

基于MOP-PLUS的湖南省三生空间和生境质量动态模拟

金欣宇, 赵先超

(湖南工业大学城市与环境学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: [目的] 探究湖南省三生空间未来发展及对未来生境质量评价, 兼顾经济、生态发展, 对国土空间资源配置和生态安全管理起着重要的作用。[方法] 基于 1990—2020 年土地利用数据, 通过土地利用转移矩阵和动态度分析湖南省 1990—2020 年三生空间构成, 使用多目标规划模型构建不同发展情景, 利用 PLUS、InVEST 模型预测和分析不同发展情景土地利用变化。[结果] 1) 1990—2020 年湖南省生态空间占比最大, 约为 69.44%, 生产空间次之, 约占 28.74%, 生活空间占比最小; 生产空间和生态空间转换频繁, 生活空间转换面积虽小, 变化幅度最大。2) 4 种情景下均存在生产和生态空间减少、生活空间增加的趋势; 生产和生活空间优先发展情景下生活空间增长最快, 经济效益最大, 是 2020 年的 1.23 倍; 生态空间优先发展和自然发展情景下生态空间面积降幅小, 生态效益较 2020 年降幅分别为 0.098%、0.150%, 但经济效益较低; 三生空间均衡协调发展情景下保护生态空间的同时满足区域发展的需求, 兼顾生态效益和经济效益。3) 1990—2020 年湖南省优等级生境质量占比最大, 整体生境质量较好, 波动不大, 有下降态势。模拟得到的 2030 年生境质量均有小幅度下降。[结论] 湖南省 2030 年生境质量变化不大, 三生空间均衡协调发展情景兼顾经济、生态效益, 适合地区未来发展。

关键词: 三生空间; PLUS; 生境质量; 湖南省

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0309-13

Dynamic Simulation of Production-Living-Ecological Space and Habitat Quality in Hunan Province Based on MOP-PLUS

JIN Xinyu, ZHAO Xianchao

(School of Urban and Environmental Studies, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: [Objective] To explore the future development of production-living-ecological space and evaluate the future habitat quality in Hunan Province, considering both economic and ecological development, which plays an important role in the allocation of land spatial resources and ecological security management. [Methods] Based on the land use data from 1990 to 2020, land use transfer matrix and dynamic degree analysis were used to analyze the composition of the production-living-ecological space in Hunan Province in the past 30 years. The multi-object planning model was used to build different development scenarios, and the PLUS and InVEST models were employed to predict and analyze land use changes under these scenarios. [Results] 1) From 1990 to 2020, ecological space accounted for the largest proportion in Hunan Province, approximately 69.44%, followed by production space at about 28.74%, and the smallest proportion was living space. Frequent conversion occurred between production and ecological spaces, while the living space conversion, although smaller in area, had the largest variation. 2) All four scenarios showed a trend of a reduction in production and ecological spaces, and an

收稿日期: 2025-02-21

修回日期: 2025-03-21

录用日期: 2025-03-31

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-19

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (42201230); 湖南省教育厅科学研究重点项目 (22A0419)

第一作者: 金欣宇 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事城乡发展与区域规划研究。E-mail: pangjuanJin@163.com

通信作者: 赵先超 (1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事低碳生态规划与低碳发展模拟研究。E-mail: zhaoxianchao@hut.edu.cn

increase in living space. In the scenario prioritizing the development of production and living spaces, the growth of living space was the fastest, with the greatest economic benefit, reaching 1.23 times that of 2020. In the scenarios prioritizing ecological development and natural development, the reduction of ecological space was smaller, with the ecological benefits decreasing by 0.098% and 0.150%, respectively, compared to 2020, but the economic benefits were lower. The balanced and coordinated development scenario of the production-living-ecological space protected ecological space while meeting regional development needs, balancing ecological and economic benefits. 3) From 1990 to 2020, the proportion of high-quality habitats in Hunan Province was the largest, with relatively good overall habitat quality, showing little fluctuation but with a downward trend. The simulation predicted a slight decline in habitat quality by 2030. [Conclusion] The habitat quality change in Hunan Province by 2030 is expected to be minor. The balanced and coordinated development of the production-living-ecological space, which considers both economic and ecological benefits, is most suitable for the future development of the region.

Keywords: production-living-ecological space; PLUS; habitat quality; Hunan Province

Received: 2025-02-21

Revised: 2025-03-21

Accepted: 2025-03-31

Online(www.cnki.net): 2025-06-19

土地承载着人类活动,也是社会经济发展的基本生产要素。快速城镇化和人口增长对土地利用空间格局产生变化,人类活动强度不断加大,生态空间受到威胁,生产、生活、生态空间发展显现不平衡。明确国土空间性质和功能,合理布局土地资源,兼顾区域经济发展、生态安全、社会进步等目标实现最优解,对区域高质量、可持续发展产生重要影响。2012年党的十八大首次提出生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀,2019年划定国土空间规划的主要目标,明确三生空间总要求。优化土地利用结构,科学识别和协调三生空间是国土空间治理精细化、主体功能区战略落实深化的重要基础^[1]。三生空间的格局演变及其土地上承载的功能与区域社会经济发展紧密联系,逐渐在国土空间研究领域发挥关键作用。

三生空间作为一种综合性的空间分区方式,为国土空间开发与保护过程中的空间发展适宜性评价和空间功能最大化利用提供新视角^[2]。新时期国土空间规划中的三生空间打破根据已有体系定分区,转向以功能作为分区依据。已有关于三生空间研究所使用的数据可分为土地利用数据和POI、AOI等大数据,研究尺度包括省、城市群、市,研究内容主要包括内涵界定^[3]、空间格局演变和影响因素研究^[4]、生态环境效应评价^[5]和多情景模拟^[6]。未来三生空间的识别、优化和土地效应评价是新时期国土空间规划的落实重要环节,因此对三生空间的模拟和生态环境评价已成为土地利用模拟研究的热点。其中,常见的土地利用模拟模型有人工神经网络和元胞自动机模型^[7]、系统动力学模型^[8]、CLUE模型^[9]、FLUS模型^[10]和PLUS模型^[11]。刘荣增等^[7]通过计

算影响因子与实际建设用地关系,利用元胞自动机模拟研究区未来增长边界;王奕淇等^[8]通过构建社会、经济、资源与环境子系统,运用系统动力学模型模拟不同发展情景探索研究区未来可持续发展方案。综合考虑空间尺度、空间差异、地类转换^[12]等因素可知,PLUS模型在景观格局、位置和数量模拟方面的精度较高^[13]。生态环境评价方法大致可分为指标体系和模型构建,其中,InVEST模型中生境质量模块是评估生态效应的重要方法,有精度较高、操作便捷、可视化能力强等优点。朱梅涛等^[14]基于InVEST分析首都经济圈生境质量,通过全局自相关和时空地理加权回归模型探究生境质量空间分布和影响因素;张晓瑞等^[15]借助InVEST评价合肥市过去及未来生境质量,并利用生境贡献率探求地类转变对生境质量的影响。通过梳理可知,已有的模型预测大多以土地利用数量或空间格局单一方法作为土地利用优化方向^[16],在土地利用基础上兼顾生态、经济、社会效益的研究较少,耦合多目标规划模型、PLUS和InVEST模型探求未来三生空间格局分异和生境质量变化的相关研究较少。

湖南省位于长江经济带和中国南岭山地森林重点生态功能区,其生态战略位置对于全国生态体系功能稳定具有重要意义^[17]。湖南省因其人均耕地面积少,城镇快速发展,生态、生产、生活空间不均衡,三生空间的内部联系破坏等原因,生态安全和可持续发展受到影响。基于此,本研究基于1990—2020年的土地利用数据,将多目标规划模型、PLUS和InVEST模型耦合,从数量结构和空间布局上实现优化,创造性地将生态效益和经济效益作为条件,

用于设置倾向生产生活空间、生态空间及三生空间均衡协调发展更具有现实意义的土地利用发展情景,寻求生态与社会经济发展协同治理拐点。分析湖南省三生空间构成和空间之间的转换,以及不同发展情景下的生境质量,实现三生空间格局分析-模拟-评估,以期为湖南省 2030 年加强空间功能的内在联系和合理土地利用格局提供科学的决策依据及借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖南省(24°38′~30°08′N,108°47′~114°15′E)简称“湘”,有“芙蓉国”之称,位于长江中游,承接东西部和南北部,是东部沿海地区和中西部地区的过渡带(图 1)。地形呈向东北开口的马蹄形,地貌以山地和丘陵为主,合计占总面积的 66.62%,东部、南部、西部三面环山,中部丘岗起伏,北部是洞庭湖平原,地势平坦,省内土地利用面积林地占比最大,耕地次之。湖南省为大陆性亚热带季风湿润气候,气候变化大,夏季炎热,冬季寒冷,降水集中于春秋。省内植被资源丰富,生物资源多样,河网密布,水系发达,其中,洞庭湖是中国水量最大、水面面积第二大的淡水湖。

