

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.019.

蓝贵文, 张凡, 吴静, 等. 漓江流域“三生”功能时空分异特征及动态模拟[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 431-442.

Lan Guiwen, Zhang Fan, Wu Jing, et al. Spatiotemporal Differentiation and Dynamic Simulation of Production-Living-Ecology Function in Lijiang River Watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 431-442.

# 漓江流域“三生”功能时空分异特征及动态模拟

蓝贵文<sup>1</sup>, 张凡<sup>1</sup>, 吴静<sup>2</sup>, 江凡<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006; 2. 广西壮族自治区自然资源生态修复中心, 南宁 530022)

**摘要:** [目的] 揭示漓江流域“三生”功能时空分布动态变化特征, 模拟预测自然发展、生态保护情景下漓江流域“三生”功能指数变化趋势, 为喀斯特地区流域可持续发展提供决策参考。[方法] 基于 2010 年、2015 年及 2020 年漓江流域土地利用数据, 采用重心模型及 PLUS 模型等方法, 开展了“三生”功能重心迁移、“三生”功能指数时空变化及模拟研究。[结果] (1) 2010—2020 年, 生产、生活功能指数整体分别提升 0.77%, 23.85%, 高值区分别集中在低海拔地区和桂林市; 生态功能指数整体下降 1.39%, 高值区沿高海拔地区分布。(2) 2010—2020 年, “三生”功能变化幅度的大小为生产功能 < 生活功能 < 生态功能。其中, 后阶段生产、生活功能增强区面积分别较前阶段上升了 4.0%, 11.6%, 功能减弱区面积分别下降了 3.2%, 9.4%, 生态功能增强区和减弱区面积则分别较前阶段下降 16.4% 和增加 17.3%。(3) 10 年间, 生产功能和生态功能重心整体上向西北方向移动, 生活功能重心整体上向东南方向移动。(4) 自然发展情景下, 2030 年生产、生活功能均值比 2020 年分别提升 0.278, 0.4, 生态功能均值下降 0.138; 生态保护情景下, 2030 年生产、生活、生态功能均值比 2020 年分别提升 0.421, 0.211, 0.06。[结论] 生产、生活功能整体上有所增强, 生态功能则有所减弱, 但生态功能的整体变化幅度最大。生态保护情景模拟结果更符合《桂林市国土空间总体规划(2021—2035)》发展目标。

**关键词:** “三生”功能; 情景模拟; PLUS 模型; 漓江流域

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0431-12

## Spatiotemporal Differentiation and Dynamic Simulation of Production-Living-Ecology Function in Lijiang River Watershed

Lan Guiwen<sup>1</sup>, Zhang Fan<sup>1</sup>, Wu Jing<sup>2</sup>, Jiang Fan<sup>2</sup>

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China;

2. Natural Resources Ecological Restoration Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to analyze the dynamic variation characteristics of the spatiotemporal distribution of the production-living-ecology function in the Lijiang River watershed, to predict its future change trend in the natural development scenario and the ecological protection scenario, respectively, and to provide a decision-making support for the sustainable development of the karst watershed. [Methods] With the land use data of Lijiang River Watershed of 2010, 2015 and 2020, the gravity center model was used to analyze the movement of the gravity centers of the production-living-ecology function, and the Patch-Generating Land Use Simulation Model (PLUS) model was used to analyze and simulate spatial-temporal variation characteristics of the production-living-ecology function in the Lijiang River watershed. [Results] (1) From 2010 to 2020, the index of production function (PF) and living function (LF) increased by 0.77% and 23.85%, respectively, and the areas with high-value of PF and LF concentrated in the lower elevations of the study area and Guilin urban area, respectively. The ecology function (EF) index decreased by 1.39% over the same time period, and the area of high-value of EF

收稿日期: 2023-04-04

修回日期: 2023-05-05

资助项目: 国家自然科学基金(41861050); 广西空间信息与测绘重点实验室资助课题项目(1404524-06, 16-380-25-09)

第一作者: 蓝贵文(1977—), 男(瑶族), 广西河池人, 博士, 教授, 主要从事土地利用与区域发展研究。E-mail: 23955461@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

distributed along high elevations. (2) The areas of enhanced PF and LF in the latter stage increased by 4.0% and 11.6% from the previous period, respectively, while the areas of weakened function decreased by 3.2% and 9.4% from the previous period, respectively. The areas of enhanced and weakened EF decreased by 16.4% and increased by 17.3% from the previous period, respectively. (3) In the past ten years, the centers of gravity of PF and LF moved to the northwest as a whole, while the center of gravity of EF moved to the southeast as a whole. (4) Compared with 2020, in the natural development scenario, the mean values of PF and LF in 2030 increased by 0.278 and 0.4, respectively, while the mean value of EF decreased by 0.138. In the ecological protection scenario, the mean values of PF, LF and EF in 2030 increased by 0.421, 0.211 and 0.06, respectively. [Conclusion] The PF and LF in the Lijiang River watershed had been enhanced overall, while the EF had been weakened, but the overall amplitude of change of EF was the largest among the three functions. The simulation results of ecological protection scenarios are more in line with the development goals of the Overall Territorial Space Plan of Guilin City (2021—2035).

**Keywords:** production-living-ecology function; scenario simulation; PLUS model; Lijiang River watershed

国土空间是人类生产生活和社会经济活动及生态文明建设的重要空间载体<sup>[1]</sup>,是“三生”功能间交互作用的复杂系统和场所<sup>[2]</sup>。“三生”功能指生产功能、生活功能和生态功能,是国土空间的三大主导功能<sup>[3]</sup>。其中,生产功能是指人类以土地为对象直接获取各种物质或以其为载体产出产品和服务的功能,是推动生活、生态功能变化的根本动力;生活功能是在人类发展过程中提供基本生活保障的能力,促进生产、生态功能的提升和改善;生态功能指满足区域人类基本生态需求的能力,是生产、生活功能发展的保障<sup>[4]</sup>,三者共同构成一个整体性系统<sup>[3]</sup>。随着工业化、城镇化的快速推进,我国在经济迅速发展的同时,人地矛盾、城乡发展失衡、环境污染等问题也不断涌现,使得国土空间格局发生剧烈演变,进而也对“三生”功能这一整体性系统带来了前所未有的冲击。面对这一严峻形势,党中央自十八大以来,不断优化国土空间开发格局,为新时期区域协同发展指明了方向,而探究“三生”功能的演化特征是实现区域协同发展的基础<sup>[4]</sup>。因此,识别“三生”功能的时空格局特征对于优化国土空间格局、促进地区可持续发展具有重要意义。

现有“三生”功能的研究在时空演变特征及影响因素、耦合协调性时空变化、分区优化路径等方面成果颇丰。如逯承鹏等<sup>[5]</sup>以黄河流域甘肃段57个县域为研究区,采用加权平均法分析了研究区“三生”功能时空变化特征,并借助地理探测器揭示了其时空变化的影响因素。程宪波<sup>[6]</sup>和纪璇<sup>[7]</sup>等借助耦合协调模型,分别分析了江苏省和安徽省各县区“三生”功能间耦合协调度的时空分布特征及演变规律;徐磊等<sup>[8]</sup>在运用综合评价法及标准差椭圆模型对环京津地区“三生”功能时空演变特征进行分析的基础上,通过结合共生模型和共生系数,将研究区划分为4个一类功

