different scales and objectives to carry out land use change simulation and effect analysis, and provide a basis for decision-making of territorial space allocation.

Keywords: production-living-ecological space; MOP — PLUS model; multi-scenario simulation; habitat quality; space conflict; Yunnan Province

Received: 2023-04-24

Revised: 2023-05-26

Accepted: 2023-06-05

Online(www.cnki.net): 2023-09-15

如何将有限且宝贵的土地资源进行合理布局优化,利用多目标决策,兼顾生态保护、经济发展、社会进步等多重目标实现效益最大化,是土地利用规划的重要目标。2019 年《中共中央、国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》^[1]明确了国土空间规划的主要目标,指出“到 2035 年,全面提升国土空间治理体系和治理能力现代化水平,基本形成生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀,安全和谐、富有竞争力和可持续发展的国土空间格局”;2021 年《云南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》^[2]提出:立足资源环境承载能力,发挥各地优势,统筹生产、生活、生态空间(以下简称“三生”空间),优化重大基础设施、重大生产力和公共资源布局,逐步形成生态功能区、农产品主产区、城市化地区三大空间格局。优化国土空间开发格局是一个长期的过程,如何将土地结构在数量和空间布局上进行合理分配,释放空间效能,是亟待解决的重要现实问题。通过统筹协调“三生”空间格局优化配置,是实现未来可持续发展的重点任务和根本途径。将土地利用或“三生”空间的经济效益与生态效益为优化目标设置进行多情景模拟,实现土地利用布局优化具有重要的现实意义。

相关学者已在土地利用模拟与优化评价开展了大量的研究。主要采用 Markov 模型、神经网络模型、灰色模型、系统动力学模型、MOP 模型对土地利用数量优化模拟^[3];同时,基于神经网络、遗传算法、人工蜂群算法与 GIS 技术结合形成了 CA 模型^[4]、CLUE—S 模型^[5]、FLUS 模型^[6]、PLUS 模型^[7]等开展空间模拟。已有研究^[8]表明,PLUS 模型在景观格局、位置和数量模拟方面的精度均优于 CLUE—S 和 FLUS 模型。未来土地利用生态效应评价主要采用生态风险指数^[9]、生态服务价值变化^[10]、InVEST 模

型^[11-12]等方法,其中 InVEST 模型是目前发展最为成熟的生态系统功能评价模型,由于具有操作便捷、评估精度高、可视化能力强且理论体系较为完善等优点而被广泛应用^[13],该模型将更多地应用于生态时空格局变化及其重要性评价^[14]。空间布局评价采用的方法主要有土地利用强度^[15]、景观生态格局^[16]和空间冲突指数^[17-18],其中“三生”空间冲突是指伴随城镇化空间格局的演变过程中的多种土地类型(功能)转换而产生的人与自然之间的矛盾现象,其在空间上主要表现为建设用地空间与生态用地空间比例失调、土地景观复杂化、破碎化等^[19]。空间冲突指数是在景观格局和景观风险指数基础上发展而来,综合考虑了国土空间的复杂性、脆弱性和稳定性,可用于刻画国土空间布局矛盾存在区域。未来土地利用的最终目标是将生态效益和经济效益相结合^[3],如何将土地利用或“三生”空间的经济效益与生态效益为优化目标设置进行多情景模拟,实现土地利用布局优化^[20-21]现已成为土地利用模拟研究的热点。

优化国土空间开发格局,统筹协调“三生”空间格局配置,是实现未来可持续发展的重点任务和根本途径,探究各发展目标下的用地结构产生的不同效应,对于区域可持续发展、资源高效利用具有重要意义。目前土地利用变化模拟研究主要围绕在模型模拟、驱动力分析及未来土地利用时空格局变化 3 个方面,主要以时空演化特征分析为主,且单一模型应用最为常见,鲜有系统的国土空间优化研究范式,难以全面分析和解决国土空间优化配置问题。在评价方法方面,现有评价方法较为单一,将生态效应和布局协调综合起来评价空间格局研究得较少。此外,云南省以争当全国生态文明建设排头兵作为战略目标,土地资源的合理配置和充分利用则显得尤为重要。因此,采用 MOP—PLUS 耦合模型开展土地利用变化多情景模

拟,从生境质量和空间冲突 2 个方面揭示不同的发展情景下土地利用变化的效应,预测未来不同情景下国土空间的生态效应和布局协调性,针对潜在生境质量受损、空间冲突加剧区域,制定“三生”空间管制及摸索生态系统保护修复应对路径,形成模拟—效应—优化的反馈调控机制,以期为国土空间优化提供新的思路及区域土地利用管控政策的制定提供依据。

1 研究区概况

云南省(21°08′—29°15′N,97°31′—106°11′E)位于中国西南部,属高原山区省份,地貌主要以山地、丘陵、平原和台地为主,分别占国土面积的 88.64%,4.96%,4.85%,1.55%,大部分地区位于中海拔区域。总体地势呈西北高,东南低,海拔相差约 6 664 m,呈阶梯状下降,海拔差异显著,多为高山深谷相间,地势

十分险峻(图 1)。云南的气候属于亚热带高原季风型,立体气候显著,类型众多,年温差小,日温差大,干湿季节分明,气温随地势高低垂直变化异常明显,降水在季节和地域上分布不均。云南是全国动植物种类最多的省份,享有“动植物王国”的美誉。2022 年全省生产总值 2.89 万亿元,其中第一、二、三产业产值分别为 0.40 万亿,1.05 万亿,1.44 万亿元。

云南省的“三生”空间在等级数量和空间分布上具有较高的一致性,数量上呈现出金字塔状等级分布,空间分布上圈层结构较明显,整体呈由昆明市区向外的“核心—边缘”态势^[22],生产、生活、生态空间分别呈现“一核一圈六群”“多重圈层梯度组合”“西高东低三峰两谷”的格局,全省国土空间发展存在不充分、不平衡、不协调、不可持续及体制机制不完善等问题^[23]。

