

## 延安市“三生”空间格局模拟与优化研究

尹代皓<sup>1,2</sup>, 赵 忠<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 国家林业和草原局 古树名木保护与繁育工程技术研究中心, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**“三生”空间优化是国土空间开发的重点。以延安市为研究区,利用 Markov-FLUS 模型模拟 2030 年延安市“三生”空间布局,并利用最小累积阻力模型(MCR),以生境质量极重要区以及保护区为生态源地,以农村及城市居民点为建筑源地,以年平均气温、年平均降雨量、GDP、人口密度、距河流距离、距居民点距离、距铁路距离、距公路距离、高程 9 种阻力因子,分别形成阻力面,构建延安市国土空间开发适宜性分区,将“三生”空间布局与分区结果叠加,得到延安市“三生”空间优化分区,根据分区结果提出发展策略。结果表明,1) Markov-FLUS 模型在研究区内模拟结果良好,Kappa 系数为 0.798,总体精度为 92.30%;2)延安市按阻力阈值分为禁止开发区、限制开发区、重点开发区、优化开发区 4 类,其中重点开发区面积最大,禁止开发区面积最小;3)应根据不同空间的实际与发展状况采取不同的管控策略。

**关键词:**“三生”空间;Markov 模型;FLUS 模型;MCR 模型;优化分区

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)02-0133-08

### Simulation and Optimization of "Production-Living-Ecological" Space in Yan'an

YIN Dai-hao<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhong<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Protection and Breeding Engineering Technology Research Center for Old and Valuable Trees, National Forestry and Grassland Administration, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** Optimization of "production-living-ecological" space (PLES) is the key of spatial development of the country. In this paper, we chose Yan'an City as a research area to simulate the distribution of PLES in 2030 by using Markov-FLUS model. Minimal cumulative resistance (MCR) model was used to carry out suitability zoning of land and space development, in which very important ecological environment land and conservation land were considered as the ecological source land, urban and rural residential land as the construction source land, and the resistance surface was built upon 9 resistance indices, including mean annual temperature, mean annual precipitation, GDP, population density, distance to rivers, distance to settlements, distance to railways and distance to roads and DEM. Then, overlying the simulation results and suitability zoning, optimized zones of PLES were obtained, from which the development strategies according to the zoning results were proposed. The results showed that 1) the Markov-FLUS model had good simulation results in the study area with a Kappa coefficient of 0.798 and an overall accuracy of 92.30%. 2) Yan'an City was divided into four categories according to the resistance surface: prohibited development zone, restricted development zone, key development zone, and optimized development zone, of which the key development zone covered the largest area and the prohibited development zone was the smallest. 3) Different control strategies should be adopted according to the actual and development conditions of different spaces.

**Key words:** "production-living-ecological" space; Markov model; FLUS model; MCR model; optimized zoning

收稿日期:2023-02-21 修回日期:2023-04-28

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2017YFC0504605)。

第一作者:尹代皓。研究方向:土地利用转变。E-mail: daihaoy@nwsfu.edu.cn

\* 通信作者:赵 忠,教授,博士生导师。研究方向:森林培育理论与技术。E-mail: zhaozh@nwfufu.edu.cn

国土空间是人类生存发展的必要资源,随着城市化发展加快,国土空间格局发生剧烈变化,社会问题层出不穷。2021 年中央提出,要统筹布局生态、农业、城镇等功能空间,科学划定各类空间管控边界,严格实行土地用途管制<sup>[1]</sup>。“三生”空间即生产、生活、生态空间是国土空间的研究范式,识别“三生”空间分布,优化“三生”空间合理结构,有利于实现国土空间效益最大化,促进区域协调发展。