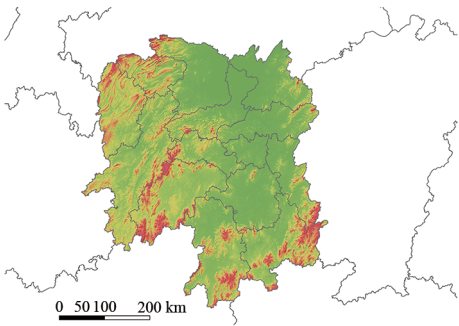


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

地形地貌影响地类的可利用程度,进而影响三生空间格局分布,湖南省林地资源丰富,气候特征是影响植被生长状况的重要方面。人类社会经济活动对土地利用类型转变有重要影响,客流、物流所需的公路也对三生空间功能和动态演变产生影响。基于已有研究^[18-19]成果和数据的可获得性,从自然、社会和经济角度选取 9 个指标作为未来土地利用变化的影响因子。自然因素指标选取年平均气温、年平均降水、NDVI、坡度和起伏度等,社会经济因素指标选取夜间灯光、GDP、年末人口和距高速公路距离,具体信息见表 1。基于 PLUS 模型要求,所有栅格均统一分辨率 300 m×300 m,保证土地利用坐标和行列数一致。

表 1 数据说明

Table 1 Data description

选取层面	数据名称	年份	分辨率	数据来源
自然因素	土地利用数据	1990 年、2000 年、 2010 年、2020 年	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心
	年平均气温	2020 年	1 km	国家地球系统科学数据中心
	年平均降水	2020 年	1 km	
	NDVI	2020 年	1 km	https://search.earthdata.nasa.gov/search
	坡度	—	90 m	地理空间数据云获得,基于 DEM 数据运用 GIS 计算得到
	起伏度	—	90 m	
社会经济因素	夜间灯光	2020 年	500 m	Earth Observation Group
	GDP	2020 年	—	湖南省 2021 年统计年鉴
	年末人口	2020 年	—	
	距高速公路距离	—	—	Open Street Map 获得,在 GIS 中运用欧氏距离工具计算得到

2 研究思路与方法

2.1 研究思路

本研究结合多源数据分析 1990—2020 年湖南省三生空间构成,模拟 2030 年湖南省三生空间并进行生境质量评估分析,主要分为 4 个步骤:1)分析湖南省 1990—2020 年三生空间构成变化、各地类驱动因子及生境质量评价;2)运用 MOP 多目标规划模型确定不同情景的各类土地空间数量;3)运用 PLUS 模型,投入影响因子和土地数量对 2030 年 4 个情景进行模拟;4)对模拟得到的土地利用分析 4 种情景的三

生空间分布、经济效益、生态效益及生境质量(图 2)。

2.2 土地利用动态度

土地利用动态度可用于衡量土地利用变化的速率和范围,反映一段时间内研究区内的某种土地利用类型在一定时间内数量变化^[20]。

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\%$$

(1)

式中:K 为研究期内某种土地利用类型的单一动态度;U_b为期末该土地利用类型总面积;U_a为起始年该土地利用类型总面积;T 为时间段,取 T=10。

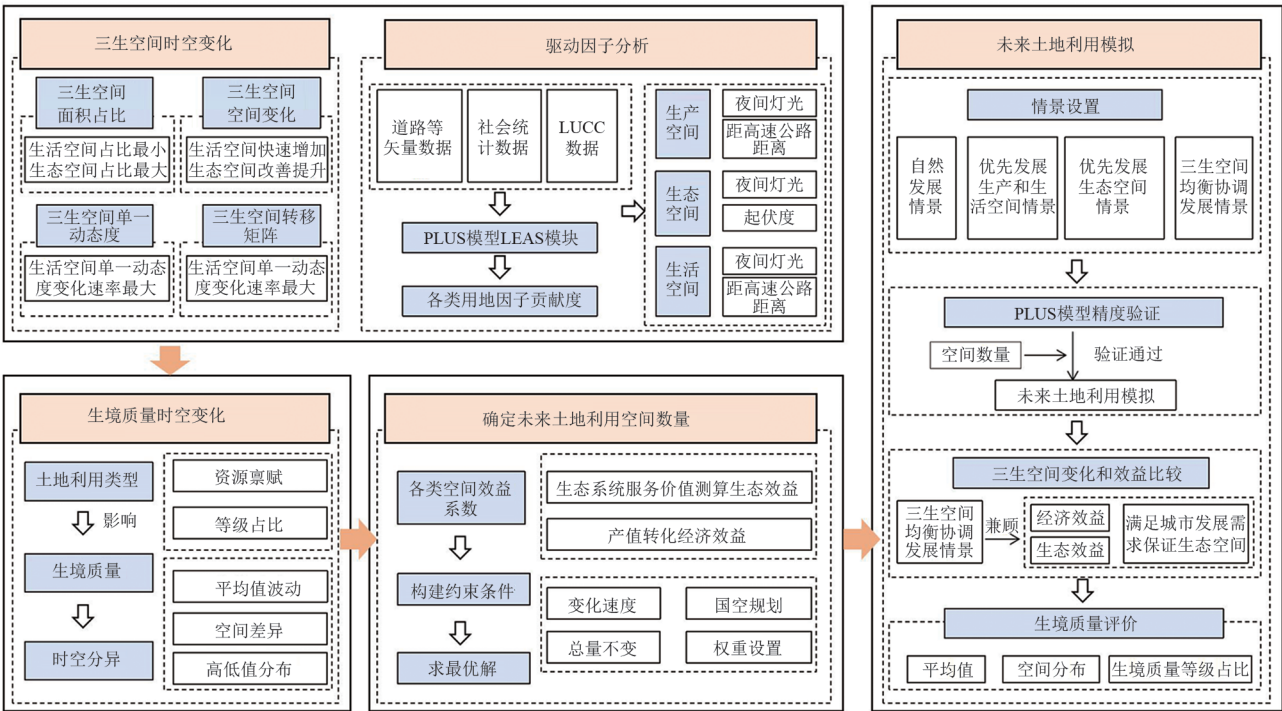


图 2 技术路线
Fig. 2 Technical workflow

2.3 多目标规划模型

多目标规划模型(multi-object planning, MOP)由目标函数、决策变量、约束条件 3 个模块构成^[21],是进行预测、优化目标的重要方法,也是土地利用优化研究的重要模型,广泛用于研究地理学和区域经济发展。

MaxF₁(x)=∑_jⁿc_jx_j (2)

MaxF₂(x)=∑_jⁿd_jx_j (3)

s.t.⎧⎪⎩∑_{j=1}ⁿa_{ij}x_j=(≥,≤)b_i(i=1,2,3,⋯,m)⎫⎪⎬x_j≥0(j=1,2,3,⋯,n)⎭ (4)

式中:F₁(x)为经济效益,万元;F₂(x)为生态效益,万元;x_j为第j类土地利用的面积,km²;c_j为经济效益系数,万元/km²;d_j为生态效益系数,万元/km²;b_i为j类土地利用的约束面积,km²;a_{ij}为系数,对应第i个约束条件中j变量。

按照三生空间功能对不同土地利用类型进行划分;根据已有研究^[22]成果用单位面积生态系统服务系统的平均值计算生态效益;各类用地经济效益用产值表现(表 2),其中耕地用农业产值表示,林地用林业产值表示,草地用牧业产值表示,水域用渔业产值表示,建设用地用第二、三产业收入表示^[23],未利用地经济系数为 0,忽略不计。

表 2 国土空间分类和效益系数
Table 2 Classification of land space and benefit coefficients

国土空间类型	功能	土地利用类型	生态效益系数/ (10 ⁵ 元·km ⁻²)	经济效益系数/ (10 ⁵ 元·km ⁻²)
生产空间	种植、生产、采集作物	水田	10.38	77.42
		旱地	10.79	
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)	林地	50.29	4.17
		草地	31.34	412.32
		水域	337.95	98.37
	生态容纳	未利用地	1.93	0
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	建设用地	0	8 850.10

