

# 耦合 MOP-FLUS 模型的滇中城市群“三生”空间格局优化

赵寿露<sup>1</sup>, 李石华<sup>2</sup>, 许新惠<sup>1</sup>, 李应鑫<sup>3</sup>, 杨文仙<sup>3</sup>, 邱利丹<sup>3</sup>

(1.云南大学 地球科学学院, 昆明 650500; 2.云南省基础地理信息中心,  
昆明 650034; 3.云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

**摘 要:**生产空间、生活空间、生态空间之间联系紧密, 决定国土空间的最高演化目标, 为了协调区域经济社会的发展, 通过构建符合城市群发展实际的“三生”空间分类体系划定国土空间; 基于目标条件与情景设定, 通过 MOP 模型实现“三生”空间综合效益最大化; 利用 FLUS 模型优化“三生”空间布局, 并采用景观格局指数对其优化结果进行了分析评价。结果表明: 优先满足生产和生活空间发展情景的生态效益最低, 城镇化进程加快的同时生态空间发展受到抑制, 生态环境脆弱; 优先满足生态空间发展情景的经济效益最低, 生态环境虽然得到良好保护, 但同时生产与生活空间面积占比较小, 分布破碎, 不利于区域经济发展; “三生”空间均衡协调发展情景的经济效益提高 4.46%, 生态效益提高 1.87%, 空间布局均衡统一。因此该情景能够合理平衡生态建设与经济发展, 在丰富生态过程和格局结构上具有优越性, 可为滇中城市群国土空间资源配置、“三生”空间优化等决策提供一定的参考和借鉴。

**关键词:**三生空间; MOP-FLUS 模型; 空间布局优化; 景观指数分析; 滇中城市群

**中图分类号:**P967; F205

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)04-0322-07

## Production-Life-Ecological Space Pattern Optimization of the Urban Agglomeration in Central Yunnan Based on Coupled MOP and FLUS Model

ZHAO Shoulou<sup>1</sup>, LI Shihua<sup>2</sup>, XU Xinhui<sup>1</sup>, LI Yingxin<sup>3</sup>, YANG Wenxian<sup>3</sup>, QIU Lidan<sup>3</sup>

(1.School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2.Yunnan Provincial Geomatics Centre, Kunming 650034, China; 3.College of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Production space, living space and ecological space are closely linked, which determines the highest evolution goal of land space. In order to coordinate the development of regional economy and society, we defined the land space by constructing the production-life-ecological space classification system in line with the reality of urban agglomeration development, and maximized the comprehensive benefits of the production-life-ecological space through MOP model based on the target conditions and scenario setting, the FLUS model was used to optimize the spatial layout of production-life-ecological space, and the landscape pattern index was used to analyze and evaluate the optimization results. The results show that the ecological benefits of giving priority to the development of production and living space are the lowest, the development of ecological space was restrained and the ecological environment was fragile while the process of urbanization was accelerated; the economic benefits of giving priority to meeting the development scenario of ecological space were the lowest; although the ecological environment was well protected, the area of production and living space was relatively small and fragmented, which was not conducive to regional economic development. The economic benefits of the production-life-ecological space spatial balanced and coordinated development scenario increased by 4.46%, the ecological benefits increased by 1.87%, and the spatial layout was balanced and unified. Therefore, this scenario can reasonably balance ecological construction and economic development, and has advantages in enriching ecological process and pattern structure. It can provide some reference

收稿日期: 2021-06-02

修回日期: 2021-07-09

资助项目: 国家自然科学基金(41861051, 41971369); 云南省自然科学基金(202101AT070052)

第一作者: 赵寿露(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: 2385300262@qq.com

通信作者: 李石华(1980—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事资源环境遥感技术应用研究。E-mail: Lsh8010@163.com

for decision-making such as land spatial resource allocation and production-life-ecological space spatial optimization of urban agglomeration in Central Yunnan.

**Keywords:** production-life-ecological space; MOP-FLUS model; spatial layout optimization; landscape index analysis; central Yunnan urban agglomeration

三类空间(生态-生活-生产,简称“三生”)作为国土空间研究范式,既反映了区域土地利用结构,也反映了国土空间代表性功能,它们之间紧密相连,相辅相成。“三生”空间格局变化对区域的生态环境和社会经济产生重要影响。因此,实现“三生”空间格局优化,提高区域内国土空间利用效率,有助于区域发展定位和厘清发展重点与方向,从而实现国土空间有序多元化发展。