能区和11个二类功能区,并提出了相应的优化策略;金贵等<sup>[9]</sup>以农业生产、城镇利用及生态转换的效率为核心,构建了相应的国土空间开发保护情景方案及指标体系,利用体现决策偏好差异模型来评价不同情景方案下的国土空间的发展潜力,并定量刻画了不同情景国土空间布局蓝图,随后构建了一种权衡多方利弊的国土空间优化策略,为现阶段国土空间规划和高质量发展提供了重要的决策参考意义。

总的来看,当前“三生”功能研究包含国家、城市群、流域等不同范围,其中,流域关注点多以长江流域<sup>[10]</sup>、黄河流域等<sup>[11]</sup>部分沿线经济发达地区为主,而对于经济相对欠发达且生态敏感性高的喀斯特流域地区的关注则相对较少;从研究所采用的尺度上来看,大多数学者基于宏观尺度,以行政区<sup>[2-5,10-11]</sup>为评价单元,从生产、生活及生态3个方面选取指标构建评价体系来对“三生”功能开展定量评价。与宏观尺度研究相比,基于微观尺度的“三生”功能研究则相对较少,相关研究主要基于地理格网评价单元,以土地利用类型、地形区位等为基础,并借助加权指数法<sup>[12]</sup>来揭示“三生”功能时空变化规律。此外,当前“三生”功能研究的时间范围主要集中在单一年份<sup>[13]</sup>或是某一特定时段<sup>[14]</sup>,较少对“三生”功能未来发展趋势展开模拟预测,且现有的CLEU-S(conversion of land use and its effects at small region extent model)、FLUS(future land use simulation)等基于模式分析策略(pattern analysis strategy, PAS)的土地利用变化模拟预测模型缺乏能够揭示某一时段内土地利用变化驱动因素的能力<sup>[15]</sup>,而斑块生成土地利用变化模拟模型(patch-generating land use simulation, PLUS)模型能够克服这一不足,其包含一个新的数据挖掘框架及多类斑块生成策略的元胞自动机(cellular automata, CA)模型,

能够更精确地模拟不同年份、环境下的土地利用斑块级变化,并挖掘驱动因素<sup>[16]</sup>。

漓江流域作为典型的喀斯特流域,一方面,由于喀斯特地貌土壤贫瘠、植被稀疏及水土流失等本底自然因素带来的影响,经济社会的发展受到制约;另一方面,工业化、城镇化的推进在扩大生产空间的同时,也使得生活、生态空间在一定程度上受到胁迫,进而导致国土空间格局发生剧烈变化。因此,分析喀斯特流域地区“三生”功能的变化特征及未来发展趋势,对优化当地国土空间格局具有重要意义。本文针对现有研究存在的不足之处,从格网尺度入手,通过重心模型等方法分析 2010—2020 年漓江流域“三生”功能的时空演变特征,并利用 PLUS 模型模拟自然发展、生态保护两种不同情景下的 2030 年“三生”功能发展趋势,以期为漓江流域高质量发展提供科学参考。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

漓江流域位于广西壮族自治区东北部的桂林市境内,地理位置为 110°07′39″—110°42′57″E,24°38′10″—25°53′59″N,涉及桂林市“六区六县一市”,境内北、东、西三面地势较高,中部和南部相对平坦,气候条件优越,且拥有丰富的动植物及矿产资源,属于典型的喀斯特岩溶区。漓江流域是“两屏三带”中“南方山地丘陵带”的重要组成部分,是珠江水系重要的水源涵养地。根据《广西统计年鉴》的统计数据,2020

年流域常住人口约为 388.31 万人,完成地区生产总值 1 770.01 亿元,分别占桂林市的 79%,83%。随着工农业生产、矿产资源开发等活动规模的扩大及流动人口数量的增加,流域水源涵养能力下降、自然栖息地缩减等问题不断涌现。这些问题不仅使中下游水土流失和石漠化现象加剧,而且对区域经济发展造成了很大影响。

1.2 数据来源与处理

在分析“三生”功能时空演变特征时所用的 2010 年、2015 年及 2020 年 30 m 分辨率土地利用数据均来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)。在进行土地利用模拟预测时所用数据除土地利用数据外,还包括社会经济、气候环境及约束数据(限制发展区域)3 方面的 11 项数据,各数据的来源情况见表 1。其中,限制发展区域是严格禁止生态用地转换为非生态用地的区域,通常包括永久基本农田、生态保护红线、水域等,本文顾及限制发展区数据的可获取性并借鉴相关文献<sup>[17-18]</sup>的设置方案,充分考虑《桂林漓江流域生态环境保护总体规划(2022—2035)》和《桂林漓江流域山水林田湖草沙一体化保护修复工程实施方案》对于流域水域的发展限制和保护,最终将水域设置为本文的限制发展区域。

此外,为了保证流域尺度下研究区的范围大小及评价的准确性,经多次实践,本文最终采用 3 km×3 km 的单元网格,共得到 2 095 个评价单元,并将所有数据设置为相同分辨率。

表 1 数据信息  
Table 1 Data information

数据类型	名称	来源
社会经济	人口密度	Land Scan 数据库( <a href="https://landscan.ornl.gov/">https://landscan.ornl.gov/</a> )
	GDP	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
	与一级道路距离	OpenStreetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a> ),ArcMap 欧氏距离
	与二级道路距离	OpenStreetMap( <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a> ),ArcMap 欧式距离
	夜间灯光数据	NOAA/NGDC 网站( <a href="https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html">https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html</a> )
气候环境	DEM	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
	年平均气温	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
	年降水量	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
	NDVI	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )
	坡度	由 DEM 提取
约束数据	水域	由土地利用数据提取

2 研究方法

本文的主要研究思路是,首先基于 ArcGIS 平台创建 3 km×3 km 渔网,通过地类功能赋值法构建基于格网尺度的漓江流域“三生”功能评价模型,揭示漓

江流域 2010—2020 年“三生”功能时空分布格局和动态变化情况;随后,借助重心模型对“三生”功能重心的分布和迁移情况开展分析;最后,运用 PLUS 模型模拟得到 2030 年自然发展、生态保护两种不同情景下的土地利用空间分布,并再次借助文章构建的“三

生”功能评价模型得到 2030 年自然发展、生态保护两种不同情景下“三生”功能分布情况。

## 2.1 漓江流域“三生”功能指数计算方法

土地是一个集生产、生活、生态功能为一体的多功能综合系统,不同的地类往往不只具备某一特定的功能,但由于不同的利用目标和强度,使得地类的功能表现出一定的主导性。因此,有学者根据土地利用功能的强弱、差异等因素,采用赋值的方式来表达不同地类的“三生”功能。本研究借鉴冯晓娟<sup>[19]</sup>和金星<sup>[20]</sup>等构建的土地利用“三生”功能评分标准和漓江

流域不同地类的特点,将 3 种功能分为完整、半、弱和无功能 4 种状态,分别对应 5,3,1,0 分,并依据各二级地类的“三生”功能状态得分及面积得到每一个采样网格的“三生”功能指数  $PLE_i$ :

$$PLE_i = \sum_{j=1}^n A_j \times W_j \quad (1)$$

式中: $PLE_i$ 为网格  $i$  的生产/生活/生态功能指数  $P_i/L_i/E_i$ ;  $n$  为每个网格中的二级地类数量; $A_j$ 为网格中第  $j$  种二级地类的面积( $\text{km}^2$ ); $W_j$ 为第  $j$  种二级地类的生产/生活/生态功能的状态得分值,最终的地类功能赋分结果见表 2。

表 2 研究区土地利用分类体系及功能赋分

Table 2 Classification system and function assignment of land use in the study area