2.3.1 不同发展情景设置 根据湖南省的生态保护目标、经济社会发展,参考已有研究^[24],设定 4 种情景,分别为自然发展情景、优先发展生产和生活空间情景、优先发展生态空间情景、三生空间均衡协调发

展情景。其中,自然发展情景是利用 PLUS 模型中的 Markov 链得到;优先发展生产和生活空间、优先发展生态空间、三生空间均衡协调发展 3 种情景结合已有研究^[25],确定经济效益目标权重分别为 0.8、0.2、0.5,

生态效益目标权重分别为 0.2、0.8、0.5。

2.3.2 构建约束条件 根据现有规划政策衔接,结合 2010—2020 年的三生空间对应的土地变化规律构建约束条件(表 3),其中,生产空间对应的用地类型为耕地,生态空间对应林地、草地、水域和未利用地类型,建设用地属于生活空间。

表 3 目标函数约束条件
Table 3 Objective function constraints

约束因素	约束条件/km ²	约束说明
总面积	$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+X_6=183\ 917.61$	土地总面积为 183 917.61 km ² ,保持不变
耕地面积	$50\ 577.56\leq X_1\leq 56\ 454.65$	X_1 为生产空间中的耕地,根据《湖南省国土空间规划(2021—2035 年)》明确未来耕地保有量不少于 3.58×10^6 hm ² ,最小值根据 2010—2020 年耕地面积退化速度设定,最大值设定为比 2020 年耕地面积增加 10%
林地面积	$114\ 031.13\leq X_2\leq 114\ 973.47$	X_2 为生态空间中的林地,最小值根据 2010—2020 年林地面积变化速度设定,最大值为 2010 年林地面积
草地面积	$5\ 869.42\leq X_3\leq 6\ 078.87$	X_3 为生态空间中的草地,按 2010—2020 年草地面积退化速度的 1.2 倍设定最小值,最大值设置为 2010 年草地面积
水域面积	$6\ 280.38\leq X_4\leq 6\ 325.7$	X_4 为生态空间中的水域,最小规模设为 2020 年水域面积;最大规模按 2010—2020 年水域面积的原有增速设定
建设用地面积	$4\ 979.34\leq X_5\leq 5\ 975.21$	X_5 为生活空间中的建设用地,最小值不低于现有建设用地面积,根据《湖南省国土空间规划(2021—2035 年)》2035 年城镇开发边界扩展控制为 2020 年城镇建设用地规模的 1.3 倍以内,结合相关研究 ^[18] ,最大规模设置为 2020 年面积 1.30 倍(经济优先 6 473.14)、1.20 倍(生态优先 5 975.21)、2010—2020 年建设用地面积原有增速(6 271.56 协同发展)
未利用地面积	$835.5\leq X_6\leq 851.31$	X_6 为生态空间中的未利用地,以 2020 年未利用地面积为上限,下限根据 2010—2020 年未利用地面积退化速度设定

2.4 PLUS 模型

PLUS 可用于模拟预测和分析未来土地利用,包含土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类随机斑块种子的 CA 模型(CARS)。使用 LEAS 可对 2 期土地利用各类用地的扩张部分进行提取,得到各类用地扩张的驱动力因子贡献度和每类用地的发展概率。在 CARS 模块中输入土地利用数据和用地扩张分析策略得到的结果,设置在不同情景下未来土地利用的参数,可模拟未来土地利用情况。邻域权重反映各地类在空间驱动因子影响下的扩张能力^[26],通过公式(5)计算可得,耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的邻域权重分别为 0.58、0.36、0.06、0.02、1.00、0。

$$W_i=\frac{TA_i- TA_{\min}}{TA_{\max}- TA_{\min}}$$

(5)

式中: W_i 为第 i 类土地类型的邻域权重; TA_i 为第 i 类土地利用扩张面积; $TA_{\min}$ 和 $TA_{\max}$ 分别为各类土地利用最小扩张面积和最大扩张面积。

2.5 生境质量评价

InVEST 生境质量模型是通过结合不同土地利用类型对威胁源的敏感程度和外界威胁强度来计算生境退化程度,进而计算生境质量^[27]。通过对不同发展情景进行生境质量评估来比较生态状况,计算公式为:

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^R\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R\omega_r}\right)r_yi_{rxy}\beta_xS_{jr}$$

(6)

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

(7)

式中: D_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的总体威胁水平; Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量; ω_r 为威胁因子的权重; R 为胁迫因子数; r_y 为胁迫值; y 为胁迫因子; r 栅格图层栅格数; H_j 为土地类型 j 的生境适宜程度; k 为半饱和系数 0.5^[28]; D_{xj}^z 为土地利用类型 j 栅格 x 的生境退化度; i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫因子值 r_y 对生境栅格 x 的胁迫水平; Z 为归一化常量,通常取 2.5; β_x 为生境抗干扰水平; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感度。

基于模型使用手册和前人^[29-30]研究,结合研究区实际情况对威胁源和敏感度相关参数进行设置(表 4、表 5)。

表 4 威胁源属性
Table 4 Threat source attributes

威胁因子	权重	最大威胁距离	距离衰减类型
耕地	0.8	1	线性型
建设用地	0.7	2	指数型

3 结果与分析

3.1 三生空间构成变化

基于湖南省 1990—2020 年 4 期土地利用数据计算各期三生空间面积及占比。由表 6 可知,以生态空间为主的湖南省土地利用格局总体保持稳定,生活空间占比最小,具体表现为生产空间面积不断减少,由

1990年的54 160.20 km²到2020年51 322.41 km²,减少2 837.79 km²;生态空间面积先上升后下降,占比由1990年的69.32%到2010年69.68%,达到最高峰,在2020年占比为69.39%,1990—2020年增加125.1 km²,与湖南省政府几十年来持续注重生态保护有关;生活空间面积持续增加,增加2 714.94 km²,占比由1990年的1.23%上升至2020年的2.71%,可能是快速城镇化引起的建设用地扩张。

从土地利用单一动态度来看,生活空间的土地利用单一动态度在3个时间段中变化速率均最大,其次是生态空间,最后是生产空间。生产空间动态度为负值,表明生产空间在1990—2020年均呈减少趋势;生活空间在2000—2010年变化最强烈,单一动态度为4.81,可能是在1990—2020年人口增长迅速背景下,建设用地需求不断增长,湖南省耕地被占用转

为建设用地以支撑城镇化发展,2010—2020年生活空间变化速率相比2000—2010年减少1.31%。随着社会经济的发展,人们受教育程度提高,对土地利用效率和城市空间布局、规划以及集约思想的接受在一定程度上减缓了建设用地面积扩张;生态空间动态度1990—2010年均均为正值,在2010—2020年为-0.04%,呈下降趋势。

表 5 生境类型及其对威胁源的敏感性
Table 5 Habitat types and their sensitivity to threat sources

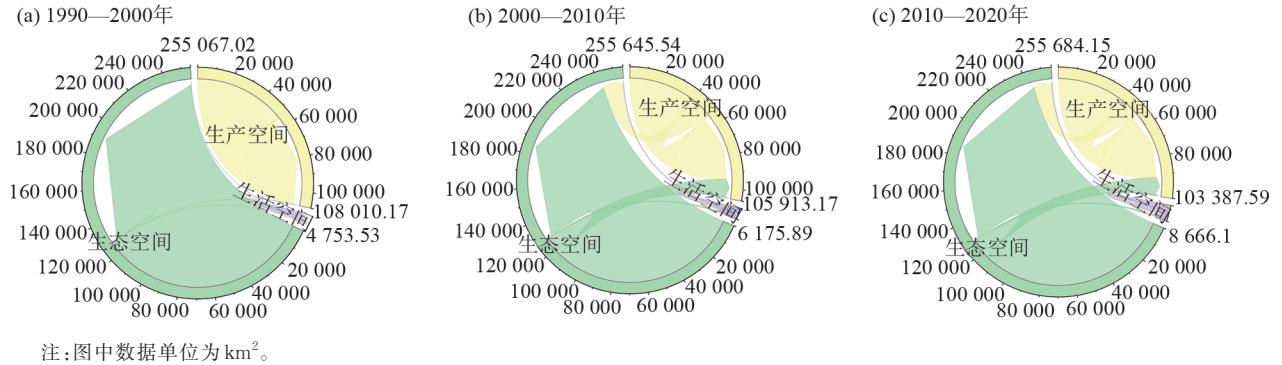
土地利用类型	生境适宜度	耕地	建设用地
耕地	0.5	0	0.65
林地	1.0	0.70	0.80
草地	1.0	0.70	0.70
水域	1.0	0.55	0.75
建设用地	0	0	0
未利用地	1.0	0.20	0.20