近年来,“三生”空间优化协调问题备受研究者青睐。相关学者围绕“三生”空间的结构以及布局优化问题,从评价方法创新<sup>[1-7]</sup>、模型耦合优化<sup>[8-17]</sup>、设定算法体系<sup>[18-23]</sup>等方面入手开展了大量研究。在功能划分评价分析方法创新中<sup>[1-7]</sup>,孙丽娜等<sup>[6]</sup>从“三生”空间视角出发,运用景观指数法以及 GIS 空间分析法对研究区域“空间”的现状进行分析,最终得到土地利用优化布局方案。孔卫鹏<sup>[7]</sup>通过指标分析法与加权叠加各因子的方法对资源型城市进行适宜性评价,最终获取分值比较获取“三生”空间优化结果。在模型耦合优化创新中<sup>[8-17]</sup>,基于模型构建的优化配置方法主要有智能体系统<sup>[13]</sup>、元胞自动机(CA)<sup>[14]</sup>和人工神经网络模型(ANN)<sup>[15]</sup>等。如林伊琳等<sup>[16]</sup>通过耦合 MCR 模型、FLUS 模型以及 Markov 模型,实现了研究区域的“三生”空间格局优化方案。曹帅等<sup>[17]</sup>通过探索“结构+约束+布局+准则”定式,利用 GeoSOS-FLUS 与 MOP 模型对研究区域内的土地利用结构调整以及空间布局进行了优化。在算法支持体系研究中<sup>[18-23]</sup>,优化配置方法主要有遗传算法(GA)<sup>[18]</sup>、蚁群算法(ACO)<sup>[19-20]</sup>、粒子群算法(PSO)<sup>[21]</sup>、人工蜂群算法(ABC)<sup>[22]</sup>等。如龚媛<sup>[21]</sup>通过设置 ESV 值最大化,设置土地适宜性最大化等目标构建 LUOA 的 MOP 模型,并且在此基础上运用 PSO 算法,实现了研究区域土地数量结构调整与空间布局优化研究。耿瑞雪<sup>[23]</sup>基于蚁群算法(ACO)构建模型,在 GeoSOS 系统中实现土地利用空间优化。

通过梳理以上“三生”空间优化协调的相关理论和应用研究可以看出,开展“三生”空间优化协调研究时间较早,已积累了较为丰厚的理论基础,但是相关的评价方法以及模型耦合较为单一。运用 MOP 模型解决“三生”空间数量结构优化问题,实现整体效益最大化,并耦合 FLUS 模型进行“三生”空间布局模

拟,实现“三生”空间格局优化协调,将有助于提高区域经济效益与生态效益,从而迎合当下生态环境保护日益受到重视的时代背景的需求。

因此,区别于以上研究,本文以“三生”空间布局优化与协调为目标,构建出符合城市群发展实际的“三生”空间分类体系。设定生产和生活空间发展情景,生态空间发展情景,“三生”空间协调发展 3 种情景,运用 MOP 模型与 FLUS 模型对滇中城市群 2030 年“三生”空间布局进行优化,并进行景观格局分析。以期为滇中城市群实现“十四五”规划中的“培育经济新增长点,坚定不移走绿色发展道路”目标提供参考与建议。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

滇中城市群(位于东经 100°43′—104°49′,北纬 24°58′—25°09′)是国家重点培育的 19 个城市群之一,是典型的高原山区城市。规划范围包括昆明市、曲靖市、玉溪市和楚雄州及红河州北部 7 个县市,共 49 个县(市、区)组成,划分为昆明城区、滇中新区、宜良城区、富民城区 4 个城区单位。国土面积为 111 402.00 km<sup>2</sup>,总人口 2 300 万人。地势起伏较大,动植物资源与旅游文化资源丰富,矿产资源储量大,生态环境质量总体较好,位于云南省中部,是向外辐射的中心,也是协调区域发展的中心。

### 1.2 数据源及数据预处理

(1) 本文涉及的 2010 年、2020 年土地利用类型数据为矢量数据。来源于国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(DOI:10.11769);运用 ArcGIS 软件将研究区两期土地利用数据划分为 300 m×300 m 栅格单元进行处理。

(2) DEM 高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率 90 m。根据 DEM 数据提取坡度、坡向数据。交通、水系、居民点等距离数据通过欧氏距离法计算得到;社会经济数据(人口密度、人均 GDP、人均可支配收入等)由云南省统计年鉴获取。

## 2 研究方法

### 2.1 “三生”空间分类体系构建

依据《第三次全国土地调查地类分类表》标准,在

土地利用功能类型基础上,遵循分类原则,构建出符合发展实际的“三生”空间分类体系。依照此体系对滇中城市群现状土地利用类型进行分类,划定生态、生活和生产空间。“三生空间”用地分类体系见表 1。