分类体系	分值			分类体系	分值		
	生产功能	生活功能	生态功能		生产功能	生活功能	生态功能
11 水田	3	0	3	43 水库坑塘	1	0	1
12 旱地	3	0	3	45 滩涂	0	0	5
21 有林地	0	0	5	46 滩地	0	0	5
22 灌木林	0	0	5	51 城镇用地	5	5	0
23 疏林地	0	0	5	52 农村居民点	5	5	0
24 其他林地	0	0	5	53 其他建设用地	5	0	0
31 高覆盖度草地	0	0	5	64 沼泽地	0	0	5
32 中覆盖度草地	0	0	5	65 裸土地	0	0	5
33 低覆盖度草地	0	0	5	66 裸岩石质地	0	0	5
41 河渠	3	0	1				
42 湖泊	0	0	5				

## 2.2 重心模型

重心是物理学中的一个名词,表示物体各部分所受重力的合力点,关于重心的研究已在社会经济<sup>[21]</sup>、土地利用<sup>[22]</sup>等方面得到应用,是一个从时空尺度反映研究区土地利用、经济发展等要素集聚和变化状况的工具。本研究将重心迁移模型引入格网尺度“三生”功能的时空演变特征分析中,通过 2010 年、2015 年及 2020 年生产、生活、生态功能重心坐标的迁移情况来直观反映各“三生”子功能变化的方向和趋势。公式如下:

$$LON_t = \sum_{i=1}^n (PLE_i \times X_i) / \sum_{i=1}^n PLE_i \quad (2)$$

$$LAT_t = \sum_{i=1}^n (PLE_i \times Y_i) / \sum_{i=1}^n PLE_i \quad (3)$$

式中: $LON_t$ ,  $LAT_t$  分别为  $t$  年份研究区“三生”功能重心的经、纬度坐标; $PLE_i$ 为网格  $i$  的生产/生活/生态功能指数; $X_i$ ,  $Y_i$  分别为网格  $i$  的经、纬度坐标; $n$  为网格总数。

## 2.3 PLUS 模型

PLUS(patch-generating land use simulation)模型是一种模拟全局土地利用变化的模型,包括土地扩

展分析策略(LEAS)模块和多类型随机斑块种子的 CA 模型(CARS)模块。LEAS 模块通过提取两期土地利用数据中各用地的扩展部分,并采用随机森林算法得到各用地的发展概率;CARS 模块则结合随机种子生成和阈值递减机制,完成土地利用变化动态模拟。与其他模型相比,该模型能够在斑块尺度上模拟土地利用变化及探求地类变化的驱动因素<sup>[16]</sup>,且准确度更高。模拟步骤为:(1) 选择土地利用模拟所需的驱动力数据;(2) 提取两期土地利用数据中各用地的扩展部分,运用 LEAS 模块得到各类用地的发展概率;(3) 结合各用地目标像元数、过渡转移矩阵及邻域权重对未来土地利用情况进行模拟预测。

在模拟预测前,需要先对模拟精度进行评价,一般用 Kappa 系数及 FoM 值进行衡量。通常 Kappa 系数大于 0.75, FoM 值小于 0.1 时,则认为模拟精度较高<sup>[23]</sup>。在模拟精度达到要求的前提下,通过过渡转移矩阵的设置来得到不同情景下的土地利用变化结果。

《桂林市国土空间总体规划(2021—2035 年)》表明桂林市未来将突出“资源、景观、文化”融合特征,强化保护,绿色发展,以旅游名城、生态宜居、产业创新



及门户枢纽四大战略共同发力,打造世界级旅游都市,并加大对漓江流域的生态保护修复力度,落实好“三线一单”生态环境分区分管控,实现生态保护修复与社会经济间的协调发展。因此,生态保护仍是漓江流域未来关注的重点。本文参考已有研究<sup>[24-26]</sup>的情景设置经验,并顾及漓江流域规划政策,共设置自然发展、生态保护两种情景。其中,在自然发展情景中,各地类延续之前的结构变化趋势,不同地类间的转化概

率不变,该情景下的过渡转移矩阵设置方法参考前人经验<sup>[27]</sup>及研究区实际情况,根据 2010—2020 年土地利用转移矩阵中各地类转移面积的大小进行简化设置;在生态保护情景中,未来流域的发展将以生态环境保护为首要目的,城镇化发展得到限制,同时耕地将得到进一步保护,并且土地利用的发展对环境更加友好。该情景下减少林地、草地的转出,并加大未利用地、耕地向它们的转入。具体的设置结果见表 3。

表 3 过渡转移矩阵参数设置  
Table 3 Parameter setting of transition matrix

土地利用 类型	自然发展情景						生态保护情景					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0
林地	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
草地	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
水域	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
建设用地	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
未利用地	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1

注:表中 0 表示对应两种用地类型之间不能相互转化,1 表示可以相互转化。

3 结果与分析

3.1 “三生”功能时空演变特征

2010—2020 年,流域生产功能呈增加趋势,2010 年、2015 年及 2020 年生产功能均值分别为 10.901, 10.918,10.985,共上升了 0.77%。高值区分布在海拔较低的地区,主要位于桂林市区、灵川县、兴安县、荔浦市及平乐县(图 1)。此外,在研究时段的前 5 a (2010—2015 年),漓江流域生产功能增强和减弱区

域的面积分别占总面积的 42.3%,41.6%,空间上表现出较强的交织分布特征,其中,增长强度较大的地区主要分布在桂林市区及流域北部的灵川县、兴安县(图 2);在研究时段的后 5 a(2015—2020 年),研究区生产功能增强和减弱区域的面积占比依旧维持高位,分别为 46.3%,38.4%,与上一阶段相比,该阶段生产功能增强区域的面积增加了 4%,且增长强度较大的地区明显增多,呈向桂林市区和流域南部部分市县转移的趋势(图 3),生产功能减弱区域的面积则下降了 3.2%。

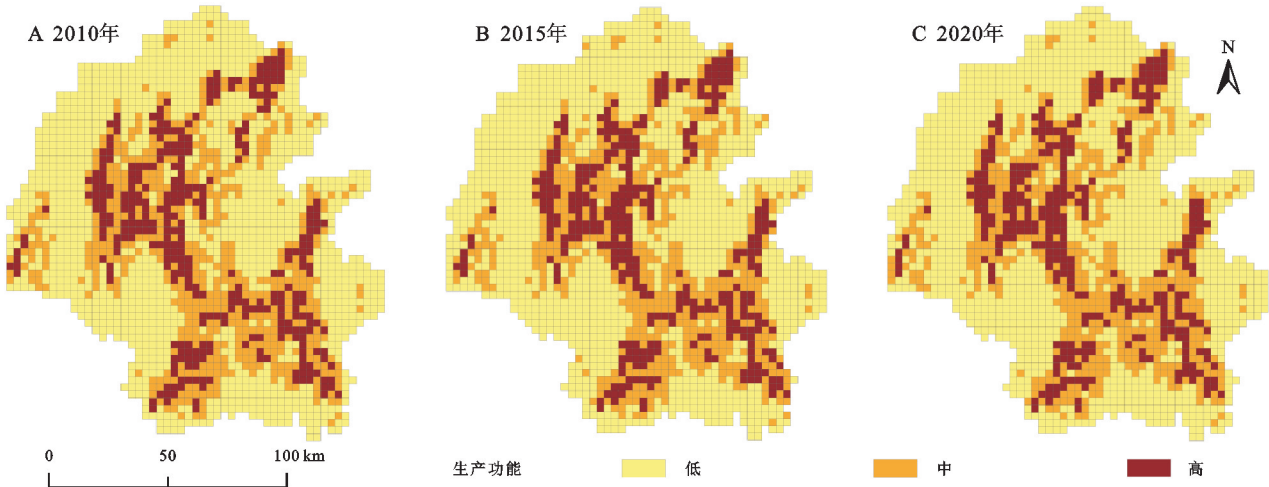


图 1 2010—2020 年漓江流域生产功能等级分布

Fig. 1 Distribution of production function levels in the Lijiang River watershed from 2010 to 2020