表 6 1990—2020年湖南省三生空间面积、占比及动态度
Table 6 Area, proportion, and dynamic degree of production-living-ecological space in Hunan Province from 1990 to 2020

三生空间 类型	1990年		2000年		2010年		2020年		1990— 2000年	2000— 2010年	2010— 2020年
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	K值/%	K值/%	K值/%
生产空间	54 160.20	29.45	53 849.97	29.28	52 078.23	28.32	51 322.41	27.91	-0.06	-0.33	-0.15
生态空间	127 490.76	69.32	127 576.80	69.37	128 155.14	69.68	127 615.86	69.39	0.01	0.05	-0.04
生活空间	2 264.40	1.23	2 489.22	1.35	3 687.12	2.00	4 979.34	2.71	0.99	4.81	3.50

基于1990—2000年的土地利用数据,利用ArcGIS软件计算出湖南省三生空间转移矩阵(图3),绘制各时间段三生空间的转化关系(图4)。由图3可知,1990—2020年共转换53 309.07 km²土地,生产空间共转出26 652.87 km²,其中,转向生态空间面积远超过转为生活空间面积,在2000—2010年转为生态空间面积达到12 466.44 km²,与2000年起湖南启动退耕还林工程有关。生活空间共转出2 253.69 km²,随着时间的推移,生活空间对生产空间和生态空间的转出面积呈稳定增加趋势,并在2010—2020年转为生产空间,达781.11 km²,可能是该时期湖南省坚守耕地红线,严格控制建设用地占用行为,并出台建

设用地项目土地复垦工作指示。生态空间共转出24 402.51 km²,其中转为生产空间占比91.62%,共22 358.52 km²,转为生活空间2 043.99 km²,占比8.38%。结合图4,从空间上看,2010—2020年生活空间快速增加,挤占周围的生产空间和生态空间,长株潭三市特别是其中心区域生活空间增长尤为明显,可能是该区域的人口和产业密度较大,对公共设施需求高,进而通过扩大生活空间面积来满足建设需要。2000—2010年,以郴州市东部为例,大量生产空间转变为生态空间,并在2010—2020年始终保持为生态空间,进一步从空间上体现湖南省退耕还林的决心和成效。



注:图中数据单位为 km²。

图 3 1990—2020年三生空间转移弦图
Fig.3 Chord diagram of production-living-ecological space transfer from 1990 to 2020
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

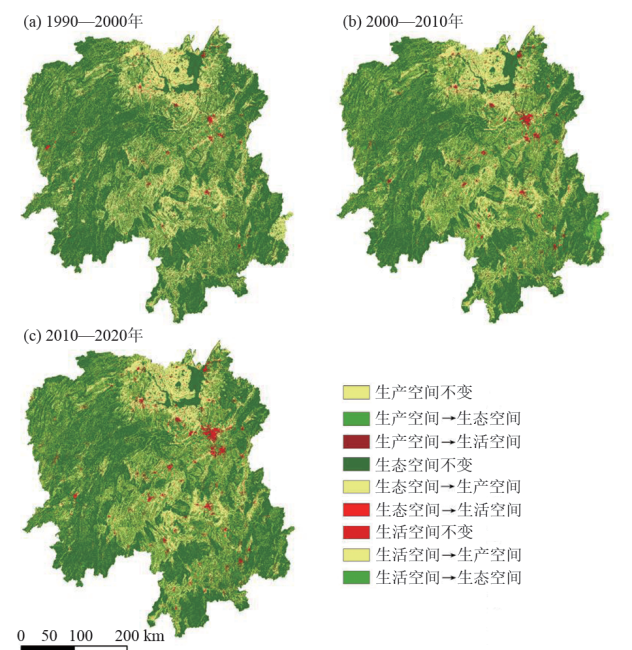


图 4 1990—2020 年三生空间转换

Fig. 4 Transformation of production-living-ecological space from 1990 to 2020

3.2 驱动因子分析

将 2010 年和 2020 年土地利用数据导入 PLUS 模型的 LEAS 模块,通过随机森林算法得到 9 个驱动因子对各用地类型的贡献度(图 5),并将各地类扩张区域和高贡献值的驱动因子叠加(图 6)。由图 5 可知,夜间灯光是耕地、林地、草地、建设用地扩张的主要驱动因子,贡献值分别为 19.64%、20.68%、22.34%、36.32%;起伏度对水体和未利用地的扩张贡献最大,贡献值为 38.38%、44.91%。

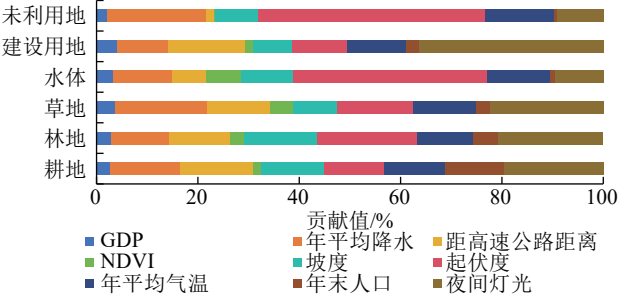


图 5 驱动因子贡献度

Fig. 5 Contribution of driving factors

由图 6 可知,划入生产空间的耕地扩张区域主要分布在夜间灯光值较小,人口较少,远离高速公路的区域,这 3 类因子反映人类干扰程度,可能的原因是人类活动频繁,对生活空间需求增多进而侵占耕地,因此耕地扩张区域主要分布在人类干扰程度较小的区域;划入生态空间的林地和草地扩张区域聚集在夜间灯光值较小区域,并受年平均降水、距高速公路距离、坡度、起伏度、年平均气温影响较大,与降水、坡度和气温等自然条件是林地和草地的生长的主要

条件密切相关,起伏度直接影响水域形成情况,未利用地扩张受起伏度影响最大,也受年平均降水、坡度、年平均气温等因子影响,可能是起伏度较大区域的土地利用程度较低,降水、气温等自然条件也加大土地整治难度;生活空间的建设用地扩张受夜间灯光值和距高速公路距离影响,扩张区域集中在交通便利、经济活动频繁、人口聚集区域,说明社会经济活动和建设需求是影响建设用地扩张的重要原因;GDP 和 NDVI 对所有用地类型贡献度都较小,可能是精细化发展目标下,高阶阶段经济增长对土地利用类型变化未造成大幅度影响,进而 NDVI 变化幅度不大。通过分析可知,生产空间和生活空间扩张受夜间灯光影响最大,夜间灯光、起伏度、坡度、降水等是生态空间扩张的重要驱动因子,三生空间扩张受 GDP 和 NDVI 影响较小。

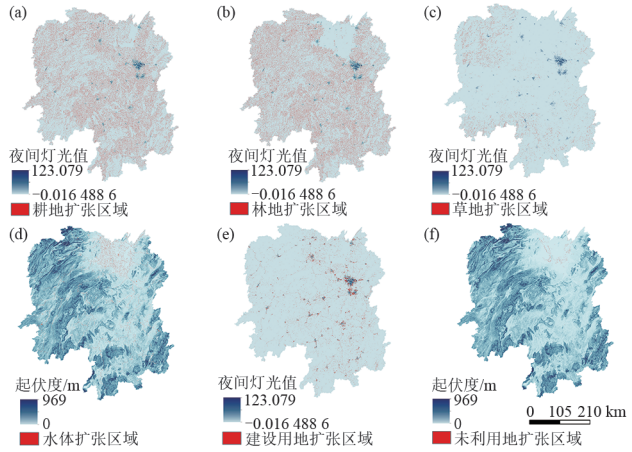


图 6 湖南省用地扩张与最高贡献度驱动因子叠加

Fig. 6 Overlay of land expansion and driving factors with the highest contribution in Hunan Province

3.3 生境质量评价

基于 InVEST 模型对 4 期土地利用进行生境质量评估,由图 7 可知,从空间分布看,湖南省生境质量与土地利用类型紧密关联,空间差异明显,优等级生境质量分布最广,差等级生境质量区域呈聚集状。西部整体生境质量值明显高于东部,与西部武陵山—雪峰山一带良好的资源禀赋,用地多为林地,植被覆盖率高,生物多样性丰富有关。生境质量低值区集中在长株潭三市主城区,具体表现为长沙市、湘潭市东北部、株洲市西北部等生活空间,地类主要为建设用地,该区域人口密度高、地势平坦、植被种类单一,也与长株潭城市群发展规划相关。