表 1 “三生”空间用地分类体系

国土空间	功能	三调用地编码及类型
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)	03 林地、04 草地、11 水域及水利设施用地
	生态容纳	12 其他土地
	工商生产、物资储备	05 商服用地、06 工矿仓储用地
	城镇建成区、农村生活区	07 住宅用地
生活空间	公共服务	08 公共管理与公共服务用地
	交通服务	10 交通运输用地
	功能特殊、维护公共利益	09 特殊用地
生产空间	种植、生产、采集作物	01 耕地、02 园地

2.2 MOP 模型

MOP 模型即多目标规划模型,是基于决策变量、目标函数、约束条件 3 个模块进行效益优化较为科学的重要模型,能在主观或客观条件下,使得某个或多个目标达到最值,是研究地理学、区域经济发展的基本数学模型。

2.2.1 情景设置 根据滇中城市群的区域优势、资源禀赋、生态保护保护目标、经济社会发展等实际,本文设置了优先满足生产和生活空间发展、优先满足生态空间发展、“三生”空间均衡协调发展 3 种情景。结合德尔菲法与专家意见,确定 3 种情景中经济与生态效益目标权重值。

情景 1:优先满足生产和生活空间发展。考虑到生产和生活空间联系紧密,功能交叉,实际面积略小,设定优先满足滇中城市群居民生产和经营、居住与休闲空间发展。优先进行产业结构优化,带动城镇发展,使经济效益最大化。生态效益目标权重 0.2,经济效益目标权重 0.8。

情景 2:优先满足生态空间发展。依据自然资源的有限性以及生态文明建设的重要性,设定生态空间发展。在保证现有生产与生活空间不被压缩的前提下,大力推进区域生态环境建设,使生态效益最大化。生态效益目标权重 0.8,经济效益目标权重 0.2。

情景 3:“三生”空间均衡协调发展。为了使国土空间优化更为全面与协调,设定生态-生活-生产空间均衡发展。加强对国土空间的综合利用程度,提升区域城镇化进程并保障生态可持续发展。从而优化国土空间结构,提高空间利用效率。生态效益目标权重 0.5,经济效益目标权重 0.5。

2.2.2 目标函数构建

(1) 生态效益目标。结合滇中城市群实际情况,采用谢高地等<sup>[24]</sup>的中国生态系统服务价值当量因子表进行生态效益估算。

$$\max F_{\text{ESV}} = \sum P_i \times x_i \tag{1}$$

式中: $F_{\text{ESV}}$ 为生态效益(万元); $x_i$ 为各类国土空间的面积( $\text{km}^2$ ); $P_i$ 为第  $i$  种国土空间的单位面积生态系统服务价值系数(万元/ $\text{km}^2$ )。

(2) 经济效益目标。

$$\max F_s = \sum K_i \times x_i \tag{2}$$

式中: $F_s$ 为经济效益(万元); $x_i$ 为各类国土空间的面积( $\text{km}^2$ ); $K_i$ 为各类国土空间的经济效益系数(万元/ $\text{km}^2$ )。通过 2010 年与 2020 年研究区 3 类国土空间平均产值与对应面积之比,得到经济效益系数;通过 2010 年与 2020 年研究区 3 类国土空间平均生态系统服务总价值与对应面积之比,得到生态效益系数(表 2)。

表 2 滇中城市群各类国土空间单位面积经济、生态效益系数

效益系数	生态空间	生活空间	生产空间
经济系数( $K_i$ )	1356.90	30939.39	2714.34
生态系数( $P_i$ )	0.90	0.00	0.48

(3) 约束条件。为保证多情景下的未来生态、生活、生产 3 类国土空间符合自然发展规律和相关规划预期,本文与区域土地利用总体规划调整政策相衔接,结合研究区 2010—2020 年“三生”空间内包括的多种土地利用变化规律来构建约束条件(表 3)。

2.3 GeoSOS-FLUS 模型

GeoSOS-FLUS 模型是基于区域内土地利用变化规律与自然生态发展效应,模拟未来土地利用的模式<sup>[25]</sup>。它由人工神经网络(ANN)模型,集成系统动力学模型和元胞自动机(CA)组成。运用 ANN 模型来获取元胞转换为各种用地类型的可能性;运用 SD 模型预测不同社会经济和自然环境驱动因素下的地区范围内土地利用情景;运用 CA 模型中的自适应的惯性竞争机制来处理复杂系统不同土地利用类型之间的竞争与互动。FLUS 模型是进行国土空间布局优化研究中比较常见的科学模型。