2010—2020 年,流域生活功能整体上也呈现增加的趋势,2010 年、2015 年及 2020 年生活功能均值分别为 0.889,0.938,1.101,共上升了 23.85%。生活功能中、高值区主要分布在流域海拔较低的桂林市

区、阳朔县、恭城县及荔浦市,其中高值区主要集中在桂林市区;低值区则主要分布在流域地势较高的地方(图 4)。此外,2010—2015 年,流域生活功能增强和减弱区域的面积与研究区总面积的比值分别为

20%,23.8%,空间上也集中分布在低海拔地区。与生产功能的情况相似,生活功能增长强度较大的地区也主要在桂林市区、灵川县和兴安县;2015—2020年,功能增强和减弱区域的面积比例分别为 31.6%,14.4%。与上一阶段相比,该阶段生活功能增强区域的面积增加了 11.6%,且增长强度较大的地区呈现向桂林市区及流域南部的荔浦、阳朔、平乐三县转移的特征,生活功能减弱区域的面积则下降了 9.4%。

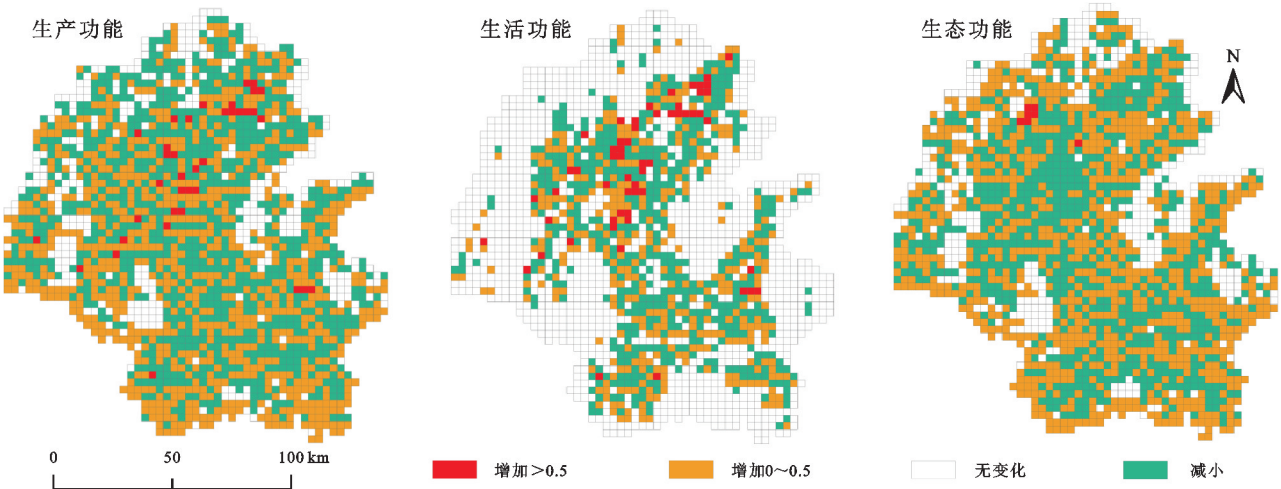


图 2 2010—2015 年“三生”功能变化

Fig. 2 Changing characteristics of production-living-ecology function in the Lijiang River watershed from 2010 to 2015

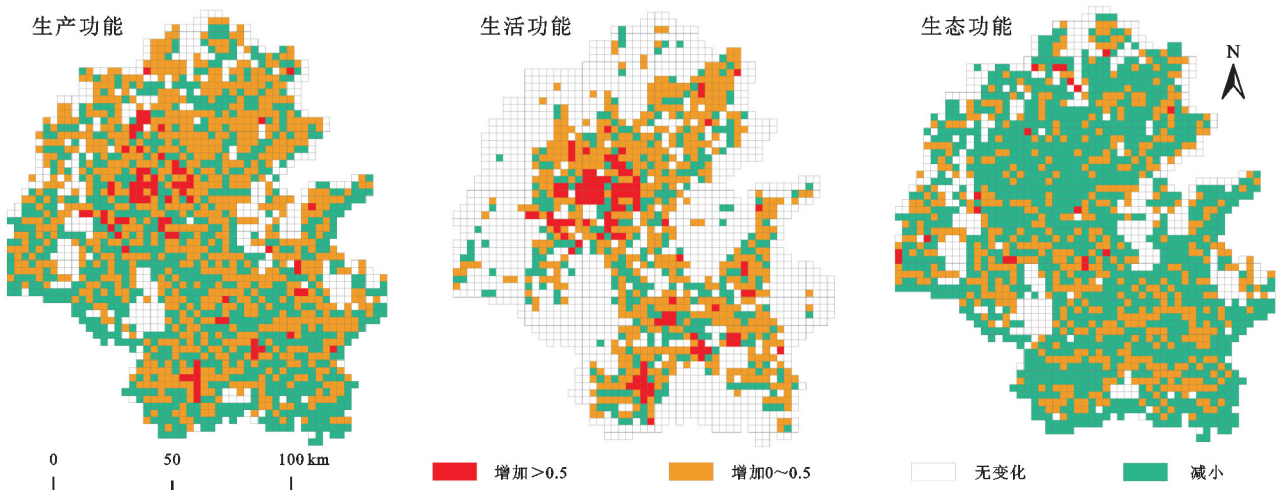


图 3 2015—2020 年“三生”功能变化

Fig. 3 Changing characteristics of production-living-ecology function in the Lijiang River watershed from 2015 to 2020

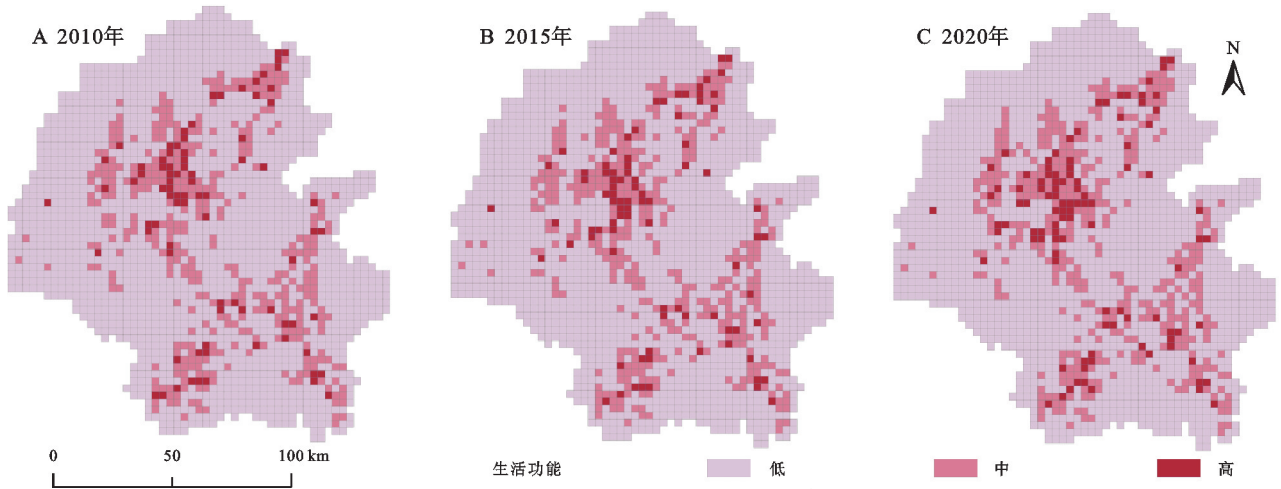


图 4 2010—2020 年漓江流域生活功能等级分布

Fig. 4 Distribution of living function levels in the Lijiang River watershed from 2010 to 2020