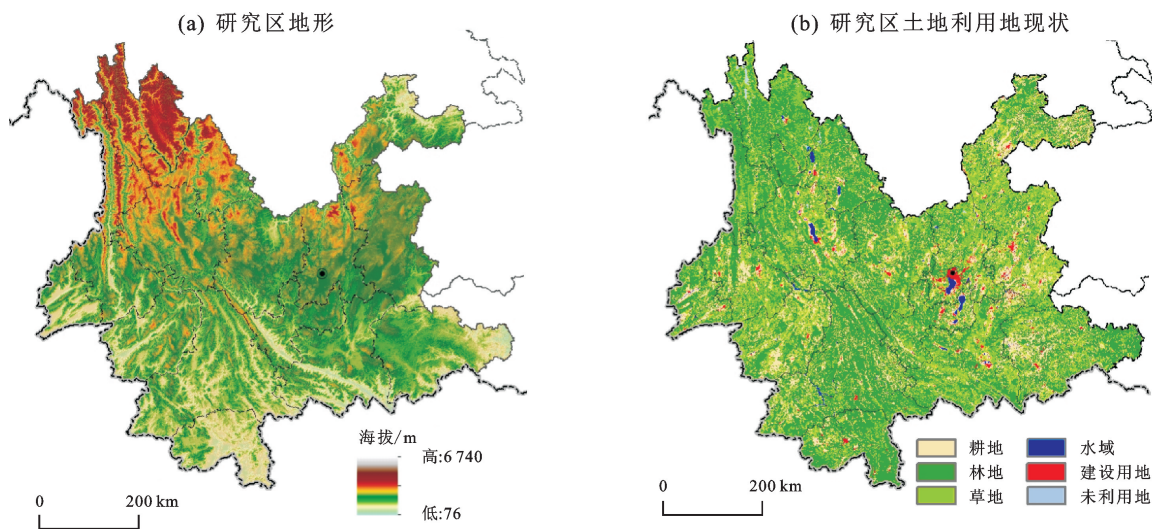


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

2 数据与方法

2.1 数据源

从自然和社会因素对土地利用变化的影响角度,选取降水、气温、高程、坡度、地形起伏度、距城市距

离、人口密度、GDP、夜间灯光共 9 个指标作为土地利用变化模拟的驱动因子^[7,10],其中坡度和地形起伏度由 DEM 计算得到,人口和 GDP 数据按区县赋值转换为栅格数据;各栅格数据重采样后统一分辨率为 300 m×300 m。各数据来源见表 1。

表 1 数据来源

Table 1 Data source

数据名称	数据来源
2010 年、2020 年土地利用数据(国土调查)	云南省基础地理信息中心
2010 年、2020 年土地利用数据(30 m)	中国科学院资源环境科学与数据中心 https://www.resdc.cn/
年均降水,气温(1 km)	
云南省行政区划	
DEM 数据(30 m)	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/search
2020 年度合成夜间灯光数据(500 m)	Earth Observation Group https://eogdata.mines.edu/products/vnl/
道路数据	Open Street Map https://www.openstreetmap.org/
云南省社会经济数据	2020 年、2021 年云南省统计年鉴和第七次人口普查数据

2.2 研究方法

2.2.1 不同情景下土地利用变化模拟

(1)MOP 模型。多目标规划模型(multi-object planning,MOP)是土地利用优化研究的重要模型,基于约束数据与客观规律进行预测结果较为科学,是研究地理学、区域经济发展的基本数学模型^[24]。公式分别为:

$$\text{Max}F_1(x)=\sum_j^n c_jx_j \tag{1}$$
$$\text{Max}F_2(x)=\sum_j^n d_jx_j \tag{2}$$
$$s.t.\begin{cases} \sum_{j=1}^na_{ij}x_j=(\geq,\leq)b_j,(i=1,2,3,\cdots,m) \\ x_j\geq 0,(j=1,2,3,\cdots,n) \end{cases} \tag{3}$$

表 2 国土空间功能和土地利用效益

Table 2 Land spatial functions and land use benefits

国土空间	功能	土地利用	生态效益系数/ ($\times 10^5$ 元 $\cdot$ km $^{-2}$)	经济效益系数/ ($\times 10^5$ 元 $\cdot$ km $^{-2}$)
生产空间	种植、生产、采集作物	耕地	72.35	430.30
		林地	571.32	19.61
生态空间	生态调节(土壤保持、防风固沙、 河岸防护和生物多样性保护)	草地	285.19	270.53
		水域	732.69	267.58
		生态容纳	9.15	6.42
生活空间	工商生产、物资储备、城镇建成区、农村生活区、公共服务等	未利用地	21.98	39 455.33

(2)不同发展情景设置。结合云南省自然资源禀赋予经济社会发展实际、区域发展目标与实现路径,设置经济优先、生态优先、协同发展 3 种未来发展情景,全面分析全省不同目标、不同情景下的“三生”空间布局变化。参考已有研究^[21]成果的权重分配,采用德尔菲法与专家意见来确定 3 种情景中经济与生

式中: $F_1(x)$ 为经济效益(元); $F_2(x)$ 为生态效益(元); x_j 为第 j 类土地利用的面积(km²); c_j 为土地利用的经济效益系数(元/km²); d_j 为土地利用的生态效益系数(元/km²); a_{ij} 为约束条件 $s.t.$ 中第 i 个约束条件中 j 个变量对应的系数; b_j 为对应土地利用的约束面积(km²)。

在土地利用功能类型基础上,构建出符合发展实际的“三生”空间分类体系^[16-17]。各类土地利用经济效益与统计年鉴数据相对应,其中耕地、林地、草地、水域分别对应农业、林业、牧业、渔业收入^[21,25],建设用地对应第二、三产业收入^[26];生态效益系数采用前人^[27-28]生态价值当量表计算并结合云南省已有研究成果修正。“三生”空间分类和各土地利用效益系数见表 2。

态效益目标权重值,3 种情景下生态效益和经济效益权重分别为 0.20,0.80,0.50 和 0.80,0.20,0.50。

(3)不同情景约束条件构建。基于《云南省国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》^[22],结合 2010 年至 2020 年土地利用的数量变化来构建约束条件(表 3)。