2.4 景观指数选取

景观指数可以用于定量表示空间粒度和时间粒度内的“三生”空间变化,建立格局与过程之间的联

系。本文根据研究目标,考虑到“三生”空间量化分析的重点以及不同景观指数的特点,选取了 6 个景观指数来进行“三生”空间格局分析,见表 4。

表 3 约束条件构建

约束因素	约束条件/km <sup>2</sup>	说明
土地面积约束	$x_1+x_2+x_3=11402$	$x_1$ 为生态空间; $x_2$ 为生活空间; $x_3$ 为生产空间,这三类国土空间总面积等于研究区土地总面积
林地规模约束	$48657 \geq x_{11} \geq 40833$	$x_{11}$ 为生态空间中的林地,由于研究区域近年来水土流失频发,林业资源需求增加,因此基于林地生态系统保护,林地的最小规模根据 2010—2020 年的退化速度来设定,最大规模设置为林地需求数据上调 10%
水域面积约束	$1122 \geq x_{12} \geq 1014$	$x_{12}$ 为生态空间中的水域及水利设施用地,由于近年来研究区域旱情严重,降水明显减少,导致研究区域 2010—2020 年水域面积逐渐减少,故水域的最小规模以 2010—2020 年的退化速度来设定;将水域的最大规模设为 2020 年水域面积
草地面积约束	$23425 \geq x_{13} \geq 22866$	$x_{13}$ 为生态空间中的草地,草地面积的变化不仅受人类活动影响,而且受降雨影响也较大,由于近年来研究区域降雨持续偏少,因此草地的最小规模根据 2010—2020 年的退化速度设定;最大规模设置为情景 3 下的草地需求数据上调 1%
建设用地规模约束	$3482 \geq x_{21} \geq 3165$	$x_{21}$ 为生活空间中的建设用地,考虑到研究区域城镇建设全面展开,以及建设用地的规模控制政策,设定建设用地的最小规模不低于 2020 年现有建设用地规模;最大规模设置为建设用地需求数据上调 10%
耕地面积约束	$39682 \geq x_{31} \geq 34549$	$x_{31}$ 为生产空间中的耕地,考虑到研究区域粮食安全与耕地保护政策,耕地的最小规模以 2010—2020 年的退化速度来设定;最大规模设置为耕地需求数据上调 10%

表 4 景观指数选取

景观指数	公式	式中各字母的含义	意义
斑块类型百分比(PLAND)	$PLAND=\frac{\sum_{i=1}^n a_{ij}}{A}$	$a_{ij}$ 为斑块 $ij$ 的面积; $A$ 为景观的总面积	“三生”空间面积比例
斑块密度(PD)	$PD=N/A$	$N$ 为斑块数量; $A$ 为景观的总面积	“三生”空间破碎程度和受干扰程度
景观形状指数(LSI)	$LSI=0.25L/\sqrt{A}$	$L$ 为景观中所有斑块边界的总长度; $A$ 为景观的总面积	“三生”空间离散程度
分离度指数(DIVISION)	$DIVISION=1-\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\frac{a_{ij}}{A})^2$	$a_{ij}$ 为斑块 $ij$ 的面积; $A$ 为总景观面积	“三生”空间斑块破碎度
最大斑块指数(LPI)	$LPI=(a_{\max}/A) \times 100$	$a_{\max}$ 为景观或某一种斑块类型中最大斑块的面积; $A$ 为景观的总面积	“三生”空间优势度
香浓多样性指数(SHDI)	$SHDI=\sum_{i=1}^m (p_i \ln p_i)$	$m$ 为景观类型数目; $P_i$ 为景观类型 $i$ 所占面积的比例	“三生”空间景观异质性

3 结果与分析

3.1 “三生”空间分布特征

依据“三生”空间分类体系对滇中城市群 2010 年、2020 年现状土地利用类型进行分类,划定生态、生活和生产空间(图 1)。

(1) 2010 年生态空间面积 71 756.96 km<sup>2</sup>,占比 64.41%,在研究区西部分布面积较广,生态建设较为完整;生活空间 1 977.68km<sup>2</sup>,占比 1.78%,分布较为破碎,主要集中在研究区中部,其余地区零星分布;生产空间 37 667.36 km<sup>2</sup>,占比 33.81%,在研究区东部分布较广,在研究区南部分布较为集中,呈团簇状聚集分布。