近年来大量学者对“三生”空间进行了深入研究。研究范围包括“三生”空间识别<sup>[2]</sup>、“三生”空间模拟预测<sup>[3]</sup>以及“三生”空间优化<sup>[4]</sup>等多个方面。在“三生”空间识别中,主要分为土地类型划分和指标量化测算法<sup>[5]</sup>,前者是对土地利用类型的重分类<sup>[6]</sup>,后者是量化区域内各“三生”空间功能而后分类<sup>[2]</sup>。在“三生”空间模拟预测中分为数量预测及分布格局预测,数量预测的方法包括遗传算法<sup>[7-8]</sup>、多目标规划(MOP)模型<sup>[9-10]</sup>、系统动力学(SD)模型<sup>[11-12]</sup>以及马尔可夫(Markov)模型<sup>[13-14]</sup>等,其中,Markov 模型所具备的“无后效性”使其更为研究者青睐;分布格局预测的方法包括元胞自动机(CA)模型<sup>[15-16]</sup>、未来土地利用模拟(FLUS)模型<sup>[17-18]</sup>等,部分学者将两者数量预测模型和空间分布预测模型结合以减小模型自身局限<sup>[19]</sup>。在“三生”空间优化方面,以空间分区优化对策法为主,即利用一定方法评估土地资源承载力后结合区域自身特点,提出空间分区并提供相应的管控对策<sup>[20]</sup>。金贵<sup>[21]</sup>从“三生”空间功能角度出发,以武汉城市圈为例优化空间区域配置;司慧娟<sup>[22]</sup>以青海省为研究区基于土地适宜性评价划分国土空间功能区,并提出管制策略。

通过梳理上述研究可以看出,关于“三生”空间优化格局研究的理论十分丰富,但其相关应用,较为单一,仅仅通过某一理论或方法指导实际,应用较为困难。最小累积阻力(minimal cumulative resistance, MCR)模型<sup>[23-24]</sup>是当前生态保护领域的热点模型,利用其划分研究区的国土空间适宜性分区,并耦合 Markov-FLUS 模型“三生”空间布局模拟,以此实现国土空间优化开发,更为贴合实际,符合国家推进生态文明建设的远景目标背景,有利于区域内生态保护与经济发展相协调。

延安市位于黄土高原腹地,是我国水土流失最为严重的地区之一,生态环境敏感脆弱;同时也是国家晋陕蒙能源战略后备基地的重要组成部分,是陕西省重要的经济增长区。但随着我国西部大开发格局的逐步推进,对于生活空间的需求日益增长,国土空间开发问题日益尖锐。基于此,本研究从优化国土空间布局出发,以延安市为研究区,充分考虑“三

生”空间格局发展演变和时效性,参考相关文献<sup>[17]</sup>,利用 Markov-FLUS 模型模拟 2030 年延安市“三生”空间数量及分布,耦合 MCR 模型分区结果,进而对模拟结果进一步优化配置,实现国土空间合理利用。以期为延安市实现陕西“十四五”规划中“构建国土空间开发保护新格局”目标提供依据。

## 1 研究区与数据来源

### 1.1 研究区概况

延安市(35°21′—37°31′N, 107°41′—110°31′E)位于黄土高原腹地,陕北南部,属黄土丘陵沟壑区地貌,地势西北高东南低。属半湿润半干旱大陆性季风气候,四季分明,多年平均降水量 562.1 mm, 7—9 月降雨集中,年均温 7.7~10.6℃。植被类型为暖温带落叶阔叶林,树种资源丰富。延安市辖 1 区 12 县、国土面积为 37 037 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源与处理

研究数据包括延安市 2000、2010、2020 年的土地利用数据、年平均气温、年均降雨量、GDP、人口数据,河流、居民点、铁路、公路数据,高程和坡度数据。其中土地利用数据来源于全国地理信息资源目录服务系统的 Globeland30 数据集,分辨率 30 m,年平均气温、年平均降雨量、GDP、人口数据均来自于中国科学院资源环境科学与数据中心,空间分辨率为 1 km。河流、居民点、铁路、公路数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(2020 年),高程和坡度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,空间分辨率为 30 m。将以上数据在 ArcGIS10.8 中将其栅格重采样至 30 m×30 m,统一行列号与坐标系。

## 2 研究方法

### 2.1 “三生”空间模拟预测

2.1.1 “三生”空间识别与面积预测 借鉴已有研究成果<sup>[25]</sup>与研究区实际的土地利用类型(林地、草地、灌木地、湿地、水体、裸地、人造地表、耕地),构建出适宜研究区的“三生”空间分类体系(表 1)。

利用 Markov 模型预测自然发展情景下 2030 年延安“三生”空间面积变化,其表达式<sup>[26]</sup>为

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \quad (1)$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P_{ij} \in [0, 1] \text{ 且 } \sum_{n=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中: $S_t$ 、 $S_{t+1}$  分别为  $t$ 、 $t+1$  时刻的土地利用状态;