表 3 土地利用约束条件

Table 3 Land use constraints

约束因素	约束条件	约束说明
耕地面积	$66\ 170.62\leq X_1\leq 74\ 190.60$	根据云南省规划布局耕地保有量不得少于 0.88 亿亩,从粮食安全角度出发,考虑到人口增长和耕地占用,最低耕地面积为原有退化速度增加 20%(最小值大于耕地红线面积);最大值设置定为 2020 年耕地面积的 1.10 倍
林地面积	$218\ 206.79\leq X_2\leq 240\ 847.59$	最小面积按原有退化速度增加 10%设置;最大值为 2020 年面积的 1.10 倍
草地面积	$84\ 499.88\leq X_3\leq 86\ 490.18$	按原有退化速度增加 20%设定最小值;最大值设置为恢复 2010 年面积
水域面积	$2\ 892.78\leq X_4\leq 4\ 382.23$	最小值按减少为 2010 年面积设定;由于近年来研究区旱情严重,降水减少,最大值按原有增速的 50%设定
未利用地面积	$1\ 532.61\leq X_5\leq 1\ 581.75$	最小值设置为现有退化速度不变;最大值设置为 2010 年面积
建设用地面积	$5\ 521.34\leq X_6\leq 7\ 272.54$ (经济优先)	最小值不低于现有人均建设用地面积,采用 2030 年预测人口计算得到 ^[10] ;结合相关研究 ^[9,21] ,最大值按不同情景设置为原有的扩张速度的 1.50 倍(经济优先)、1.20 倍(生态优先)、1.30 倍(协同发展)
	$5\ 521.34\leq X_6\leq 6\ 769.47$ (生态优先)	
	$5\ 521.34\leq X_6\leq 6\ 937.16$ (协同发展)	
总面积	$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6=382\ 184.01$	土地总面积不变

注:2030 年人口数量根据 2010—2020 年人口数量变化预测得到。

(4)PLUS 土地利用模拟模型。斑块生成土地利用变化模拟模型(patch-generating land use simulation,

PLUS)包括用地扩张分析策略(LEAS)和多类随机斑块种子 CA 模型(CARS)2 个部分,是基于栅格数据的一种

斑块生成土地利用变化模拟模型。该模型通过分析 2 期土地利用的地类变化,采用随机森林算法逐一对各类土地利用变化和驱动力因素进行挖掘,获取各类用地的发生概率及驱动因素对该时段各类用地变化的贡献,再结合随机种子生成和阈值递减机制,在发展概率的约束下,生成模拟后的土地利用变化^[7]。

表 4 不同情景邻域权重

Table 4 Neighborhood weights of different scenarios

情景	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
2020 年	0.199 04	0.126 93	0.169 42	0.185 96	0.004 60	0.314 04
经济优先	0.058 51	0.130 86	0.190 54	0.174 28	0.004 31	0.441 48
生态优先	0.254 19	0.024 56	0.216 36	0.098 96	0.004 89	0.401 04
协同发展	0.238 26	0.054 34	0.202 80	0.092 76	0.004 59	0.407 24

以 2010 年的土地利用为基础,2020 年各类土地利用数量为目标,模拟 2020 年土地利用空间分布(图 2)。采用模拟结果与 2020 年土地利用现状进行精度验证,经对比模型模拟整体精度为 82.04%,表明该模型具有较高的可信度,能满足研究要求。模拟结果与 2020 年土地利用现状相比,建设用地和水域在模拟结果空间分布上存在一定偏差。建设用地模拟扩张方式大部分是由城市中心向外围扩散发展,但部分城市发展与其规划发展方向有关,造成了模拟偏差,误差区域集中在城区周围;模拟的水域扩张更多分布在较大的水域湖区周围,但实际水域面积增大主要是滇西澜沧江中下游新建水电站蓄水造成。

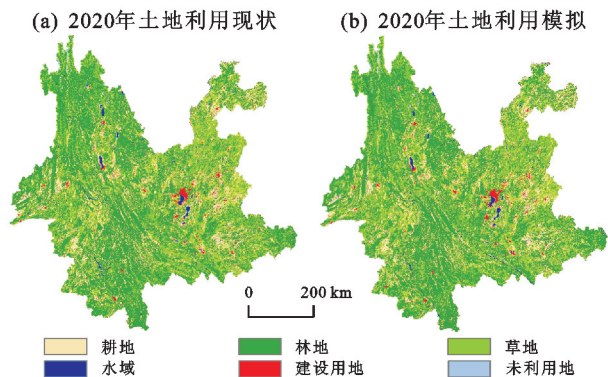


图 2 土地利用现状与模拟结果

Fig. 2 Land use status and simulation results

2.2.2 不同情景下的土地利用变化效应评估

(1) InVEST 生境质量模型。采用 InVEST 模型中的 Habitat Quality 模块计算生境质量,生境质量反映环境提供给个人或种群的生存发展所需的各类资源条件,生境质量决定生物多样性状况,是生态系统服务功能和生态系统健康程度的重要体现。评估不同发展情景生境质量变化对生态安全格局具有重要意义^[29]。采用不同情景下生境质量变化来对比评估生态效应的空间变化,模型结合不同土地利用类型对威胁因子的敏感度和外界的威胁强度,从而计算出

结合已有研究^[9-11]成果,3 种情景下除建设用地不能转换为其他地类外,保留其余土地利用之间的转换,根据不同发展情景土地利用的需求数量在基础数量的变化占总变化量的比值来设置邻域权重(表 4),权重越大,斑块越易发生变化,以修正不同情景下土地利用的不同变化强度。

生境质量,计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right] \quad (4)$$

$$D_{xj} = H_j \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^Y \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (5)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; D_{xj} 为生境退化度,代表土地利用类型 j 栅格 x 的生境退化程度; H_j 为生境类型 j 的生境适宜性; Z 为归一化常量,取 2.50; k 为半饱和常数,取 0.50; ω_r 为不同胁迫因子的权重; r_y 为威胁因子强度; β_x 为生境抗干扰水平; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性; i_{rxy} 为栅格 y 中的威胁因子 r 对栅格 x 的影响, y 为威胁因子 r 中的栅格。