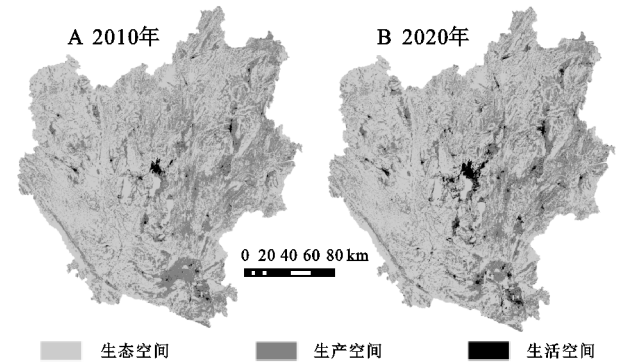


图 1 滇中城市群 2010 年、2020 年“三生”空间现状分布

(2) 2020 年:生态空间面积 71 355.24 km<sup>2</sup>,占比 64.05%,生态空间面积占比减小,被生活与生产空间



挤占;生活空间 3 989.45 km<sup>2</sup>,占比 3.58%,区域城镇化进程加快,生活空间不断向周边蔓延,其中研究区中部、南部、东北部扩张最为明显;生产空间 36 057.31 km<sup>2</sup>,占比 32.37%,由于生活空间扩张,生产空间面积减小,分布破碎不完整。

3.2 多情景下“三生”空间效益分析

基于生态效益目标与生态效益目标和多目标情景约束条件,利用 Markov Chain 和 MOP 模型得到 3 种情景方案下 2030 年滇中城市群及生态效益值以及经济效益值(表 5)。各国土空间的用地类型数量结构差异明显,其中,林地、草地、建设用地对生态效益和经济效益具有直接且显著的影响。

表 5 多情景效益对比分析

指标	情景 1 (优先满足生产和 生活空间发展)	情景 2 (优先满足 生态空间发展)	情景 3 (“三生”空间 协调发展)
经济效益/亿元	31162.67	29611.47	30932.71
生态效益/亿元	8.03	8.27	8.18
经济效益变化比例/% (以情景 2 为基准)	5.23	0.00	4.46
生态效益变化比例/% (以情景 1 为基准)	0.00	2.99	1.87

(1) 优先满足生产和生活空间发展情景中,生态空间  $x_1$  面积为 68 107 km<sup>2</sup>,其中林地  $x_{11}$  面积 40 847 km<sup>2</sup>,水域  $x_{12}$  面积 1 017 km<sup>2</sup>,草地面积 22 925 km<sup>2</sup>;生产空间  $x_2$  面积为 39 692 km<sup>2</sup>,其中耕地面积 39 609 km<sup>2</sup>;生活空间面积为 3 603 km<sup>2</sup>,其中建设用地面积 3 480 km<sup>2</sup>。在此情景中,林地、草地、水域面积显著减少,建设用地与耕地增长较多,经济效益达到最大化,相对于情景 2 提升 5.23%,但同时生态空间发展遭到抑制,生态效益值最低。这个情景不符合地区走绿色可持续道路的方针及政策。

(2) 优先满足生态空间发展情景中,生态空间  $x_1$  面积为 73 255 km<sup>2</sup>,其中林地  $x_{11}$  面积 48 648 km<sup>2</sup>,水域  $x_{12}$  面积 1 122 km<sup>2</sup>,草地面积 23 410 km<sup>2</sup>;生产空间  $x_2$  面积为 34 846 km<sup>2</sup>,其中耕地面积 34 561 km<sup>2</sup>;生活空间面积为 3 301 km<sup>2</sup>,其中建设用地面积 3 198 km<sup>2</sup>。在此情景中,建设用地与耕地面积增长停滞,林地、草地、水域面积显著增加,生态效益相对于情景 1 增幅显著,达到 2.99%,但是经济效益较低,难以保证滇中城市群经济快速发展。

(3) “三生”空间均衡协调发展中,生态空间  $x_1$  面积为 71 714 km<sup>2</sup>,其中林地  $x_{11}$  面积 45 303 km<sup>2</sup>,水域  $x_{12}$  面积 1 118 km<sup>2</sup>,草地面积 22 991 km<sup>2</sup>;生产空间  $x_2$  面积为 35 993 km<sup>2</sup>,其中耕地面积 35 694 km<sup>2</sup>;生活空间面积为 3 695 km<sup>2</sup>,其中建设用地面积 3 478 km<sup>2</sup>。在此情景中,用地类型的数量结构较为合理,经济效益与生态

效益同时达到最优化,既不限制经济快速发展,又能保证生态空间发展建设平稳实现。

3.3 多情景下“三生”空间分布格局

3.3.1 FLUS 模型精度验证 本文以 2010 年“三生”空间分布数据为基础,应用 FLUS 模型模拟 2020 年的“三生”空间分布。并利用研究区 2020 年“三生”空间现状分布数据进行对比验证(图 2)。Kappa 指数为 0.79,总体精度为 92.23%,模拟精度较高,符合模拟要求,可在此数据和模型之上进行模拟研究。