表 1 延安市“三生”空间分类体系

Table 1 The classification system of “production-living-ecological” space in Yan'an City

国土空间	功能	用地编码及类型	土地利用类型
生态空间	生态调节	03 林地、04 草地、11 水域及水利设施用地	20 林地、30 草地、40 灌木地、50 湿地、60 水体、90 裸地
	生态容纳	12 其他土地	
生活空间	工商生产、物资储备	05 商服用地、06 工矿仓储用地	80 人造地表
	城镇建成区、农村生活区	07 住宅用地	
	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	10 耕地

$P_{ij}$  为状态转移矩阵; $n$  为“三生”空间类型,栅格大小均为  $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

2.1.2 精度验证及“三生”空间分布模拟 FLUS 模型是基于传统元胞自动机(CA)模型的改良模型,其原理是人工神经网络算法,通过研究区已有的土地利用数据及驱动因子计算各类用地转化的适宜性概率,利用所得适宜性概率文件,结合模型的自适应惯性竞争机制包括领域影响因子,惯性系数和转换成本,最终利用轮盘赌选择机制得到模拟结果。本研究利用延安市 2000、2010 年 2 期土地利用数据,运用 Markov-FLUS 模型模拟出延安市 2020 年“三生”变化情况,利用 FLUS 模型 Validation 板块,将模拟结果与 2020 年实际值进行比较(采样率为 0.05),计算总体精度和 Kappa 系数。在已有研究<sup>[27]</sup>的基础上,对研究区内各参数反复调试,确定转移成本矩阵均可相互转换,设置随机斑块种子概率为 0.01,生产空间、生态空间和生活空间的邻域因子参数设定为 1,0.6,0.1(参数范围 0~1,越接近 1 表示景观类型的扩张能力越强)。参数保持不变,利用 FLUS 模型模拟 2030 年延安“三生”空间分布。并参考相关文献<sup>[28]</sup>,将 2010 年到 2020 年未发生转变的耕地设为基本农田,设为生产空间限制区,将延安市内的自然保护区及森林公园等生态源地设为生态保护限制区。

2.1.3 土地利用变化驱动因子的选取 “三生”空间变化是多种因素作用的结果,本研究根据 FLUS 模型计算原理,结合延安“三生”空间的实际情况,根据数据来源的可获取性,并综合相关研究<sup>[29]</sup>,选取 9 项土地利用变化驱动因子,包括年平均降水量、年平均温度、距公路距离、GDP、人口密度、距铁路距离、距水体距离、距居民点距离、高程。

2.2 国土空间开发适宜性分区

2.2.1 最小累计阻力(MCR)模型 MCR 模型即由源地到达目标所在地需要克服的阻力最小值,计算式<sup>[27]</sup>为

$$C_M = f \sum D_{mn} R_m \tag{4}$$

式中: $C_M$  是最小累计阻力值; $f$  代表最小累计阻力和其到源地的负相关关系; $D_{mn}$  为源地  $n$  到达  $m$  的距离; $R_m$  表示穿越  $m$  的阻力系数。

2.2.2 目标源的确定 本研究选取城镇和农村居民点作为建设扩张源。根据《陕西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》内容,延安地区子长、安塞、志丹和吴起县属于国家重点生态功能区,参考相关文献<sup>[30]</sup>并结合实际情况,利用 Invest 模型的 Habitat Quality 板块计算 4 域生境质量,利用自然段点法将其重分类为一般重要、重要、极重要 3 类,选取其中极重要地区作为生态源地,并添加延安市的自然保护区、国家森林公园等,最终形成生态源地。

2.2.3 阻力面的建立 结合延安地区生态现状和社会经济发展水平,选取高程、距公路距离和距居民点距离等 9 个阻力因子,结合研究区具体情况确定各因子的等级、取值及权重<sup>[27]</sup>,如表 2 所示。

采用 MCR 模型构建 2 类源地扩张过程中的最小累计阻力面。借助 Cost Distance 分析功能依次计算生态和建设源地的最小累计阻力面,记为  $M_{CRst}$  和  $M_{RCjs}$ 。