将生境质量结果分为差(0~0.3)、一般(0.3~0.5)、良好(0.5~0.8)和优(0.8~1.0)4 个等级,并计算各等级的占比和转移矩阵(表 7、表 8)。结果显示,湖南省生境质量平均值 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年分别为 0.759 2、0.758 5、0.753 0、0.744 6。

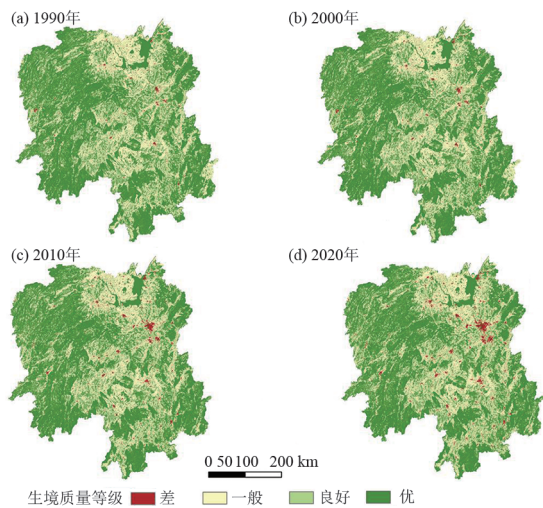


图 7 生境质量分布

Fig. 7 Spatial distribution of habitat quality

由表 7 可知,1990—2020 年,差等级和良好等级生境质量面积增加,分别增加 2 517.39、6 105.42 km²,优等级生境质量面积减少最多,共减少 6 704.91 km²,一般等级生境质量减少 1 922.31 km²。2020 年,良好生境质量面积为 28 886.76 km²,占比 15.71%;所有等级中优良生境质量占比最大,面积降幅最大,2020 年面积为 96 988.14 km²,比 1990 年面积占比减少 3.65%。

由表 8 可知,1990—2000 年,湖南省生境质量改善类型以一般→优和良好→优为主,共转换面积 367.20 km²,占总面积 0.20%;退化类型集中在优→良好和一般→差,共转移 753.75 km²,占总面积的 0.41%。2000—2010 年,生境质量改善类型以一般→良好、一般→优、良好→优为主,共转换面积 15 470.19 km²,占比 8.64%,退化面积较大的是优→良好、优→一般、良好→一般,共转换 17 732.97 km²,占总面积的 9.90%。2010—2020 年,退化面积较大的依旧是优→良好、优→一般、良好→一般,共转换面积 17 116.92 km²,占总面积的 9.59%,改善类型以一般→良好、一般→优、良好→优为主,共转换面积 14 013.63 km²,占比 7.85%。

总体来看,1990—2020 年湖南省生境质量等级转换中,一般、良好转为差等级面积增多,优等级转为其他等级面积最多,且占比超过 50%。省内林地资源丰富,林地面积占省内总面积 55% 以上,多年注重生态

文明建设保证优等级生境质量的优势占比。随着城镇化快速发展,人类活动加强,耕地、林地、草地等生产、生态空间转向建设用地,以满足对生活空间的需求,使得一般、良好转为差等级面积增多;退耕还林、耕地保护、控制建设用地扩张等措施一定程度减缓优等级转向差等级趋势。结合生境质量平均值,湖南省生境质量总体波动不大,略有下降。

3.4 多情景三生空间分布变化

基于 PLUS 模型利用湖南省 2010 年土地利用数据,得到 2020 年 Markov 链来预测 2020 年土地利用模式,并与 2020 年实际土地利用数据进行对比(图 8)表明,模型模拟总体精度为 0.833,PLUS 模型具有较高可靠性,能够满足模拟湖南省未来土地利用状况的研究要求。

对模拟得到的 2030 年湖南省土地利用数据进行三生空间可视化操作。由图 9 可知,生产空间集中分布于湖南省北部和中部,人口密集,水资源丰富,地势较平坦,适合耕作的地区。生态空间在湖南省西部的武陵山和雪峰山及东南部的南岭、九巍山等地区显著集中,依托于良好的自然资源,北部小范围集中体现在洞庭湖流域。4 种发展情景下的生活空间均表现为在长株潭地区显著聚集,并依托于该都市圈的政策支持、经济快速发展和通畅的交通网络布局,以长株潭都市圈为增长极向外辐射,沿着湘江和洞庭湖流域发展,形成常德、益阳、衡阳等多核心城市,呈多点分布格局。4 种发展情景中,生活空间由中心向周围蔓延,侵占生产空间和生态空间。自然发展情景下,建设用地增幅最小,对生产和生活空间侵占程度小,但难以满足地区经济发展需求;优先发展生产和生活空间情景中,建设用地在长株潭地区爆发式增长,明显多于其他发展情景,压缩周围的生产空间和生态空间,对生态安全造成影响;优先发展生态空间情景下,控制建设用地扩张,生态空间受到保护,保障生态效益,但不能保证区域正常发展空间;三生空间均衡协调发展情景下,建设用地扩张的同时,抑制对生态空间的侵占,使得生产、生态、生活空间均衡有序发展。

表 7 各等级生境质量面积及占比

Table 7 Area and proportion of habitat quality at different quality levels

等级	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差	2 465.46	1.34	2 689.56	1.46	3 839.49	2.09	4 982.85	2.71
一般	54 985.68	29.90	54 727.02	29.75	53 395.20	29.03	53 063.37	28.85
良好	22 781.34	12.39	23 189.22	12.61	26 173.08	14.23	28 886.76	15.71
优	103 693.05	56.38	103 319.73	56.17	100 517.76	54.65	96 988.14	52.73

表 8 各等级生境质量转移面积
Table 8 Transfer area of habitat quality at different grades
km²

生境质量等级	2000 年			
	差	一般	良好	优
2000 年				
差	2 463.93	0.81	0.09	0.63
一般	163.26	54 508.95	66.87	246.60
良好	40.05	100.89	22 519.80	120.60
优	19.80	127.89	590.49	102 954.87
2010 年				
生境质量等级	差	一般	良好	优
2000 年				
差	1 624.23	745.74	0.99	63.99
一般	1 463.04	40 775.67	4 387.50	6 881.85
良好	472.05	3 971.79	12 078.90	4 200.84
优	246.96	6 656.22	7 104.96	88 393.23
2020 年				
生境质量等级	差	一般	良好	优
2010 年				
差	2 449.53	888.03	1.26	28.26
一般	1 598.76	40 719.15	4 647.96	5 224.41
良好	602.91	4 383.36	14 264.19	4 141.26
优	292.23	5 753.79	6 979.77	86 536.98

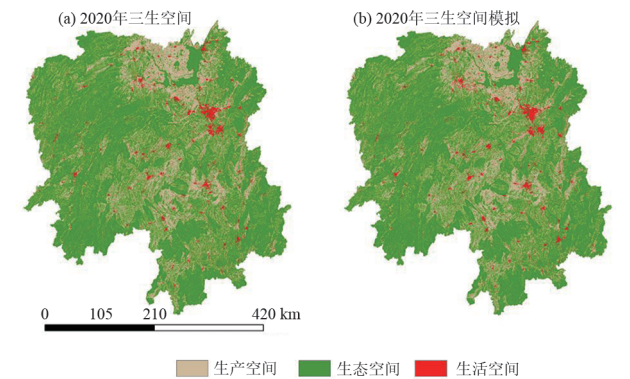


图 8 模拟精度验证
Fig. 8 Simulation accuracy validation

基于生态效益和经济效益目标,通过构建多目标情景约束条件,得到 4 种情景生态和经济效益及各情景三生空间数量。由图 10 可知,从三生空间变化来看,4 种发展情景下,生产空间、生态空间均呈下降趋势,生活空间表现为明显上升趋势。生产和生活空间优先发展情景下生活空间增长最快,生态空间优先发展情景下生态空间面积减速降低,减少面积为 282.69 km²。

自然发展情景下,与 2020 年土地利用相比,生产空间面积为 50 976.72 km²,减少 345.69 km²;生活空间面积为 5 813.37 km²,净增长 834.03 km²,涨幅为 16.75%;生态空间面积为 128 802.96 km²,草地和林地面积小幅减少,水域面积增加,其中林地