2010—2020 年,流域生态功能整体上呈现不断下降的趋势,2010 年、2015 年及 2020 年生态功能均值分别为 36.756,36.447,36.245,共下降了 1.39%。与生活功能的分布情况相反,漓江流域生态功能高值区在 10 a 间呈沿高海拔地区分布的特点,低值区则集中分布在桂林市区(图 5)。2010—2015 年,流域生态功能增强和减弱区域的面积与研究区总面积的比值分别为 44.2%,38%,空间上无明显分布规律。其中,生态功能增长强度较大的地区较少,零散分布在灵川县;相较于前一时段,2015—2020 年生态功能增

强和减弱区域的面积比例分别为 27.8%,55.3%,功能存在增强的地区明显下降,共减少了 16.4%,但增长强度较大的地区与上一阶段相比有较明显增加,零散分布于流域中部和北部的阳朔县、永福县、灵川县和兴安县,功能存在减弱的地区明显增加,共上升了 17.3%。主要是由于随着社会经济的发展,人口聚集、建设活动等人类活动一定程度上对生态空间造成影响,进而造成生态功能的整体下降。总的来看,2010—2020 年,“三生”功能变化幅度大小为生产功能<生活功能<生态功能。

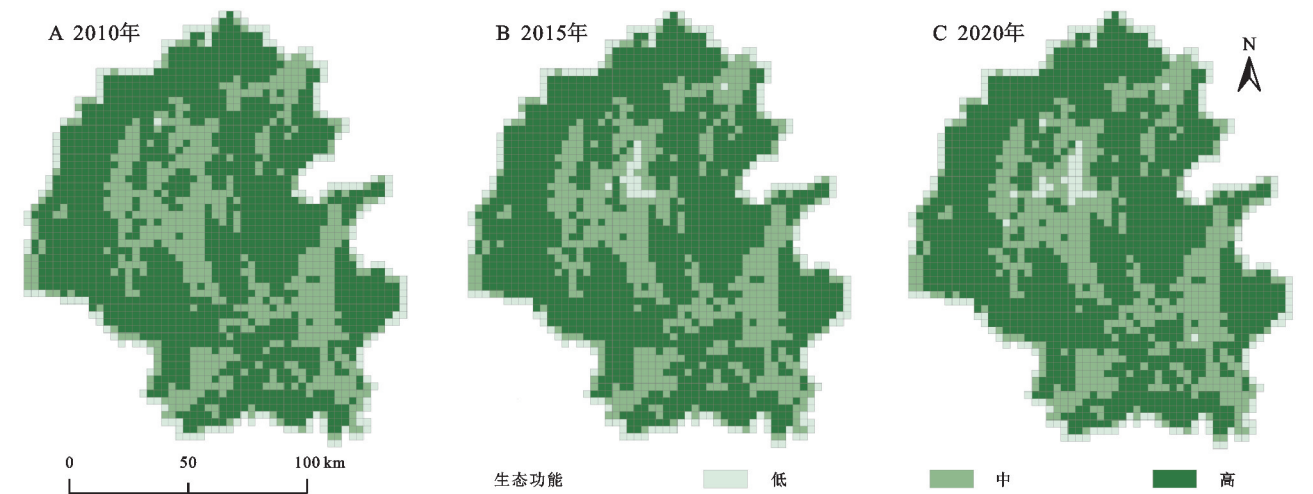


图 5 2010—2020 年漓江流域生态功能等级分布

Fig. 5 Distribution of ecology function levels in the Lijiang River watershed from 2010 to 2020

3.2 “三生”功能重心迁移特征

由图 6 可知,漓江流域“三生”功能重心在不同阶段的偏移程度有所不同,生活功能重心迁移距离最大,生产功能和生态功能重心的迁移不明显。生产功能重心 10 a 间均分布于雁山区的大埠乡,其中 2010—2015 年往东北方向移动,主要是因为该时期流域东北地区不断加大信息技术与传统农业的结合力度,增加了资源利用效率和生产效益,从而有效提升了当地的农业生产水平;2015—2020 年生产功能转向西北方向迁移,表明该时期流域西北地区在政策扶持下着力调整农业产业结构、提升农业品质品牌等方面成效显著,促进了农产品生产的优化,并有效提升了农业效率和竞争力,使得生产功能得到进一步提升。

2010—2015 年,流域生活功能重心由雁山区的草坪回族乡向西北方向迁移,主要是由于流域该时期加快中心城区的生活服务配套设施及交通体系建设,并围绕老城疏解改造提升,从而不断提高了城乡居民的生活水平;2015—2020 年,流域生活功能重心则转向西南方向偏移,说明流域西南地区该时期在完善劳动人口密集区域路网建设、强化城市精细化管理等方

面效果明显,进一步推动了生活功能重心向西南方向的转移。

生态功能重心的分布与生产功能相同,在整个研究时段内均位于大埠乡,且迁移得不明显,2010—2015 年重心往东南部移动,而后在 2015—2020 年继续向东南方向偏移,一方面说明流域东南部在大气、水、土壤等方面开展的污染防治攻坚战取得了明显的成效,另一方面也表明在生态立市的背景下,流域东南部是漓江流域未来发挥生态优势的主要方向。

3.3 “三生”功能多情景模拟预测

为验证模拟结果的可靠性,本研究通过 2010 年土地利用数据来模拟 2020 年土地利用空间分布类型,并通过 Confusion Matrix and Fom 模块计算 Kappa 系数及 FoM 值来判断模拟精度。在模拟过程中,各类用地目标像元数通过 ArcGIS 软件获取,过渡转移矩阵按表 3 自然发展情景设置,邻域权重通过各用地类型扩张占比来表示。最终计算得到 Kappa 系数为 0.944,FoM 值为 0.06,表明本研究的模拟精度较高。随后,根据上述模拟过程,利用 2020 年土地利用数据模拟 2030 年土地利用空间分布结果。在这



一阶段中,利用该模型的 Markov Chain 功能预测得到各类用地目标像元数,并分别按表 3 中的两种情景设置过渡转移矩阵,模拟得到 2030 年土地利用数据。