在参考软件使用手册^[30]和前人^[31-33]研究成果的基础上来设定胁迫因子的权重、最大影响距离和退化类型(表 5),设定各土地类型的生境适宜性及对威胁因子的相对敏感性(表 6)。

表 5 胁迫因子的权重、最大影响距离和衰退类型

Table 5 Stress factors and their maximum influence distance, weight and recession type

胁迫因子	权重	最大影响距离/km	退化类型
耕地	0.40	5	指数
主要道路	0.60	6	指数
次要道路	0.30	4	指数
居民点	0.70	7	线性
建设用地	0.90	10	线性

(2) 空间冲突强度模型。不同发展情景带来不同“三生”空间分布格局的变化,利用空间复杂性指数、空间脆弱性指数和空间稳定性指数 3 个因子构建空间冲突模型^[26,34-35]。借助空间冲突强度指数来评估“三生”空间布局的协调程度,空间冲突强度越低,布局协调程度就越高。空间冲突强度模型公式:

$$SCCI = CI + FI + SI \quad (6)$$

式中:SCCI 为空间冲突强度; CI 为空间复杂性,用景观面积加权平均分维数表示; FI 为空间脆弱性,用各类国土空间所占比例和其脆弱性系数的乘积表示,不同国土空间脆弱性参考已有研究^[18,26]赋值,生态、生产和生活空间分别赋值 1,2,3; SI 为空间稳定性,用景观斑块密度表示。

表 6 生境适宜性及对威胁因子的相对敏感性
Table 6 Sensitivity of habitats to various stress factors

土地利用	生境质量	胁迫因子				
		耕地	主要道路	次要道路	居民点	建设用地
耕地	0.35	0	0.30	0.20	0.20	0.40
林地	0.95	0.30	0.50	0.30	0.70	0.90
草地	0.50	0.40	0.30	0.20	0.50	0.50
水域	0.70	0.50	0.60	0.40	0.70	0.90
未利用地	0	0	0	0.10	0.10	0.10
建设用地	0	0	0	0	0	0

使用 Fragstats 4.2 中的 Moving Window 功能计算各景观指数,窗口边长设置为 3 km^[26];使用 ArcGIS 空间量化 SCCI 指数。

3 结果与分析

3.1 “三生”空间变化

基于各类土地利用生态和经济效益,通过 MOP 模型得到各类情景综合效益最大值,不同情景的各国土空间数量、生态和经济效益(图 3)。

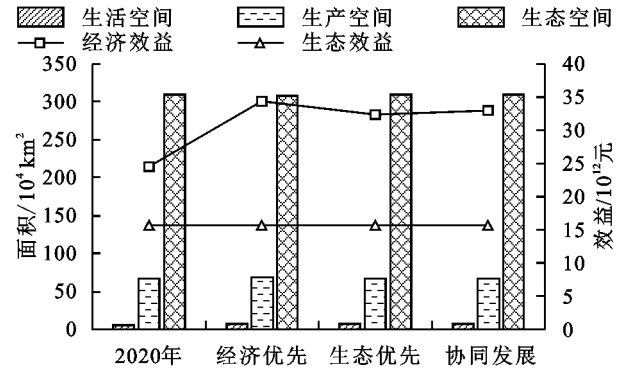


图 3 各国土空间数量、生态和经济效益

Fig. 3 Spatial quantity, ecological and economic benefits of each territory

由图 3 可知:(1)总体变化情况来看,3 种情景下,生活空间上升趋势明显,而生态空间则表现为下降的趋势,虽在生态优先情景该趋势得到一定控制,但仍有部分生态空间被挤占;生产空间仅在经济优先情景下增长 330 km²。(2)不同情景下“三生”空间内部变化差异显著。经济优先情景生活空间扩张最为迅速,建设用地和耕地较 2020 年增加 52.87% 和 0.49%,致使生态空间被大量破坏,较 2020 年减少 0.34%,此情景经济效益最高,增幅为 40.29%,但生态效益减少 0.89%,较其他情景减少较多;生态优先情景生态空间保护最好,水域保持原有的速度扩张,面积较 2020 年分别增幅为 12.79%,生活空间扩张最小,此情景经济效益最低,增幅仅为 32.10%,生态效益基本保持不变;协同发展情景,生态空间下降得到一定控制,水域保持原有的速度扩张,林地面积较 2020 年减少 0.13%,建设用地增幅为 45.82%,此情景经济效益增幅为 34.79%,生态效益减少 0.06%。以 2020 年土地利用数据为基础,采用 PLUS 模型模拟 2030 年云南省 3 种情景设定下的土地利用变化(图 4)。

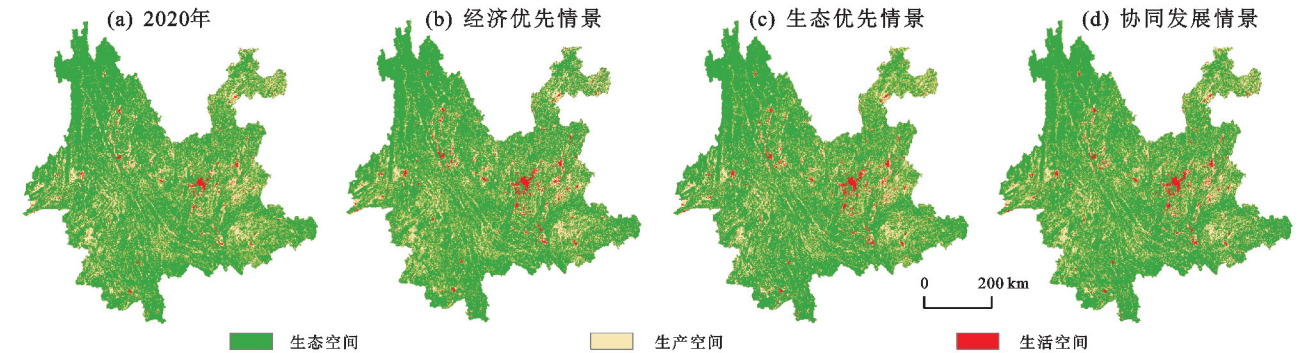


图 4 不同情景“三生”空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of production-life-ecological space in different scenarios