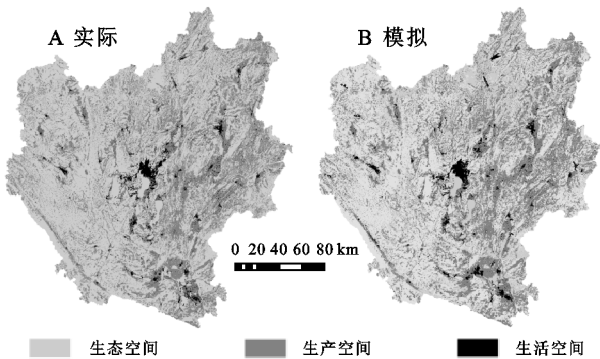


图 2 滇中城市群 2020 年实际“三生”空间布局与模型模拟结果对比

3.3.2 多情景下“三生”空间分布模拟结果 以 2020 年“三生”空间分布数据为基础,通过 FLUS 模型模拟得到滇中城市群 2030 年 3 种情景设定下的“三生”空间分布模拟结果,分布格局如图 3 所示。

(1) 情景 1。首先居民生产空间以及生活空间得到充分发展,生态空间受到压缩,满足人口扩张及经济发展需求。生活空间由中心至四周边缘不断填充扩张,生态用地转换为生产及生活用地,研究区中部及南部最为明显。

(2) 情景 2。严格控制生活及生产空间发展,维护生态安全,以生态环境建设为第一要素。生态用地保留完整,生活及生产用地扩张得到抑制。

(3) 情景 3。在此情景中,在保证生态安全的前提下,促进产业经济发展,实现生态空间、生活空间、生产空间三类国土空间的有序协调发展。生态用地小部分转换为生活及生产用地,分布较为聚集紧凑,有利于城市群产业发展以及生态保护。

由上述数据可知,区别于情景 1 大力发展区域经济,破坏生态安全平衡,以及情景 2 抑制区域城镇化发展进程,影响区域经济发展,情景 3 中提出的“三生”均衡协调方案,符合滇中城市群的实际情况,能够较好的优化生态-生活-生产空间布局,实现经济建设与生态环境建设并重发展。

3.4 多情景下景观格局指数分析

将 FLUS 模型模拟得到的 3 种情景下的滇中城市群 2030 年“三生”空间格局分布图导入 Fragstats 软件,据此分别计算其斑块类型和景观水平指数并进行对比分析,结果如图 4 所示。