最后,基于预测结果,利用公式(1)计算得到各评价网格的 2030 年自然发展和生态保护两种情景下的“三生”功能指数,并通过 ArcGIS 进行可视化。

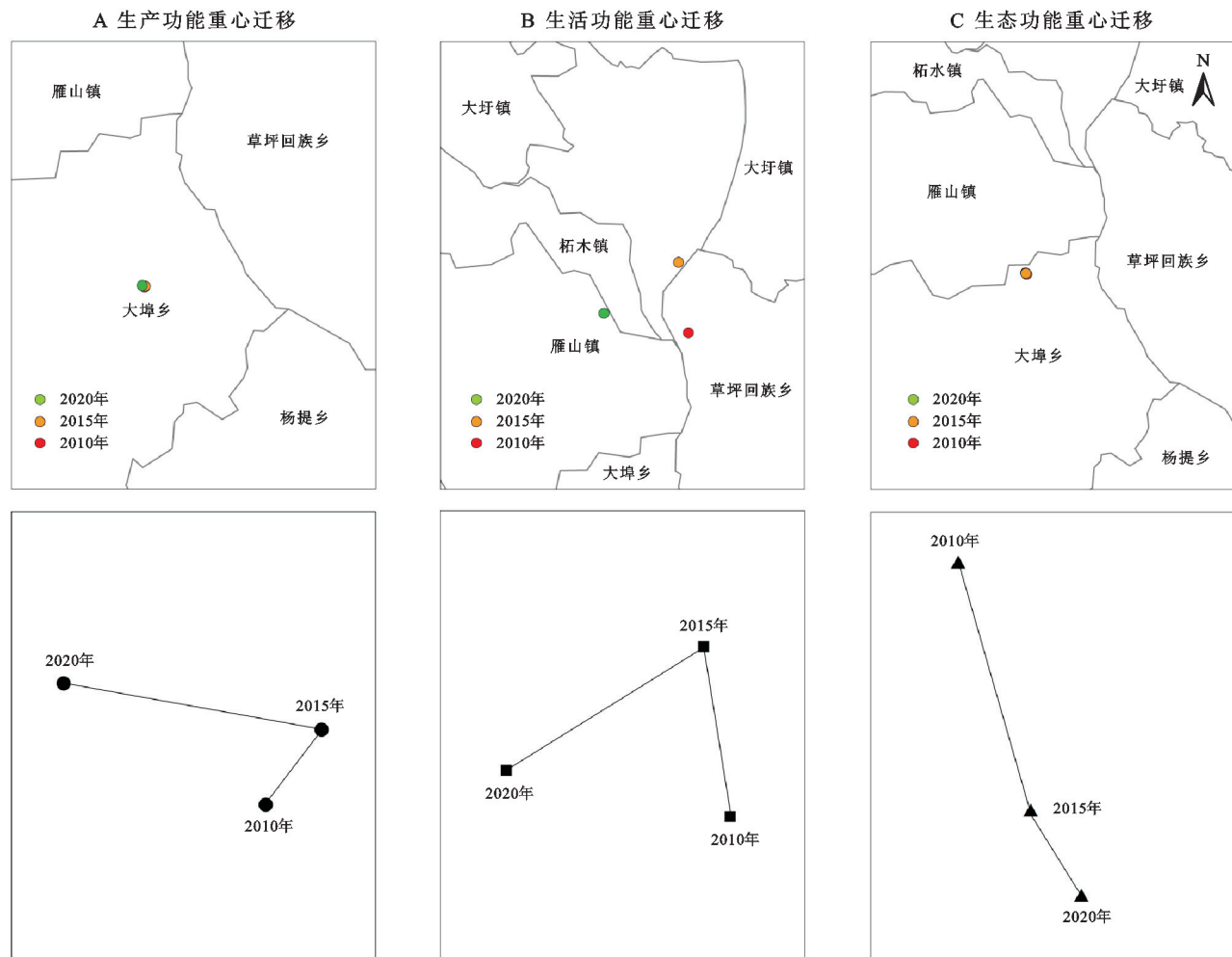


图 6 2010—2020 年漓江流域“三生”功能重心迁移

Fig. 6 Gravity center migration of production-living-ecology function in the Lijiang River watershed from 2010 to 2020

2030 年两种情景下的“三生”功能空间分布与 2020 年相似,仍是以低生产功能区、低生活功能区和高生态功能区为主(图 7),且生产功能高值区同样也呈沿低地势分布的特征,生活功能高值区也主要集中在桂林市区,生态功能高值区则仍沿高地势分布。由表 4 知,在自然发展情景下,生产、生活及生态功能均值分别为 11.263,1.501,36.107。与 2020 年相比,流域生产功能和生活功能均值分别上升了 0.278,0.4,且高值区的面积也均呈上升趋势,而生态功能均值下降了 0.138,生态功能高值区的面积也保持下降。主要是因为按照现有发展趋势,漓江流域不断加快城镇化建设及经济发展的推进,农村居民点、城镇用地不断扩张,城乡基础设施建设进一步得到完善,使得居民生活水平提升明显。此外,按照当前生态产业发展趋势,当地通过探索生态产业化、产业生态化的可持续发展模式,带动区域经济转型升级发展,进而提升

了生产水平。同时,人类活动也在一定程度上也对生态空间造成影响,进而也对整体生态功能造成影响。

生态保护情景下,生产、生活及生态功能均值分别为 11.406,1.312,36.305,较 2020 年分别上升了 0.421,0.211,0.06,生产、生活及生态功能高值区面积也均有所增加,主要是因为在该情景下,生态保护强度得到加大,林地、草地、水域等生态用地的转出受到限制,且对建设用地的扩张具有一定的约束作用,增强了生产用地的稳定性、连通性并提升了生态用地规模;此外,在推动城乡绿色发展的同时,面源、土壤、地下水等污染也得到了有效控制,进而提升了人居生活质量。

由表 4 可以看出,2030 年漓江流域生产、生活功能的整体水平及高值区面积较 2020 年均有一定程度的上升,但相比自然发展情景,生态保护情景下生产功能的发展优势更明显。此外,对比生态功能在自然发展情景与生态保护情景的模拟结果可以发现,生态功能均值及



高值区面积在自然发展情景中较 2020 年有所下降,而在生态保护情景中较 2020 年有所上升,一方面说明生态功能在生态保护情景下的发展优势也更明显,另一方面也说明在生态保护情景中通过加大环境保护措施,控制未利用地、耕地向林地、草地的扩张,能提升地区生产、生活功能,并减缓地区生态功能的下降。