从图 4 可以看出:(1)生活空间围绕城市群呈现多点发展的格局。都市圈、城市群等地区对周边地区的辐射带动作用较为明显,2030 年 3 种情景下生活空间已形成滇中、滇西城市群多点支撑发展格局,并

成为最具活力的增长核心,环滇池、洱海发展的趋势较为明显,其原因与这些区域交通区位优势明显、经济发展水平相对较高、人口密度较大有关。(2)生产空间集中分布于滇东北、滇中、滇西人口密度大、地形相对平坦地区,景观破碎度高,与生活空间呈交错分布。(3)生态空间分布相对集中,主要位于滇西北部三江并流区、南部的澜沧江下游流域和哀牢山—无量山地区。(4)3种情景下的空间冲突差异明显。将模拟的2030年3种情景与2020年“三生”空间叠加分析后发现,3种情景都存在生活空间侵占生产空间,生产空间再掠夺生态空间的情况,生活空间扩张呈中心向四周蚕食趋势,部分面积小于 0.2 km^2 、不连续的生态空间被生产空间掠夺进行农业生产活动。经济优先情景滇中和滇西北城市群生活空间扩张最为迅速,生活空间主要侵占与其邻近的生产、生态空间,生态空间主要流入生产空间。在生态优先和协同发

展情景“三生”空间格局变化差异较小,生活空间扩张相对均衡,生产空间侵占生态空间相对较少。

3.2 生境质量变化

采用生境质量来评估3种情景下的生态效应空间变化(图5)。从图5可以看出:(1)总体来看,生境质量较高的区域集中分布南部的澜沧江下游流域、哀牢山—无量山地区,分布较为集中,这些区域森林茂密,生物多样性丰富,人为干扰小,具有丰富的生态资源和较高的生态价值;生境质量较低为生活空间区域,且分布较为破碎,这些区域人为活动频繁,人口、建筑集中,生态环境质量较差。(2)2030年3种情景与2020年生境质量叠加分析结果表明,生境质量下降区域集中在滇中和滇东地区,且经济优先情景生境质量下降更为密集、范围更大。主要与城市扩张、耕地分布破碎等人为干扰因素有关,应该加强国土空间规划和管理;3种情景下均有部分区域因生产空间转化为生态空间,生境质量得以提高。

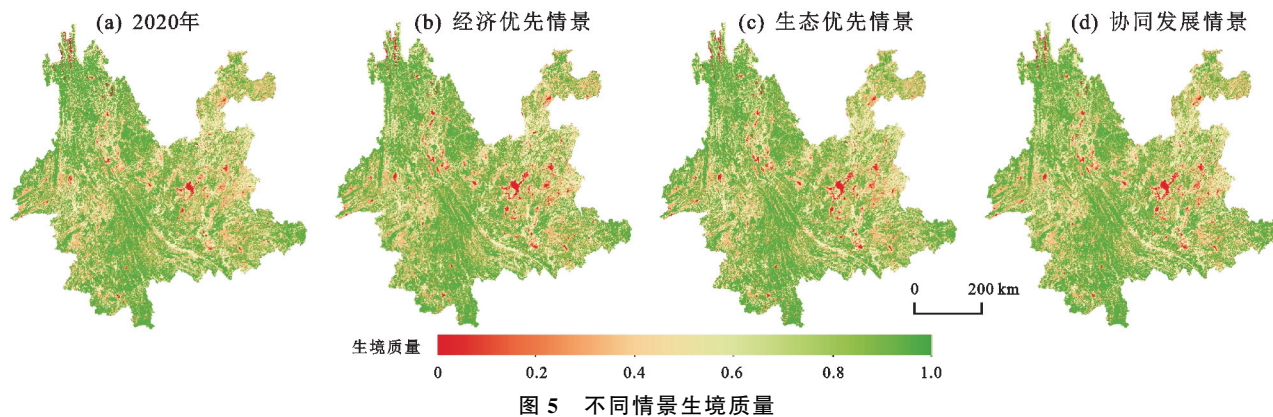


图 5 不同情景生境质量

Fig. 5 Habitat quality under different scenarios

以2020年生境质量值为基准,采用自然间断点分为生境质量低、中、高等级,分别统计各类情景下各等级所占总面积比例(图6)。3种情景下低生境质量较2020年占比皆有所增加,经济优先情景增加最多,而生境质量中、高等级3种情景都下降,经济优先下降最多,生态优先和协同发展情景变化程度大致相同。2020年及2030年3种情景下生境质量均值分别0.715 1, 0.709 5, 0.712 4, 0.712 0,生境质量呈下降趋势。经济优先情景下降最大,下降幅度为0.78%,生态优先和协同发展情景下降较小,下降幅度分别为0.38%, 0.43%。综上,2030年各发展情景对生境质量影响显著,经济优先情景因生态空间的大面积破坏,致使生境质量下降最为明显,受损区域更为集中;生态保护情景由于建设用地,耕地扩张较少,对生态破坏最小,因此生境质量变化微弱;协同发展情景生境质量变化相对较小。

3.3 空间冲突强度变化

利用空间冲突强度模型评估“三生”空间布局的协调程度(图7)。从图7可以看出:(1)云南省土地

利用冲突在空间分布上具有显著的区域差异,与地形、海拔耦合度较高。冲突值较高区域集中在地形平坦,海拔相对较低的坝区,主要表现在滇中、滇西城市群,这些区域各类国土空间交错分布,且生产空间分布破碎,生活空间所占比例较大,人口稠密,人类活动较为频繁,造成空间布局失衡。冲突值较低区域集中在滇西北、哀牢山—无量山山脉和南部边境雨林地区,这些区域植被覆盖度较高,生态空间景观面积较大,生活空间所占比例较小,土地利用矛盾冲突较小。(2)2030年3种情景相较于2020年空间冲突增长区域集中在滇中和滇东北城市群,主要在生活空间及其周边,呈集中连片发展,且生活空间扩张和空间冲突呈指数上升。随着建设用地增长,大量生产空间和生态空间被吞噬,造成空间布局失衡。