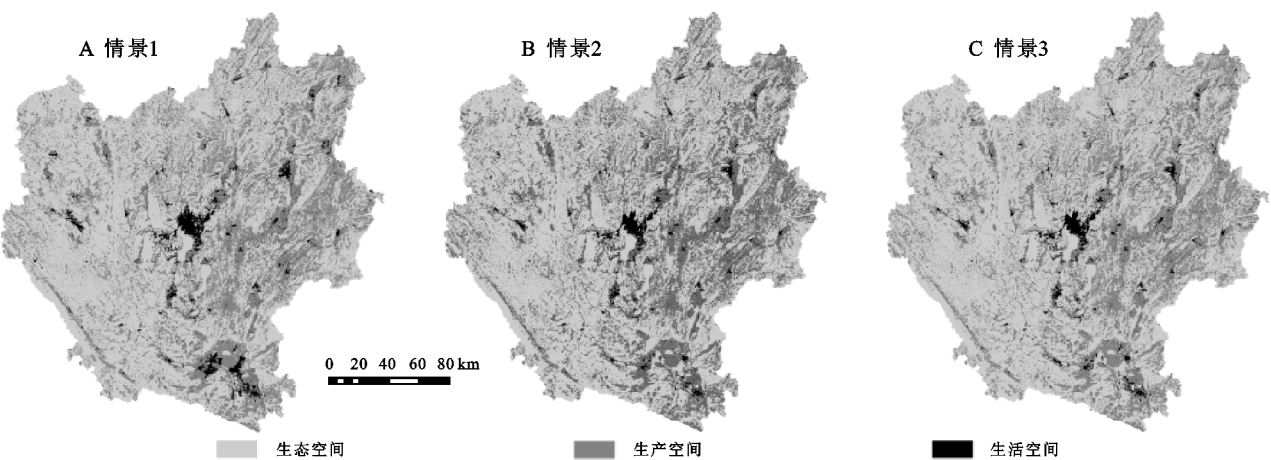


图 3 滇中城市群 2030 年不同模拟情景下的“三生”空间布局

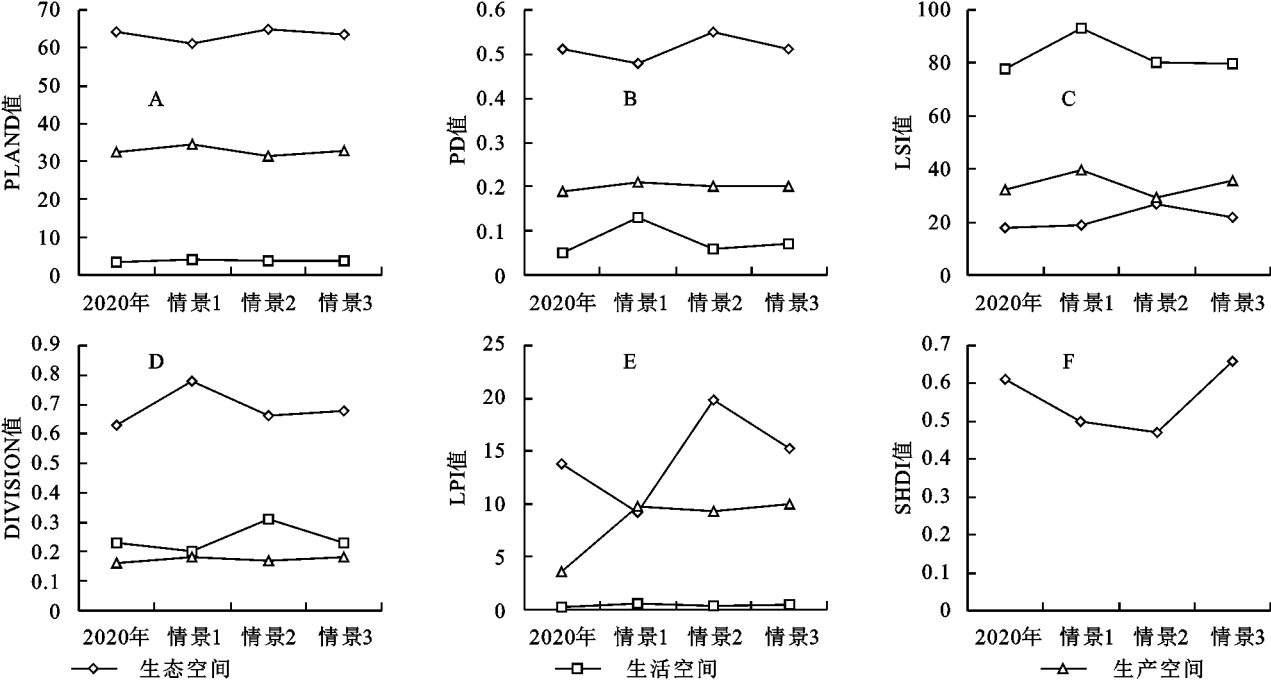


图 4 多情景下“三生”空间景观尺度指数分析结果

从图 4 中可以看出:(1) 从整体上看,情景 1 与情景 2 中“三生”空间斑块分布较分散,斑块之间联系性不够,系统性不强,生态过程和格局结构不够丰富,滇中城市群生态-生活-生产空间发展比较不平衡,情景 3 中分离度指数较低,斑块密度较高,位置集中,实现了空间布局上的协调性和稳定性。(2) 从各要素来看,结合景观形状指数与和最大斑块指数,3 种情景中生态空间在斑块类型中面积是最大的,生产空间类型较多,生活空间斑块形状较复杂,但是三者相邻程度较低。彼此之间互相独立存在,这样不利于生态空间发挥整体生态效益,空间发展不平衡,在情景 3 中有效规避了这些问题,斑块破碎度降低,斑块之间相邻度增加,增强了生态-生活-生产空间之间的联系互动。同时香浓多样性指数增加,能够看出在此情景中,国土空间丰富度较高,发展较为平衡。

## 4 讨论

(1) 本文选取的滇中城市群属于高原山区城市群,相比于平原地区的城市群,生活及生产空间分布更为分散,地形崎岖在一定程度上阻碍了城市建设发展,给国土空间规划布局配置带来难题。本文在情景 1 设定中,考虑到生产和生活空间之间功能交叉,面积占比较小,联系紧密,所以将生产和生活空间作为一个整体进行设定。在后续平原地区城市群的“三生”空间优化情景设定中,可以分为生产空间发展、生活空间发展、生态空间发展、“三生”空间协调发展 4 个情景,可以研究增强“三生”空间规划配置的科学性和有效性。

(2) 在 MOP-FLUS 模型耦合中,由于政府政策规划文件的易变性,在模型约束条件设定上不够全面,与实际发展情况可能产生偏差,如何在模型因素

构架上考虑地更为全面,使分析结果更为准确,将是今后国土空间优化布局配置的研究重点。

(3) 本文采用景观指数分析模拟优化结果,内容从景观分析角度出发,后续研究可从“三生”空间土地利用结构分析角度进行考虑,选取“三生”空间功能信息熵、功能性多样性等确切的评价单元来进行分析。