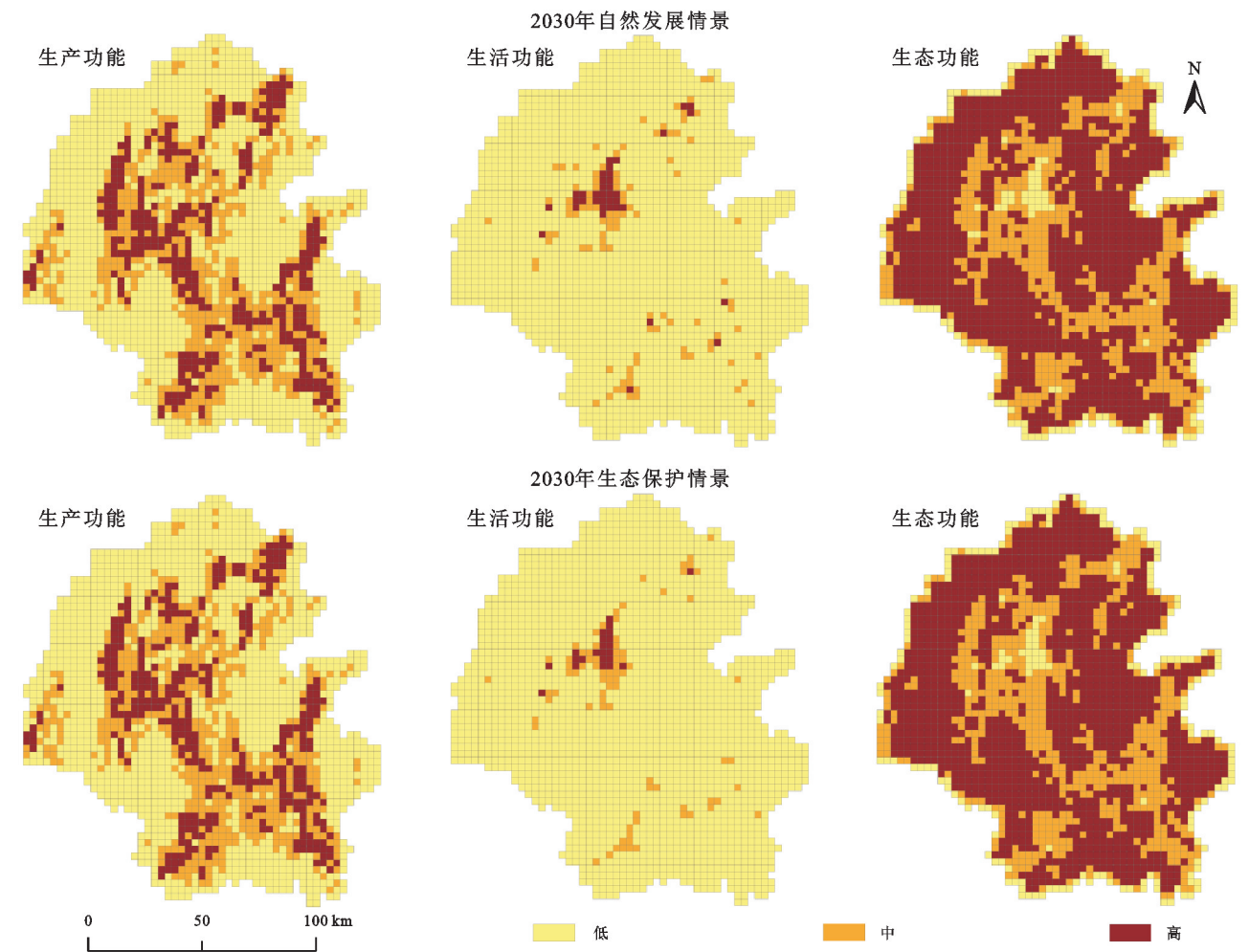


图 7 2030 年两种情景下的“三生”功能等级分布

Fig. 7 Distribution of production-living-ecology function levels in the Lijiang River watershed in 2030 under two scenarios

表 4 不同情景下 2020—2030 年“三生”功能均值及高值区面积变化

Table 4 Changes of mean value and the area of high-value region of production-living-ecology function under different scenarios in 2020—2030

年份	发展情景	生产功能		生活功能		生态功能	
		功能均值	高值区面积/km <sup>2</sup>	功能均值	高值区面积/km <sup>2</sup>	功能均值	高值区面积/km <sup>2</sup>
2020		10.985	3087	1.101	144	36.245	11601
2030	自然发展	11.263	3222	1.501	333	36.107	11583
	生态保护	11.406	3294	1.312	207	36.305	11610
2020—2030	自然发展	0.278	135	0.400	189	−0.138	−18
	生态保护	0.421	207	0.211	63	0.060	9

综合来看,生态保护情景下漓江流域在生产、生态功能方面具有更大的发展优势,更符合《桂林市国土空间总体规划(2021—2035 年)》中提出的“引导特色农业发展,严保耕地和基本农田”的现代农业发展思路及“筑牢‘两屏五区七廊’全域生态安全总体格局,统筹全域山水林田湖草沙生态修复和治理”的生态发展格局。

4 讨论与结论

4.1 讨论

总的来说,漓江流域未来应开展有针对性的专项工程,优化生态、生产、生活空间格局,促进“三生”功能间的协调发展。一方面需要政府部门高度重视漓江流域生产、生活水平发展和生态保护间的矛盾,制

定差异化的区域开发政策。例如,参考《桂林市国土空间总体规划(2021—2035年)》中的发展规划,针对生产功能低值区,可在靠近市区的地区重点发展市近郊农业,为城市后花园和菜篮子提供日常生活农产品服务配套,并在北部和南部重点推动农产品的生产保障功能,同时在东、西地区依据地形特点重点打造山地生态林果产业,从而有效提升生产、生态功能间的协调发展;针对生活功能低值区,应当进一步推动城市高质量发展,促进城市有机更新,实施城镇低效用地再开发利用,提升功能品质,并尊重和保护山水格局,加强城市建设与自然景观有机融合,实现生活水平及生态保护的双提升;针对生态功能低值区,应当进一步划定国土综合整治及生态修复分区、明确生态修复重点工程布局,同时引导多元化的生态保护修复资金投入和多主体协同工作机制,进而提升生态功能水平。另一方面,根据不同情景模拟结果,未来漓江流域无论是走何种发展路线,首先都应当保障生产、生活功能水平不下降的基础上,进一步把握生态红线,建立健全生态保护修复和管理机制,并积极探索“生态+”绿色产业,促进“三生”功能间的协调发展。

从“三生”功能评价结果来看,本文基于格网尺度对“三生”功能进行评价,相比宏观行政尺度更能体现“三生”功能内部的差异性特征,但其同样也存在不能很好地表达出宏观发展背景的问题。因此,单一尺度研究均难以打破用地类型及行政区划所带来的限制,后续将进一步完善“三生”功能的多尺度集成评价研究。

从模拟结果看,本文从社会经济、生态环境及约束数据三方面共选择11项驱动因子来模拟研究区“三生”功能格局,模拟精度也能够较好地满足要求,但也存在一定的不足之处。一是在设置PLUS模型的过渡转移矩阵及邻域权重参数时,虽然综合了前人经验及流域现状,并进行了多次调试,但仍具有一定的主观性,后续将继续探索参数设置的定量化方法;二是忽略了生态保护红线、城市开发边界等限制因子对地类变化带来的影响,因此后续将纳入多因素综合限制因子,提升模拟准确度。

## 4.2 结论

(1) 漓江流域2010—2020年生产、生活功能整体上呈上升趋势,生态功能整体上则呈下降趋势。其中,生产功能和生活功能的高、低值区分别集中在海拔较低和较高的地区,生态功能呈相反的分布特征。2010—2015年,生产、生活功能增长强度较大的地区均集中在桂林市区、灵川县和兴安县,生态功能增长

强度较大的地区则分布在灵川县。2015—2020年,生产、生活功能增强地区的面积有较明显的增加趋势,且增长强度较大的地区均向桂林市区和流域南部部分市县集中;生态功能增强地区的数量则有明显的减少趋势,且增长强度较大的地区呈现向流域北部扩散的特征。总的来看,生产功能变化幅度较小,生活功能次之,生态功能变化幅度最大。

(2) 生产、生态功能重心10a间均位于大埠乡,但生产功能重心先往东北方向偏移,而后转向西北方向,生态功能重心则持续向东南方向偏移;生活功能重心先由雁山区的草坪回族乡向西北方向迁移至大圩镇,而后向西南侧移动至雁山镇。

(3) 对模拟精度进行评价,得到Kappa系数为0.944, FoM值为0.06,表明运用PLUS模型模拟预测土地利用变化是可行的。两种情景下的“三生”功能空间分布与2020年相似,自然发展情景2030年流域生产功能和生活功能均值比2020年分别上升了0.278, 0.4, 高值区的面积也均呈上升趋势,而生态功能均值则相比2020年下降了0.138, 高值区的面积也有所下降。生态保护情景2030年流域生产、生活、生态功能均值相比2020年分别上升了0.421, 0.211, 0.06, 高值区面积也均有所上升。综合本文的预测结果来看,生态保护情景更加注重“三生”功能间的协调性、整体性,更加符合《桂林市国土空间总体规划(2021—2035)》提出的品质生活名城和人与自然和谐共生的现代化城市建设目标。