以2020年空间冲突值为基准,采用自然间断点分为空间冲突低、中、高等级,分别统计各类情景下各等级所占总面积比例(图8)。3种情景空间冲突中等级面积都有所增加;与空间冲突低、高等级3种情景变化相反,

经济优先更加剧空间冲突,高空间冲突等级面积增长最多,生态优先和协调发展有扭转空间冲突趋势,协调发展降低空间冲突更为明显。2020 年及 2030 年 3 种情景空间冲突均值分别为 0.215 1,0.221 1,0.212 5,0.210 1,除经济优先情景空间冲突增加 2.79%外,生态优先和协调发展情景均有所下降,分别减少 1.21%,2.32%。经济优先发展随着生活、生产增加,造成国土空间布局失衡,加剧空间冲突强度;生态优先情景通过最小的生活空间增长,最小的生态空间减少,来降低空间冲突强度;协调发展在保持生活空间有相对增长的同时,减少对生态空间的侵占,最大程度降低空间冲突。

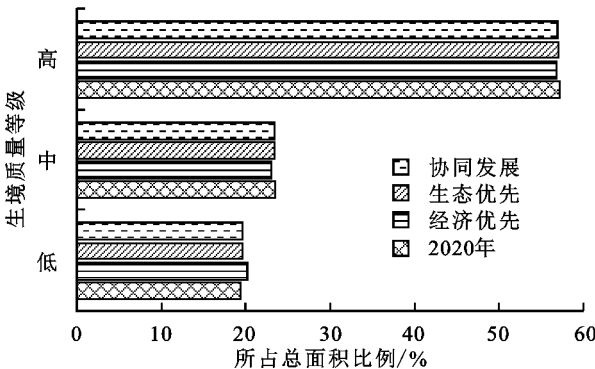


图 6 生境质量面积对比

Fig. 6 Comparison of habitat quality and area

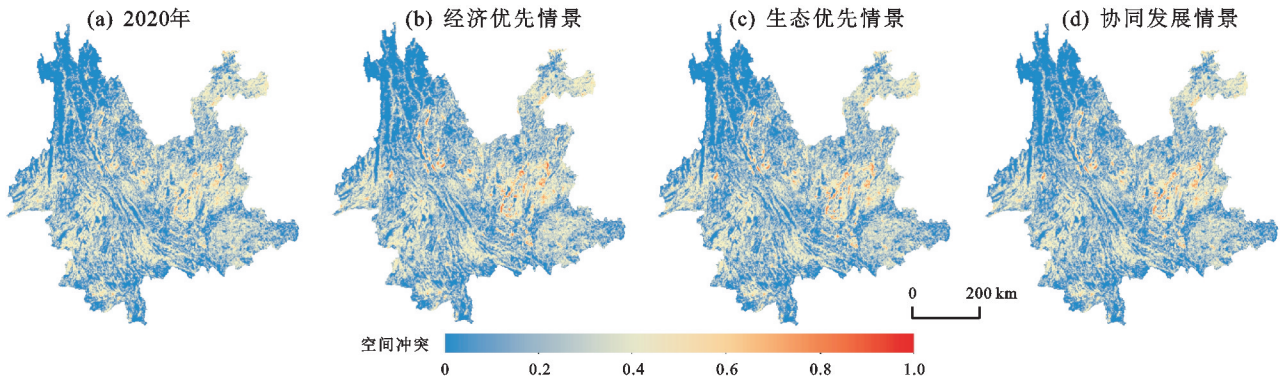


图 7 不同情景空间冲突强度分布

Fig. 7 Spatial conflict intensity distribution in different scene

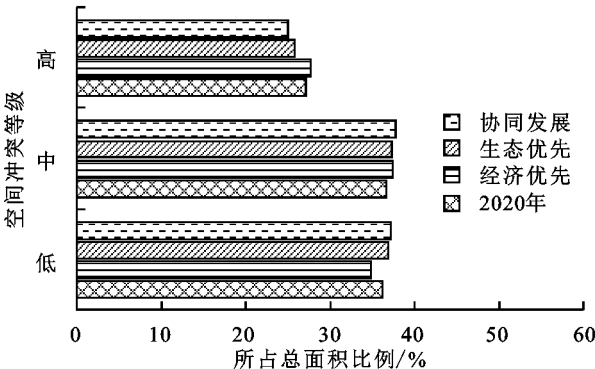


图 8 空间冲突面积对比

Fig. 8 Spatial conflict intensity of districts and counties in different scenarios

4 讨论

云南省以争当全国生态文明建设排头兵作为战略目标,土地资源的合理配置和充分利用就显得尤为重要,不同的土地利用开发模式产生不同的影响。不同发展情景通过优化空间布局可平衡空间冲突,但在未来无论何种发展情景均会引起一定程度的生态环境质量降低,这与已有研究^[36-37]相契合。随着经济社会发展,建设用地的增加将导致生态环境的下降,但可通过合理调节空间布局平衡空间矛盾,经济优先发展造成空间冲突加剧,但生态优先和协调发展则能缓和空间冲突^[26]。不同发展情景将显著影响未来国土

空间生态环境和布局协调程度。因此,各区域可针对不同发展情景下的土地利用变化效应制定不同的发展方案和国土空间管控政策。如滇东石漠化区域和滇东北农耕区域,生产空间所占比例较高,且耕地分布较为破碎,各发展情景下,生境质量受损、空间冲突加剧严重,可通过增加生态空间比例,适度发展农业,加强国土空间管制来进行矛盾协调;滇中地区作为云南省经济发展的核心引擎,各城市群发展辐射作用较强,建设用地扩张速度较快,发展应尽量避免占用优质耕地,坚持可持续开发,集约高效利用土地资源;滇西北三江并流地带以及横断山区,承担了区域生态安全功能,具有极高的生态和景观价值,应在守住生态安全底线的前提下注意适度开发。本文形成的模拟—效应—优化的反馈调控机制,未来可与不同尺度、不同目标结合开展国土空间分情景土地利用变化模拟与效应分析,以期为国土空间优化提供新的思路及区域土地利用管控政策的制定提供依据。