再对两者作差,并通过栅格表面差值确定阈值划分适宜性分区,公式为

$$M_{CRc} = M_{CRst} - M_{RCjs} \tag{5}$$

式中: $M_{CRc}$  为生态源与建设源最小累计阻力差值; $M_{CRc} < 0$  时,代表当前区域内,生态用地更容易向四周扩张,适宜生态保护; $M_{CRc} > 0$  时,代表当前区域内,建设用地更容易扩张,适宜开发建设。

2.3 国土空间优化

土地适宜性评价是基于两源地最小累计阻力的差值进行的,通过对差值划分等级<sup>[31]</sup>,从小到大分别对应禁止开发区、限制开发区、重点开发区、优化开发区。利用 ArcGIS 的空间分析,叠加分区结果与模拟预测结果,根据未来发展状况与适宜情况优

表 2 生态源和建设源各阻力因子分级及其权重

Table 2 Classification of resistance factors and their weights for ecological sources and construction sources

阻力因子	阻力因子分级					权重
生态源	1	2	3	4	5	
建设源	5	4	3	2	1	
年平均降水量/mm	<396.7	396.7~423.7	423.7~453.1	453.1~490.8	>490.8	0.078 7
年平均温度/℃	<9	9~9.9	9.9~10.8	10.8~11.8	>11.8	0.055 7
距公路距离/km	<1.2	1.2~2.6	2.6~4.2	4.2~6.4	>6.4	0.103 7
经济密度 GDP/(万元·km <sup>-2</sup> )	<215	215~518	518~788	788~1 069	>1 069	0.222 3
人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	<48.7	48.7~88.0	88.0~133.9	133.9~224.1	>224.1	0.111 0
距铁路距离/km	<13.2	13.2~28.8	28.8~47.3	47.3~69.7	>69.7	0.065 3
距水体距离/km	<0.8	0.8~1.7	1.7~2.7	2.7~4	>4	0.132 7
距居民点距离/km	<3.1	3.1~5.25	5.25~7.47	7.47~10.5	>10.5	0.164 3
高程 DEM/m	<919	919~1113	1 113~1 274	1 274~1 441	>1 441	0.066 3

化复合分区。

禁止开发区的最小累计阻力差值最小,建设阻力最大,为生态源集聚区,应将此区域内全部划为生态空间以保证延安地区的生态安全。限制开发区的建设阻力较禁止开发区阻力更小,但考虑到延安市的城镇发展规划,以生产生态空间为主。重点开发区建设阻力较小,可适当进行建设,但由于延安地区的生态环境保护战略,也不可盲目地开发建设,以生

产空间为主较为适宜。适宜开发区建设阻力最小,最为适宜开发建设,应以生活空间为主。

## 2.4 Markov-FLUS-MCR 模型配置

本研究利用 Markov-FLUS-MCR 模型优化延安市“三生”空间布局,框架如图 1 所示。利用 Markov-FLUS 模型拟合延安市 2030 年“三生”空间,并耦合 MCR 模型约束国土空间开发,得到复合分区,对不同分区实行不同策略。