## 5 结论

本文在土地利用功能类型基础上,构建分类体系得到2010年与2020年滇中城市群“三生”空间占比结果,基于生态效益目标与生态效益目标,在多种约束条件下设定了3种情景方案,应用MOP模型得到各情景的生态效益值与经济效益值,其中情景3经济效益提高4.46%,生态效益提高1.87%,之后以2020年“三生”空间分布数据为基础,通过FLUS模型模拟得到滇中城市群2030年3种情景设定下的“三生”空间分布模拟结果,总体精度0.92,验证了方法的精准性,其中情景3空间布局最为合理,最后采用景观水平指数对滇中城市群2030年“三生”空间格局进行对比分析,情景3异质性斑块之间连接度较高,联系紧密,斑块类型在景观中呈均衡化趋势分布,从而优化了滇中城市群的“三生”空间格局。结果表明:“三生”空间协调发展情景达到了优化协调滇中城市群国土空间的目标,实现了整体综合效益的最大化,“三生”空间分布格局得到优化且生态过程和格局结构更为丰富,为后续协调滇中城市群经济生态发展提供决策参考。

### 参考文献:

- [1] 何翔宇.市域“三生”空间划定与优化调控研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [2] 朱媛媛,余斌,曾菊新,等.国家限制开发区“生产-生活-生态”空间的优化:以湖北省五峰县为例[J].经济地理,2015,35(4):26-32.
- [3] 王颖,刘学良,魏旭红,等.区域空间规划的方法和实践初探:从“三生空间”到“三区三线”[J].城市规划学刊,2018(4):65-74.
- [4] 杨惠.“三生”空间适宜性评价及优化路径研究:以扬中市为例[D].南京:南京师范大学,2018.
- [5] 扈万泰,王力国,舒沐晖.城乡规划编制中的“三生空间”划定思考[J].城市规划,2016,40(5):21-26.
- [6] 孙丽娜,董爱晶,宫月.基于三生空间的乡村土地利用空间布局优化研究:以黑龙江省明水县永兴镇为例[J].中国农学通报,2020,36(35):156-164.
- [7] 孔卫鹏.资源型城市“三生”空间划定及优化研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [8] 杨露,颜耀文,宗乐丽,等.基于多目标遗传算法和FLUS模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J].地球信息科学学报,2020,22(3):568-579.
- [9] 王培俊,孙煌,华宝龙,等.福州市滨海地区生态系统服务价值评估与动态模拟[J].农业机械学报,2020,51(3):249-257.
- [10] 李曦彤,马晶,袁浩.基于GeoSOS-FLUS平台的吉林市城市扩展研究[J].长春工程学院学报:自然科学版,2019,20(3):47-51.
- [11] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于FLUS-InVEST模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
- [12] 谢莹,匡鸿海,吴晶晶,等.基于CLUE-S模型的重庆市渝北区土地利用变化动态模拟[J].长江流域资源与环境,2016,25(11):1729-1737.
- [13] Bone C, Dragicevic S, White R. Modelling-in-the-middle: bridging the gap between agent-based modelling and multi-objective decision-making for land use change [J]. International Journal of Geographical Information Science,2011,25(5):717-737.
- [14] 郭欢欢,李波,侯鹰,等.元胞自动机和多主体模型在土地利用变化模拟中的应用[J].地理科学进展,2011,30(11):1336-1344.
- [15] 丁美辰,蔡卓.基于ANN-CA的中小城市空间拓展分析:以福建平和县为例[J].沈阳建筑大学学报:社会科学版,2021,23(1):21-27.
- [16] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等.基于MCR-FLUS-Markov模型的区域国土空间格局优化[J].农业机械学报,2021,52(4):159-170,207.
- [17] 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.
- [18] Stewart T J, Janssen R. A multiobjective GIS: based land use planning algorithm[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2014, 46:25-34.
- [19] 董张玉.基于GIS/RS与多目标蚁群算法的三江平原沼泽湿地空间格局优化[D].北京:中国科学院研究生院,2014.
- [20] 许泉立,杨昆,王桂林,等.基于蚁群算法的洱海流域土地利用变化模拟[J].农业工程学报,2014,30(19):290-299,340.
- [21] 龚媛.基于MO-PSO模型的常州市土地利用优化配置研究[D].南京:南京大学,2016.
- [22] 张泊平,吴国玺.人工蜂群算法及其在土地资源优化中的应用研究[J].成都信息工程学院学报,2012,27(6):589-593.
- [23] 耿瑞雪.基于蚁群算法的土地利用空间优化配置研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [24] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [25] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning,2017,168:94-116.