如何科学有效优化国土空间开发格局,合理进行空间规划配置是一个长期不断探索的过程。PLUS模型以不同土地利用需求为目标,根据自然、社会因子模拟未来土地利用空间分布,但短期内城市发展方向和规划政策有关,不同时期规划发展方向存在易变性,且政策规划因素较难量化研究,存在易变和不确

定性,致使模拟结果存在一定偏差。本文因数据限制,在今后研究中可加入生态保护红线、城镇开发边界和永久基本农田保护红线,进行约束限制,模拟土地利用空间格局变化;同时,对未来土地利用空间格局和生态效应影响评估还需完善,如何结合多种方式、多角度综合分析,找到客观合理的最优评价方法,选择最佳的发展方式和路径还需不断探索和尝试。

5 结 论

以 2010 年、2020 年土地利用现状为基础,结合云南省自然和社会发展因素,设置经济优先、生态优先和协同发展 3 种情景,采用 MOP—PLUS 耦合模型模拟 2030 年“三生”空间格局变化,并利用 InVEST 生境质量模型和空间冲突强度模型评估 3 种情景经济生态效益、生境质量和空间冲突强度变化效应。

(1) 3 种情景生活空间均呈上升、生态空间呈下降趋势,生产空间仅在经济优先情景有较小增长。经济优先情景生活空间扩张最为迅速,经济效益最高,但生态效益下降最大;生态优先生态空间保护最好,生活空间扩张最小,经济效益最低,发展受到一定限制,生态效益基本保持不变;协同发展情景生态空间下降得到一定控制,经济效益增加、生态效益减少较为适中。

(2) 3 种情景均存在生活空间侵占生产空间、生产空间再掠夺生态空间的情况,生活空间扩张呈中心向四周蚕食趋势。经济优先情景滇中和滇西北城市群生活空间扩张最为迅速,生活空间主要侵占与其邻近的生产、生态空间,生态空间主要流入生产空间。在生态优先和协同发展情景“三生”空间格局变化差异较小,生活空间扩张相对均衡,生产空间侵占生态空间相对较少。

(3) 经济优先情景生境质量下降最多,下降面积最大,空间冲突强度增长最大;生态优先情景生境质量基本保持不变,空间冲突有所降低;协同发展情景生境质量变化相对均衡,空间冲突强度降低最多。综合对比 3 种发展情景,协同发展情景从生态效应和空间布局协调程度方面看更符合兼顾生态保护、经济发展和社会进步的多重目标。

参考文献:

[1] 中共中央、国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见[N].人民日报,2019-05-24(001).
Several opinions of the CPC central committee and the state council concerning the wstablishment of a territorial space planning system and its supervision and implementation[N]. The People's Daily, 2019-05-24

(001).

- [2] 云南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[N].云南日报,2021-02-10(005).
The 14th Five-Year Plan for national economic and social development and the outline of the long-range goals for 2035 of Yunnan Province[N]. Yunnan Daily, 2021-02-10(005).
- [3] 乔治,蒋玉颖,贺瞳,等.土地利用变化模拟研究进展[J].生态学报,2022,42(13):5165-5176.
QIAO Z, JIANG Y Y, HE T, et al. Land use change simulation: Progress, challenges, and prospects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5165-5176.
- [4] 段增强, Verburg P H, 张凤荣, 等.土地利用动态模拟模型的构建及其应用:以北京市海淀区为例[J].地理学报, 2004, 59(6): 1037-1047.
DUAN Z Q, Verburg P H, ZHANG F R, et al. Construction of a land-use change simulation model and its application in Haidian District, Beijing [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 1037-1047.
- [5] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE—S 模型的改进与土地利用变化动态模拟:以张家界市永定区为例[J].地理研究, 2010, 29(3): 460-470.
WU G P, ZENG Y N, FENG X Z, et al. Dynamic simulation of land use change based on the improved CLUE-S model: A case study of Yongding County, Zhangjiajie [J]. Geographical Research, 2010, 29(3): 460-470.
- [6] LIU X O, 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] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: e101569.
- [8] 蒋小芳, 段翰晨, 廖杰, 等. 基于 PLUS—SD 耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1246-1258.
JIANG X F, DUANG H C, LIAO J, et al. Land use in the Gan-lin-gao region of middle reaches of Heihe River Basin based on a PLUS—SD coupling model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1246-1258.
- [9] 李琛, 高彬, 吴映梅, 等. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 84-94.
LI C, GAO B B, WU Y M, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS Model[J]. Journal of Zhejiang A&F University,