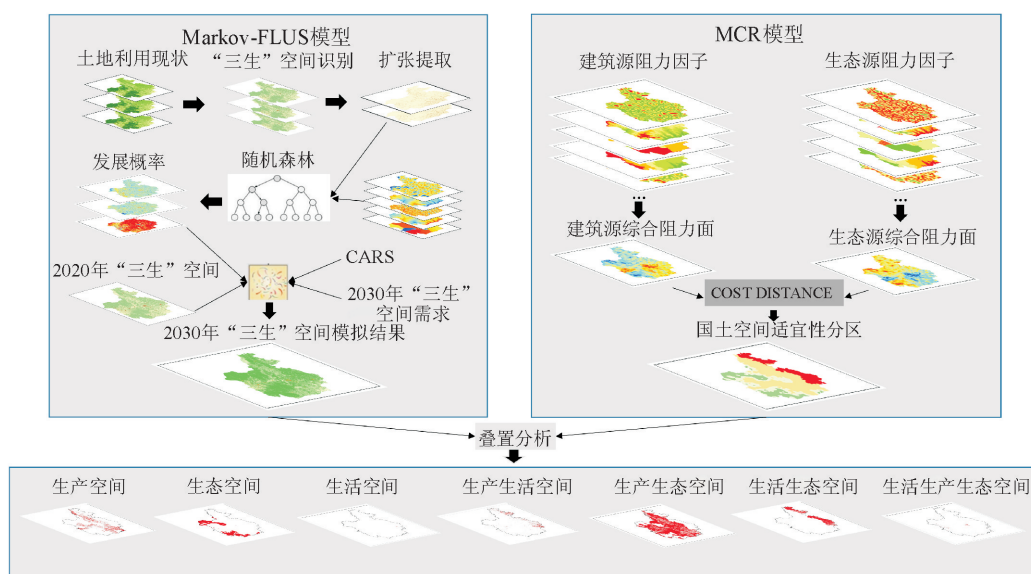


图 1 Markov-FLUS-MCR 模型配置

Fig. 1 Configuration model of Markov-FLUS-MCR

## 3 结果与分析

### 3.1 “三生”空间模拟

识别延安市 2010 年和 2020 年的“三生”空间(表 3、图 2),延安市主要以生态空间为主,生产空间次之,生活空间最少。生态空间主要集中在西南及东南地区,生活与生产空间主要位于地势平坦地区附近。为验证 FLUS 模型的模拟精度,以 2010 年现状模拟 2020 年的空间分布,模拟结果与实际

2020 年“三生”空间 2 期对比,其 Kappa 系数为 0.798,总体精度为 92.30%,模拟结果较为良好,可以用于预测延安市 2030 年“三生”空间分布格局。

模拟结果表明,从数量上看,2030 年延安市生活空间呈上升趋势,增长面积达 118.53 km<sup>2</sup>,生产空间与生态空间小幅下降,减少面积分别为 34.29 km<sup>2</sup> 和 84 km<sup>2</sup>。这与“十四五”期间陕西省对延安市的城市化发展规划相吻合。从空间分布上看,延安市的生产空间主要分布在洛川、延川、延长和吴



起;生活空间主要集中在宝塔区、子长等人口密集区域,其他在各县域中心及周边分布;生态空间分布范围较广,各县均有,其中黄龙、黄陵两县面积最大。

3.2 延安市国土空间开发适宜性分区

3.2.1 累计阻力面 根据表 2 中分级情况对生态源阻力因子以及建设源因子重分类,利用栅格计算器加权求和划分成等级,获得生态源综合阻力因子等级图(图 3)与建设源阻力因子等级图(图 4)。由图 3 可知,延安市生态源阻力因子具有明显的区域差异性,东南与西部地区生态阻力较小,西北部与南

方中部地区生态阻力较大;整体而言,延安地区建筑阻力较低,有利于城镇化建设,高值集中于南部及西部地区。

表 3 延安市“三生”空间面积(2010—2030)

Table 3 The “production-living-ecological” space area statistics of Yanan City from 2010 to 2030 km<sup>2</sup>

年份	生产空间	生态空间	生活空间
2010	9 040.84	27 762.20	229.96
2020	8 977.97	27 677.04	377.99
20230	8 943.67	27 592.80	496.52