面积为 114 061.32 km²,草地面积为 5 902.56 km²,水域面积为 635.92 km²,未利用地面积为 837.72 km²。该情景下经济效益最低,生态效益较 2020 年降低 0.15%。

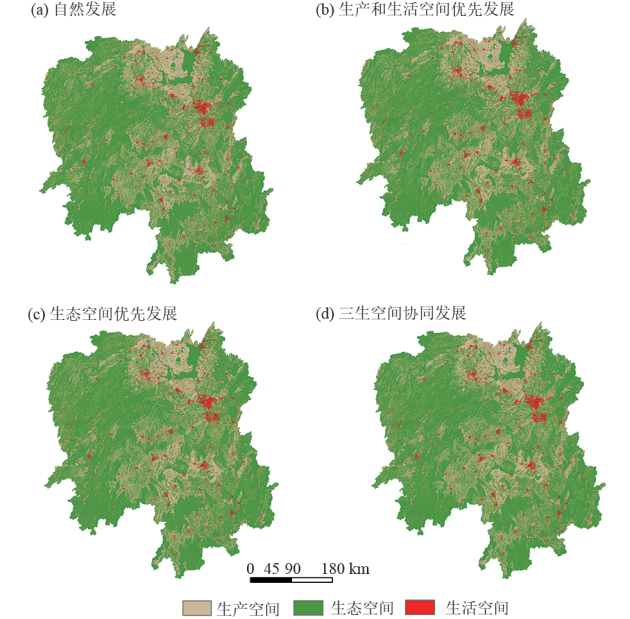


图 9 三生空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of production-living-ecological space

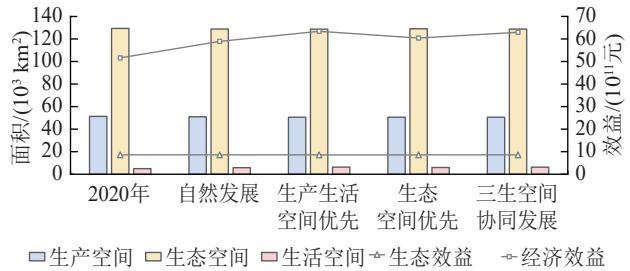


图 10 不同情景三生空间和效益对比
Fig. 10 Comparison of production-living-ecological space and benefits under different scenarios

优先发展生产和生活空间情景下,与 2020 年土地利用相比,生产空间面积为 50 577.57 km²;生活空间面积为 6 323.67 km²,净增长 1 344.33 km²,增幅达 27.00%;生态空间面积 128 687.31 km²,其中林地面积为 114 031.08 km²,草地面积为 5 869.44 km²,水域面积为 6 280.38 km²,未利用地面积 835.47 km²。此情景中,建设用地增长迅速,耕地按原有退化速度发展,生态空间面积显著减少且减少幅度最大,经济效益达到最大化。相较 2020 年经济效益,涨幅达 22.85%,但生态效益最低,不符合地区发展遵循的绿色可持续要求。

优先发展生态空间情景下,与 2020 年土地利用相比,生产空间面积为 50 577.57 km²;生活空间面积为 5 975.19 km²,净增长 995.85 km²,是优先发展生产和生活空间情景下生活空间占 2020 年比重的 0.9 倍;

生态空间面积 129 035.79 km², 其中林地面积为 114 124.77 km², 草地面积为 6 078.87 km², 水域面积为 6 325.74 km², 未利用地面积 835.47 km²。此情景中, 水域保持原有扩张速度增加, 生活空间扩张较少, 生态效益值最高, 但经济效益较低, 较 2020 年涨幅 17.05%。

三生空间均衡协调发展情景下, 与 2020 年土地利用相比, 生产空间面积为 50 577.57 km², 净减少 744.84 km²; 生活空间面积为 6 271.56 km², 涨幅 25.95%; 生态空间 128 739.42 km², 降幅 0.45%, 其中林地面积为 114 031.17 km², 草地面积为 5 921.46 km², 水域面积为 6 280.38 km², 未利用地面积 835.47 km²。此情景中, 水域面积为 2020 年水域面积, 经济效益相比于自然发展情景, 增幅 6.83%, 生态效益低于自然发展情景和优先发展生态空间情景, 高于优先发展生产和生活空间情景。

综上所述, 优先发展生产和生活空间情景经济效益最高, 建设用地增幅显著, 对生态空间破坏明显; 自然发展和生态空间优先发展情景生态效益较高, 但限制建设用地扩张不能满足经济发展需求; 三生空间均衡协调发展情景符合经济社会和生态相对平衡发展状态, 实现效益最优化。

3.5 生境质量模拟评价

以模拟的 2030 年 4 种情景土地利用数据为基础, 利用 InVEST 模型进行生境质量模拟评价(图 11)。从生境质量平均值来看, 2030 年自然发展情景为 0.739 9, 优先发展生产和生活空间情景为 0.738 2, 优先发展生态空间情景为 0.740 1, 三生空间均衡协调发展情景为 0.738 5。对比 2020 年生境质量结果可知, 4 种情景下, 长株潭三市主城区生境质量

值下降明显, 与地区发展、人为干扰程度大有关。优先发展生产和生活空间情景下, 低生境质量面积变化显著。生境质量变化不大, 呈下降趋势, 优先发展生态空间情景下生境质量值降幅最小, 降低 0.040 5, 降幅为 5.44%。

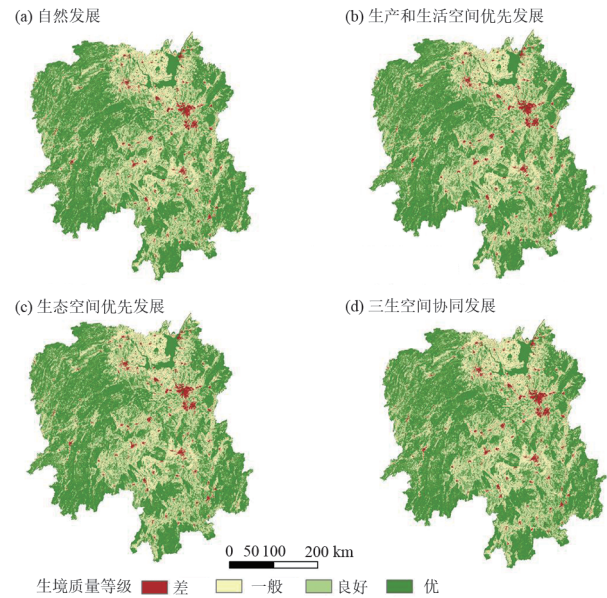


图 11 生境质量分布
Fig. 11 Spatial distribution of habitat quality

分别计算 4 种情景下生境质量各等级面积及占比。由表 9 可知, 自然发展情景下, 2030 年差等级生境质量面积增加 1 028.79 km², 一般等级生境质量面积减少 308.52 km², 良好生境质量面积增加 103.23 km², 优生境质量面积减少 819.09 km², 主要集中在长沙市、湘潭市、株洲市、衡阳市、常德市等。良好生境质量面积变化不显著, 总体来看, 湖南省生境质量呈下降趋势。

表 9 不同情景下生境质量等级面积及占比

等级	自然发展		优先发展生产和生活空间		优先发展生态空间		三生空间均衡协调发展	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差	6 011.64	3.27	6 521.76	3.55	6 173.28	3.36	6 469.65	3.52
一般	52 754.85	28.68	52 387.47	28.48	52 351.02	28.46	52 374.96	28.48
良好	28 989.99	15.76	29 006.01	15.77	28 982.25	15.76	29 006.64	15.77
优	96 169.05	52.29	96 010.29	52.20	96 418.98	52.42	96 074.28	52.24

优先发展生产和生活空间情景下, 2030 年差等级生境质量面积增加 1 538.91 km², 一般等级生境质量面积减少 675.9 km², 良好生境质量增加 119.25 km², 优生境质量减少 977.85 km²。相比其他 3 种发展情景, 优等级生境质量面积减少最多, 生境质量最低。

优先发展生态空间情景下, 差等级生境质量和良好等级生境质量面积分别增加 1 190.43、95.49 km², 一般等级生境质量和优生境质量面积分别减少 712.35、