## 参考文献(References):

- [1] 匡文慧.新时代国土空间格局变化和美丽愿景规划实施的若干问题探讨[J].资源科学,2019,41(1):23-32.  
Kuang W H. Issues regarding on spatial pattern change of national land space and its overall implementation on beautiful vision in new era[J]. Resources Science, 2019, 41(1):23-32.
- [2] 李玲慧,赵锐锋,明思雨,等.黄河上游地区(陕甘宁青)“三生空间”功能的演变特征及耦合协调分析[J].地球环境学报,2022,13(4):449-464.  
Li L H, Zhao R F, Ming S Y, et al. Evolvment characteristics and coupling coordination analysis of “production-living-ecological space” function in the upper reaches of the Yellow River[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(4):449-464.
- [3] 李欣,殷如梦,方斌,等.基于“三生”功能的江苏省国土空间特征及分区调控[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1833-1846.  
Li X, Yin R M, Fang B, et al. Research on the func-

- tional zoning and regulation of Jiangsu Province's territorial space based on the "production-living-ecological" function[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(8):1833-1846.
- [4] 谢晓彤,李效顺.河南省“三生”功能时空演变特征及影响因素[J].*农业工程学报*, 2021, 37(22):243-252.
- Xie X T, Li X S. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of "production-living-ecological" functions in Henan Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22):243-252.
- [5] 逯承鹏,纪薇,刘志良,等.黄河流域甘肃段县域“三生”功能空间时空格局及影响因素识别[J].*地理科学*, 2022, 42(4):579-588.
- Lu C P, Ji W, Liu Z L, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of the "production-living-ecological" functional space of the Yellow River Basin at county level in Gansu, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(4):579-588.
- [6] 程宪波,陶宇,欧维新.江苏省乡村三生功能耦合协调时空变化特征分析[J].*长江流域资源与环境*, 2022, 31(1):222-233.
- Chen X B, Tao Y, Ou W X. Spatio-temporal characteristics and evolutions of rural production-living-ecological function and coupling coordination in Jiangsu [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(1):222-233.
- [7] 纪璇,李琳娜,程明洋.安徽省县域乡村“三生”功能及耦合协调时空格局分析[J].*中国农业资源与区划*, 2022, 43(10):150-161.
- Ji X, Li L N, Cheng M Y. The spatio-temporal pattern of rural "production-living-ecological" function and coupling coordination at county level of Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(10):150-161.
- [8] 徐磊,王建鹏,张贵军,等.环京津地区“三生”功能演化特征及分区调控研究[J].*城市问题*, 2022(10):35-44.
- Xu L, Wang J P, Zhang G J, et al. Functional evolution characteristics and zoning control of the "Production-Living-Ecological" function in the region around Beijing and Tianjin[J]. *Urban Problems*, 2022(10):35-44.
- [9] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].*地理学报*, 2022, 77(3):534-546.
- Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3):534-546.
- [10] 张雄,王芳,张俊峰,等.长江中游城市群三生功能的空间关联性[J].*中国人口·资源与环境*, 2021, 31(11):110-122.
- Zhang X, Wang F, Zhang J F, et al. Spatial correlation of the productive-ecological-living function of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(11):110-122.
- [11] 张玉臻,陈阳,王洁,等.黄河流域“三生”功能协调性测度及其差异性优化调控[J].*农业工程学报*, 2021, 37(12):251-261.
- Zhang Y Z, Chen Y, Wang J, et al. Coordinate degree and differential optimizing "production-living-ecological" function in the Yellow River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12):251-261.
- [12] 唐秀美,刘玉,任艳敏.基于格网尺度的密云水库区域“三生”空间功能测度与时空变化分析[J].*中国农业资源与区划*, 2021, 42(5):60-69.
- Tang X M, Liu Y, Ren Y M. Ecological-production-living spaces transformation and analysis of land use based on grid scale in Miyun Reservoir Area[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(5):60-69.
- [13] 朱润苗,陈松林.基于“三生”功能的福建省国土空间特征及优化研究[J].*水土保持通报*, 2021, 41(4):323-330.
- Zhu R M, Chen S L. Characteristics and optimization of territorial space in Fujian Province based on production-living-ecological functions[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4):323-330.
- [14] 庞晓菲,陆汝成,张利国,等.广西边境地区土地利用“三生”功能协调关系及分区优化[J].*水土保持研究*, 2023, 30(2):294-302.
- Pang X F, Lu R C, Zhang L G, et al. Study on coordination and zoning optimization of land use based on production-living-ecological functions in border areas of Guangxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2):294-302.
- [15] Guo H J, Cai Y P, Li B W, et al. An integrated modeling approach for ecological risks assessment under multiple scenarios in Guangzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:109270.
- [16] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85:101569.



- [17] 陈娜. 基于 GMDP 和 PLUS 模型的襄阳市土地利用优化配置研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- Chen N. A Study on the Optimization of Land Use Allocation in Xiangyang City Based on GMDP and PLUS Models[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [18] 郭鹏程. 耦合 MOP 与 PLUS 模型的土地利用/覆被结构与空间优化研究: 以合肥市为例[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- Guo P C. Research on Land Use/Cover Structure and Space Optimization by Coupling MOP and PLUS Models: A Case Study of Hefei City[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [19] 冯晓娟, 雷国平, 马泉来, 等. 1990—2020 年河南省黄淮海平原国土空间“三生”功能时空演变[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 357-364.
- Feng X J, Lei G P, Ma Q L, et al. Spatial-temporal evolution of production-living-ecological function in Huang-huaihai Plain of He'nan Province during 1990—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 357-364.
- [20] 金星星, 陆玉麒, 林金煌, 等. 闽三角城市群生产-生活-生态时空格局演化与功能测度[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4286-4295.
- Jin X X, Lu Y L, Lin J H, et al. Research on the evolution of spatiotemporal patterns of production-living-ecological space in an urban agglomeration in the Fujian Delta region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4286-4295.
- [21] 梁龙武, 先乐, 陈明星. 改革开放以来中国区域人口与经济重心演进态势及其影响因素[J]. 经济地理, 2022, 42(2): 93-103.
- Liang L W, Xian Y, Chen M X. Evolution trend and influencing factors of regional population and economy gravity center in China since the reform and opening-up [J]. Economic Geography, 2022, 42(2): 93-103.
- [22] 吴凯, 顾晋飴, 何宏谋, 等. 基于重心模型的丘陵山地区耕地利用转换时空特征研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 247-254.
- Wu K, Gu J Y, He H M, et al. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use transition in hilly and mountainous regions based on barycenter model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(7): 247-254.
- [23] 毛靓, 贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 44-53.
- Mao L, Jia J M. Study on the change characteristics of landscape pattern of agricultural and forestry land at county area in Heilongjiang[J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 44-53.
- [24] 王子尧, 黄楚梨, 李惊, 等. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估: 以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5789-5798.
- Wang Z Y, Huang C L, Li L, et al. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with Invest-HFI-Plus model: A case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5789-5798.
- [25] 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳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.
- [26] 王军, 严有龙, 王金满, 等. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5837-5848.
- Wang J, Yan Y L, Wang J M, et al. Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in Min River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5837-5848.
- [27] 王佳楠, 张志. 基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3): 139-148.
- Wang J N, Zhang Z. Land use change and simulation analysis in the northern margin of the Qaidam Basin based on markov-PLUS model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3): 139-148.