- 2022,39(1):84-94.
- [10] LI C, WU Y M, GAO B P, et al. Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132: e108328.
- [11] 冀泳帆, 贾鲁净, 杨联安, 等. 耦合 InVEST—PLUS 模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 123-132.
- JI Y F, JIA L J, YANG L A, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat quality in Yulin city coupled with InVEST—PLUS model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 123-132.
- [12] 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省委储量演化分析与预测[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 151-158.
- SUN F H, FANG F M, HONG W L, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST Model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 151-158.
- [13] BHAGABATI N K, RICKETTS T, SULISTYAWAN T B S, et al. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans[J]. *Biological Conservation*, 2014, 169: 147-156.
- [14] 张徐, 李云霞, 吕春娟, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展[J]. *生态科学*, 2022, 41(1): 237-242.
- ZHANG X, LI Y X, LYU C J, et al. Research progress on application of ecosystem service functions based on InVEST model[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 237-242.
- [15] 张斌, 李璐, 夏秋月, 等. “三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响: 以武汉城市圈为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2265-2280.
- ZHANG B, LI L, XIA Q Y, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: A case study of Wuhan City Circle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2265-2280.
- [16] 赵寿露, 李石华, 许新惠, 等. 耦合 MOP—FLUS 模型的滇中城市群“三生”空间格局优化[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 322-328.
- ZHAO S L, LI S H, XU X H, et al. Production-life-ecological space pattern optimization of the urban agglomeration in central Yunnan based on coupled mop and flus model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 322-328.
- [17] 赵旭, 汤峰, 张蓬涛, 等. 基于 CLUE—S 模型的县域生产—生活—生态空间冲突动态模拟及特征分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5897-5908.
- ZHAO X, TANG F, ZHANG P T, et al. Dynamic simulation and characteristic analysis of county production-living-ecological spatial conflicts based on CLUE—S model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5897-5908.
- [18] 陈竹安, 冯祥瑞, 洪志强, 等. 南昌市土地利用的空间冲突风险评估及分区优化研究: 基于“三生空间”视角[J]. *世界地理研究*, 2021, 30(3): 533-545.
- CHEN Z A, FENG X R, HONG Z Q, et al. Research on spatial conflict calculation and zoning optimization of land use in Nanchang City from the perspective of “three living spaces”[J]. *World Regional Studies*, 2021, 30(3): 533-545.
- [19] 王珊珊, 毋兆鹏, 王娟娟, 等. 新疆乌鲁木齐市“三生”用地的空间冲突研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 330-337.
- WANG S S, WU Z P, W J J, et al. Spatial conflicts of productive-living-ecological land in Urumqi City of Xinjiang Wei Autonomous Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 330-337.
- [20] 陈影, 张利, 何玲, 等. 基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟[J]. *生态学报*, 2016, 36(17): 5391-5400.
- CHEN Y, ZHANG L, HE L, et al. Multi-scenario simulation of land use structure based on dual combined models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5391-5400.
- [21] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 等. 耦合 MOP 与 GeoSOS—FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1171-1185.
- CAO S, JING X B, YANG X H, et al. Coupled MOP and GeoSOS—FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1171-1185.
- [22] 李志英, 李媛媛, 汪琳, 等. 云南省国土空间“三生”功能特征及分区优化研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(6): 94-101.
- LI Z Y, LI Y Y, WANG L, et al. Study on the functional characteristics and division optimization of “Production-Living-Ecological” of geographical space in Yunnan Province[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(6): 94-101.
- [23] 祁苑玲, 周晓琴. 对云南国土空间开发的思考[J]. *创造*, 2019, 27(3): 59-63.
- QI Y L, ZHOU X Q. Reflections on the development of land space in Yunnan Province[J]. *Creation*, 2019, 27(3): 59-63.
- [24] 冯长春, 曹敏政, 谢婷婷. 不同生态保育尺度下铜陵市土地利用结构优化[J]. *地理研究*, 2014, 33(12): 2217-2227.
- FANG C C, CAO M Z, XIE T T. Optimization of land use structure in Tongling city based on different ecological conservation scales[J]. *Geographical Research*,

- 2014,33(12):2217-2227.
- [25] WANG Y, LI X M, ZHANG Q, et al. Projections of future land use changes: Multiple scenarios-based impacts analysis on ecosystem services for Wuhan city, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 430-445.
- [26] 张潇, 谷人旭. 土地利用冲突的时空格局刻画与多情景模拟研究: 以长江三角洲城市群为例[J]. *地理研究*, 2022, 41(5): 1311-1326.
- ZHANG X, GU R X. Spatio-temporal pattern and multi-scenario simulation of land use conflict: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1311-1326.
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [28] 李安林, 周艳, 唐丽毅, 等. 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 A L, ZHOU Y, TANG L Y, et al. Land use simulation and ecosystem services values evaluation in Nujiang prefecture: A multiple-scenario analysis based on PLUS model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(1): 140-149.
- [29] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
- ZHANG X R, ZHOU J, LI M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 160-178.
- [30] SHARP R, CHAPLIN-KRAMER R, WOOD S, et al. InVEST User's Guide [EB/OL]. [2023-08-05]. <https://naturalcap2talprofect.stanford.edu/software/invest>.
- [31] 李怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于 InVEST 和 MCR 模型的南方山地丘陵区生态保护红线优化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(11): 2980-2994.
- LI Y, ZHAO X M, GUO X, et al. Optimization of ecological red line in the hilly region of Southern China based on InVEST and MCR model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(11): 2980-2994.
- [32] 杨文仙, 李石华, 彭双云, 等. 顾及地形起伏的 InVEST 模型的生物多样性重要区识别: 以云南省为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4339-4348.
- YANG W X, LI S H, PENG S Y, et al. Identification of important biodiversity areas by InVEST model considering topographic relief: A case study of Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4339-4348.
- [33] 岳文泽, 夏皓轩, 吴桐, 等. 浙江省生境质量时空演变与生态红线评估[J]. *生态学报*, 2022, 42(15): 6406-6417.
- YUE W Z, XIA H X, WU T, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality and ecological red line assessment in Zhejiang Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6406-6417.
- [34] 彭佳捷, 周国华, 唐承丽, 等. 基于生态安全的快速城市化地区空间冲突测度: 以长株潭城市群为例[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1507-1519.
- PENG J J, ZHOU G H, TANG C L, et al. The analysis of spatial conflict measurement in fast urbanization region based on ecological security: A case study of Changsha Zhuzhou Xiangtan urban agglomeration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1507-1519.
- [35] 陈晓, 刘小鹏, 王鹏, 等. 旱区生态移民空间冲突的生态风险研究: 以宁夏红寺堡区为例[J]. *人文地理*, 2018, 33(5): 106-113.
- CHEN X, LIU X P, WANG P, et al. Study on the ecological risk of spatial conflicts of ecological migrants in arid areas: A case study of Hongsibu in Ningxia[J]. *Human Geography*, 2018, 33(5): 106-113.
- [36] 刘强, 杨众养, 陈毅青, 等. 基于 CA-Markov 多情景模拟的海南岛土地利用变化及其生态环境效应[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(7): 1522-1531.
- LIU Q, YANG Z Y, CHEN Y Q, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its eco-environmental effect in Hainan Island based on CA-Markov model[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(7): 1522-1531.
- [37] 胥丽, 国朝胜, 罗绍龙. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的昆明市生境质量研究[J]. *三峡生态环境监测*, 2023, 8(1): 102-112.
- XU L, GUO C S, LUO S L. Predicted habitat quality of Kunming City based on PLUS and InVEST Model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2023, 8(1): 102-112.