569.16 km²。相比优先发展生产和生活空间情景, 差等级面积增加不显著, 优等级面积减少最小, 生境质量略有提升。

三生空间均衡协调发展情景下, 差等级生境质量面积增加 1 486.8 km², 一般等级生境质量面积减少 688.41 km², 良好生境质量增加 119.88 km², 优生境质量减少 913.86 km², 减少主要集中在长沙市、湘潭市、株洲市及其他生活空间。相比优先发展生态空

间情景,生境质量略有下降,与优先发展生产和生活空间情景和自然发展情景相比,生境质量略有提升。

综上所述,与2020年相比,4种发展情景下总体以优等级为主,占比均高于52%,其次是一般和良好等级,差等级占比最低。优先发展生产、生活空间和三生空间均衡协调发展情景下,差等级面积明显增加;自然发展和优先发展生态空间发展情景下,差等级面积增幅较小。优先发展生态情景下,生境质量变化最小,整体生境质量最好,有效限制生活空间的扩张使生态空间得以保留,生态环境得到改善;在优先发展生产、生活空间和三生空间均衡协调发展的情景下,由于考虑建设用地的扩张,对生态空间进行压缩,人为干扰大,生态系统脆弱,生境值降低的区域集中;三生空间均衡协调发展情景下的差等级和优等级面积变化相对较小,利于地区可持续发展。

4 讨论

湖南省作为长江经济带重要节点省份,其土地利用空间分布和生态安全与优化布局土地功能、高效治理生态环境和促进社会进步息息相关,对地区生态文明建设和高质量发展有重要意义。本文使用多目标规划模型考虑社会经济和生态效益,寻找不同情景下土地利用空间数量的最优解,并对2030年不同情景进行空间模拟及评估生境质量,探索兼顾社会经济发展和生态格局安全的土地利用布局 and 空间优化模式,为地区发展未来空间配置和决策制定提供更具有现实意义和可操作性的参考。

研究结果显示,湖南省以生态和生产空间转换为主,生活空间变化幅度大,与雷文韬等^[31]的研究结果一致;生境质量低值显著集中在长株潭三市主城区,与邱天琦等^[29]、梅予健等^[32]的研究结果相似。在4种情景中,三生空间均衡协调发展情景实现社会—经济—生态相对平衡,该情景下生活空间扩张既能满足区域经济发展需求,又有效抑制对生态空间的侵占,生境质量平均值高于优先发展生产和生活空间情景,生产、生态、生活空间得到均衡有序发展。

从模拟结果来看,湖南省生境质量平均值略有降低,建议:1)在今后的发展中应该重视生态安全格局,统筹协调开发和保护,通过建设生态廊道、保护长株潭生态绿心、完善生态补偿等措施优化生境质量,实现区域可持续高质量发展。2)生活空间内部功能提升是未来湖南省发展的必然趋势,人口增长和经济发展引起需求增加,盲目扩张建设用地不可取,有序聚集资源要素、升级生活空间内部功能和合理增加土地利用强度等措施有利于平衡区域经济社会和生态安全,符合新时期国土空间多目标治理要

求。3)省内现有三生空间分区明显,国土空间规划应针对不同区域提出不同响应和定位,加强空间功能连通性,对武陵山-雪峰、南岭、罗霄-幕阜山等充分利用自然资源,发展绿色经济,开发绿色旅游等改善生态空间单一格局;对以长株潭为典型的生活空间可通过控制建设用地扩张、提高植被覆盖和产业转型来改善生态环境;对生产空间应遵守耕地红线,严防耕地被占行为,保持和提升生态环境质量。

本文从省域尺度出发,考虑生态效益和经济效益以探求未来三生空间发展最优解,利于有关部门科学地掌握研究区三生空间现状和不同情景下国土利用情况及生境质量,一定程度上为湖南省自下而上管理和规划提供借鉴。但是,由于各市区三生空间存在比例差异,如西部生态空间占比较高,北部洞庭湖附近生产空间占比较高,长株潭三市的生活空间占比高,各市区发展目标和资源条件不同,省级尺度的模拟不适用于市区,因此,细化到市域、县域尺度是未来研究的重要方向,各市区可针对不同发展情景三生空间占比制定不同的发展方案和管控政策。最后,从情景构建的约束条件和模型来看,在参数设定上存在主观性,与实际发展情况可能存在差异,因此,更加全面考虑模型指标体系,提升精度,以期进行准确分析和优化布局配置是未来研究重点。

5 结论

1)湖南省的土地利用格局以生态空间为主,生产空间次之,生活空间占比最小。1990—2020年共转换53 309.07 km²土地,整体以生态空间减少、生态空间和生活空间增加为特点,其中,生态空间面积变化最小,生产空间面积变化最大。生产空间和生态空间之间转换面积最多,是土地利用转移的主导类型,生活空间和生产空间之间转换面积次之,生活空间扩张面积小但整体增长幅度大。

2)模拟得到的4种发展情景均表现为生产和生态空间下降,生活空间明显上升的趋势。生活空间均表现为在长株潭地区显著聚集,以长株潭都市圈为增长极向外辐射,沿着湘江和洞庭湖流域发展,呈多点分布格局。生产和生活空间优先发展情景下生活空间增长最快,生态空间优先发展情景下生态空间面积降幅最小。

3)4种发展情景下,优先发展生态空间情景和自然发展情景下,建设用地增幅较小,对生产和生活空间的侵占程度也较小,但不利于地区发展;优先发展生产和生活空间情景中,建设用地爆发式增长,对周围的生产空间和生态空间产生威胁,造成空间发展不平衡;三生空间均衡协调发展情景下,生活空间增

加的同时,抑制对生态空间的破坏,使得生产、生态、生活空间均衡有序发展。

4) 4种发展情景下,自然发展情景下经济效益最低;经济效益在生产和生活空间优先发展情景下增长最快,但是此情景下生态效益最低;生态效益在生态空间优先发展情景和自然发展情景下虽然较高,但是经济效益较低;三生空间均衡协调发展情景满足既保护生态空间又促进区域发展的需求,有利于三生空间的优化,是兼顾生态效益和经济效益的最优解。

5) 生境质量分析表明,湖南省生境质量在1990—2020年总体波动不大,小幅下降,优生境质量占比最大,良好等级增幅最大,预测2020—2030年湖南省生境质量仍呈下降态势。从模拟的2030年生境质量空间格局看,西部整体生境质量值明显高于东部。生境质量平均值在优先发展生产和生活空间情景下最小,为0.738 2,在优先发展生态空间情景下最高,总体生境质量较好,呈下降趋势。与2020年相比,4种发展情景下优等级占比均高于52%,差等级占比最小。

参考文献:

- [1] 刘超,张祚,纪旭,等.基于土地功能强弱对比的三生空间识别与优化:以襄阳市为例[J].资源科学,2023,45(7):1366-1379.
LIU C, ZHANG Z, JI X, et al. Identification and optimization of production-living-ecological spaces based on the comparison of strengths and weaknesses of land functions: A case study of Xiangyang City[J]. Resources Science, 2023, 45(7): 1366-1379.
- [2] 蔡乐山,唐相龙.生态过渡带三生空间多情景模拟与碳储量评估:以甘肃省为例[J].环境科学,2025,46(6):3806-3817.
CAI L S, TANG X L. Multi-scenario simulation of production-living-ecological space and carbon storage assessment in ecological transition zone: A case study of Gansu Province[J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3806-3817.
- [3] 张令达,侯全华,段亚琼.生态文明背景下三生空间研究:内涵、进展与对策[J].生态学报,2024,44(1):47-59.
ZHANG L D, HOU Q H, DUAN Y Q. A literature review on production-living-ecological spaces in the context of ecological civilization: Connotation, problems and countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 47-59.
- [4] 李良鑫,魏兴萍,喻元秀,等.山地城市城镇群“三生空间”格局演变及其驱动力:以重庆市为例[J].生态学报,2025,44(7):2350-2364.
LI L X, WEI X P, YU Y X, et al. Pattern evolution and driving force of "production-living-ecological space" in mountainous urban clusters: Taking Chongqing as an example[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(7): 2350-2364.
- [5] 杨蕊,邓文彬.“三生空间”视角下乌鲁木齐市土地利用转型及生态环境效应分析[J].科学技术与工程,2024,24(14):5742-5752.
YANG R, DENG W B. Land use function transformation in the Urumqi based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(14): 5742-5752.
- [6] 陈振,郭杰,张雪微,等.耦合景观生态安全格局的南京市“三生”空间多情景模拟[J].水土保持研究,2024,31(4):383-394.
CHEN Z, GUO J, ZHANG X W, et al. Multi-scenario simulation of production-life-ecology space in Nanjing coupled with landscape ecological security pattern[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 383-394.
- [7] 刘荣增,陈浩然.基于ANN-CA的杭州城市空间拓展与增长边界研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(6):1298-1307.
LIU R Z, CHEN H R. Simulation of urban spatial expansion and growth boundary in Hangzhou based on ANN-CA model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(6): 1298-1307.
- [8] 王奕淇,李国平.基于SD模型的黄河流域生态环境与社会经济发展可持续性模拟[J].干旱区地理,2022,45(3):901-911.
WANG Y Q, LI G P. Sustainable simulation of ecological environment and socio-economic development in the Yellow River basin based on the SD model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 901-911.
- [9] 樊文杰,戴晓爱,谢一茹,等.利用CLUE-S模型对四川省未来10年土地利用变化的预测与分析[J].科学技术与工程,2022,22(7):2641-2647.
FAN W J, DAI X A, XIE Y R, et al. Prediction and analysis of land use change in Sichuan Province in the next 10 years based on CLUE-S model[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2641-2647.
- [10] 袁雪松,周俊,胡蓓蓓,等.基于FLUS模型粤港澳大湾区“三生空间”多情景模拟预测[J].地理科学,2023,43(3):564-574.
YUAN X S, ZHOU J, HU B B, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological-productive-living spaces in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on FLUS model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(3): 564-574.
- [11] 刘佳楠,姬广兴,高红凯,等.基于PLUS模型的河南省“三生空间”多情景模拟及生态环境效应分析[J].环境科学,2025,46(2):990-1001.
LIU J N, JI G X, GAO H K, et al. Multi-scenario simulation and eco-environmental effect analysis of production-living ecological space in Henan Province based on PLUS model[J]. Environmental Science, 2025, 46(2): 990-1001.

- [12] 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.
- [13] 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, DUAN 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.
- [14] 朱梅涛,邢莉圆,牛学瑶,等.县域尺度下首都经济圈生境质量时空变化与影响因素分析[J].现代地质,2025,39(2):396-409.
- ZHU M T, XING L Y, NIU X Y, et al. County-scale spatiotemporal dynamics and drivers of habitat quality in the capital economic zone[J]. Geoscience, 2025, 39(2): 396-409.
- [15] 张晓瑞,郭龙坤,王振波.基于 InVEST-PLUS 耦合模型的合肥市生境质量评价及模拟预测[J].环境科学,2025,46(6):3772-3783.
- ZHANG X R, GUO L K, WANG Z B. Habitat quality evaluation and simulation prediction in Hefei city based on InVEST-PLUS coupled modeling[J]. Environmental Science, 2025, 46(6):3772-3783.
- [16] 陈宁,辛存林,唐道斌,等.中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估[J].环境科学,2023,44(8):4655-4665.
- CHEN N, XIN C L, TANG D B, et al. Multi-scenario land use optimization and carbon storage assessment in northwest China[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4655-4665.
- [17] 黄森,文宁,李亚涛,等.碳中和目标下湖南省“三生”空间碳排放系数测度与战略模拟[J].水土保持通报,2024,44(5):382-391.
- HUANG M, WEN N, LI Y T, et al. Production-living-ecological space carbon emissions analysis and strategic simulation in Hunan Province under target of carbon neutrality[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5):382-391.
- [18] 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 Z, LI S H, YI B J, 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.
- [19] 邓晓辉,王琳,欧彩虹,等.基于 PLUS 模型的长株潭都市圈景观生态风险动态分析[J].地理与地理信息科学,2024,40(1):47-54.
- DENG X H, WANG L, OU C H, et al. Dynamic analysis of landscape ecological risk in Changsha, Zhuzhou and Xiangtan metropolitan area based on PLUS model[J]. Geography and Geo-Information Science, 2024, 40(1):47-54.
- [20] 赵铭,周振宏,智菲,等.城市扩张对安徽省马鞍山市生境质量的影响[J].水土保持通报,2024,44(6):288-297.
- ZHAO M, ZHOU Z H, ZHI F, et al. Influence of urban expansion on habitat quality in Ma'an shan City of Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6):288-297.
- [21] 朱从谋,苑韶峰,杨丽霞.耦合 MOP 与 FLUS 模型的杭州市土地利用格局优化及权衡分析[J].农业工程学报,2023,39(16):235-244.
- ZHU C M, YUAN S F, YANG L X. Spatial optimization of land use pattern and trade-off analysis in Hangzhou City by coupling MOP and FLUS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(16):235-244.
- [22] ZHANG Y L, HU X J, WEI B J, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service value, landscape ecological risk, and their interactive relationship in Hunan Province, Central-South China, over the past 30 years[J]. Ecological Indicators, 2023, 156: e111066.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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, JIN 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.

- [27] 魏家星,张昱镇,连紫璇,等.基于生态供需空间的区域生态安全格局构建研究:以苏南城市群为例[J].长江流域资源与环境,2022,31(2):387-397.
WEI J X, ZHANG Y Z, LIAN Z X, et al. Research on regional ecological security pattern construction based on ecological supply and demand space: A case study of southern Jiangsu urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 387-397.
- [28] 景永才,陈利顶,孙然好.基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J].生态学报,2018,38(12):4121-4131.
JING Y C, CHEN L D, SUN R H. A theoretical research framework for ecological security pattern construction based on ecosystem services supply and demand [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4121-4131.
- [29] 占湉,于洋,吴秀芹.湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J].生态学报,2021,41(18):7260-7272.
ZHAN T, YU Y, WU X Q. Supply-demand spatial matching of ecosystem services in the Huangshui River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7260-7272.
- [30] 赵宇豪,罗宇航,易腾云,等.基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建[J].应用生态学报,2022,33(9):2475-2484.
ZHAO Y H, LUO Y H, YI T Y, et al. Constructing an ecological security pattern in Shenzhen, China, by matching the supply and demand of ecosystem services [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2475-2484.
- [31] 胡其玉,陈松林.基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化[J].自然资源学报,2021,36(2):342-355.
HU Q Y, CHEN S L. Optimizing the ecological networks based on the supply and demand of ecosystem services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou region [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 342-355.
- [32] 王正伟,王宏卫,杨胜天,等.基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略:以拜城县为例[J].生态学报,2022,42(1):91-104.
WANG Z W, WANG H W, YANG S T, et al. Identification and optimization strategy of ecological security pattern of Oasis in Xinjiang based on ecosystem service function: Taking Baicheng County as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 91-104.
- (上接第 321 页)
- [26] 贾纪昂,郭伟玲,徐刘洋,等.耦合 PLUS-InVEST-Geo-Detector 模型的安徽省碳储量时空演变及驱动力分析[J].环境科学,2025,46(3):1703-1715.
JIA J A, GUO W L, XU L Y, et al. Spatio-temporal evolution and driving force analysis of carbon storage in Anhui Province coupled with PLUS-InVEST-GeoDetector model [J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1703-1715.
- [27] 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.
- [28] LI Q, BAO Y, WANG Z T, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in karst multi-mountainous cities [J]. Ecological Indicators, 2024, 159: e111637.
- [29] 邱天琦,王向荣.基于 InVEST 模型的长株潭城市群生境质量时空演变分析研究[J].林业资源管理,2022(5): 99-106.
QIU T Q, WANG X R. Research on the temporal and spatial evolution of habitat quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on InVEST model [J]. Forest Resources Management, 2022(5): 99-106.
- [30] 李永进,汤玉喜,黎蕾,等.基于土地利用变化的湖南长江岸线生境质量评价[J].三峡生态环境监测,2024, 9(2):57-66.
LI Y J, TANG Y X, LI L, et al. Evaluation of habitat quality based on land-use changes in Yangtze River shoreline in Hunan Province [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2024, 9(2): 57-66.
- [31] 雷文韬,古杰,谢宏坤.基于“三生”空间的湖南省土地利用格局及多功能演变[J].农业工程学报,2024, 40(17):283-293.
LEI W T, GU J, XIE H K. Land use pattern and multifunctional evolution in Hunan Province using "production-living-ecosystem" space [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(17): 283-293.
- [32] 梅予健,贺清云,欧阳晓,等.长株潭城市群城镇化水平与生态质量的冲突与交互作用[J].生态学报,2023, 43(11):4527-4538.
MEI Y J, HE Q Y, OUYANG X, et al. Conflict and interaction between urbanization level and ecological quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4527-4538.