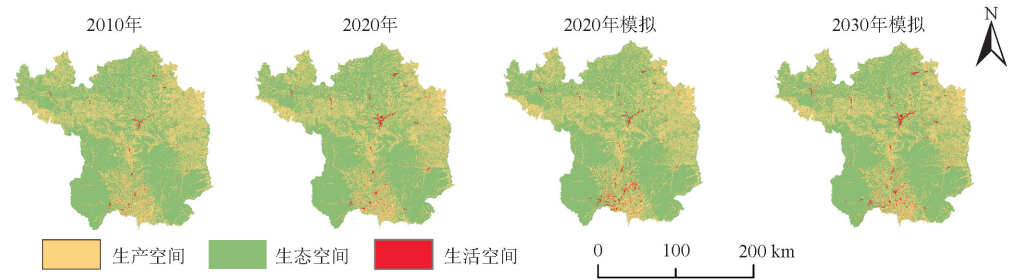


图 2 2010—2030“三生”空间分布

Fig. 2 Distribution of the“production-living-ecological” space from 2010 to 2030

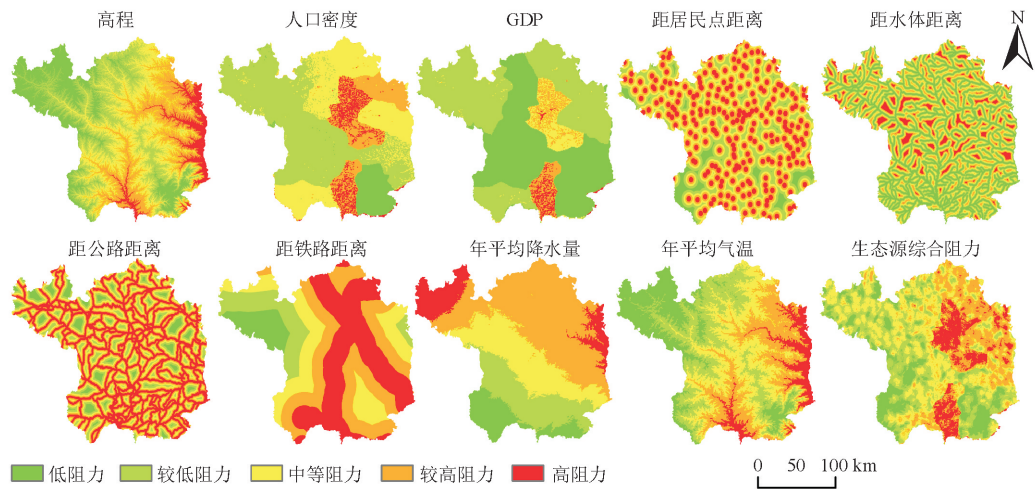


图 3 生态源阻力因子等级图及生态源综合阻力

Fig. 3 Ecological source resistance factor ranking chart and ecological source integrated resistance

3.2.2 国土开发适宜性分区 以最小累计阻力面差值计算结果为依据,将延安市国土空间适宜性分为 4 类,即禁止开发区、限制开发区、重点开发区、优化开发区。各分区差值及面积统计见表 4。

由图 5 和表 4 可知,生态保护禁止开发区面积为 5 893 km<sup>2</sup>,占 15.9%,分布在生态源及周围,主要位于延安市的南部;限制开发区面积为 8 125 km<sup>2</sup>,占整个研究区的 21.9%,该区围绕生态保护区分布,集中在延安市西部和南部;重点开发区面积为 16 999 km<sup>2</sup>,规模最大,占延安市总面积的 45.9%,分布在延安市的中部和东部;优化开发区占延安市

总面积的 16.3%,分布在延安市的北部。

禁止开发区,建设阻力最高,分布着国家森林公园、自然保护区等生态保护核心地带,以保护生态安全为主,禁止开发建设项目。限制开发区,其阻力有正有负,对于生态保护和建筑开发的适应性都比较高,基于延安市的城市化发展以及生态保护两者综合考虑,以生产生态为主。重点开发区以生产空间为主,由园地、耕地组成。优化开发区以生活空间为主,其建设阻力最低,是今后生活空间扩张的主要部分。

3.3 复合分区与管控对策

采用 ArcGIS 软件内的叠加分析工具,在模拟

2030 年“三生”空间上叠加国土空间适宜性分区结果,对延安市进行“三生”空间优化复合分区,结果如图 6 所示,并参考有关研究<sup>[32]</sup>,制定适宜发展对策。

1)生产空间:面积为 5 154.16 km<sup>2</sup>,主要分布在延安市内中北部,南部的洛川和富县也有较大区域,在此区域内,严禁其他人类活动侵占基本农田,为了提高耕地和园地的生产功能,应进一步优化其空间分布,整治土地,提升有效耕地面积,构建现代化农业生产体系,改善基本设施,提高生产效率。此

地区应充分利用现代化技术手段提高产能。

表 4 延安市国土空间开发适宜性分区及阻力差值区间

生态适宜性分区	阻力差值区间	面积/km <sup>2</sup>	比例(%)
禁止开发区	-93 554.078~-7 546.733	5 892.994	15.9
限制开发区	-7 546.733~27 483.979	8 124.625	21.9
重点开发区	27 483.979~141 291.518	16 999.31	45.90
优化开发区	141 291.518~275 766.188	6 016.076	16.3

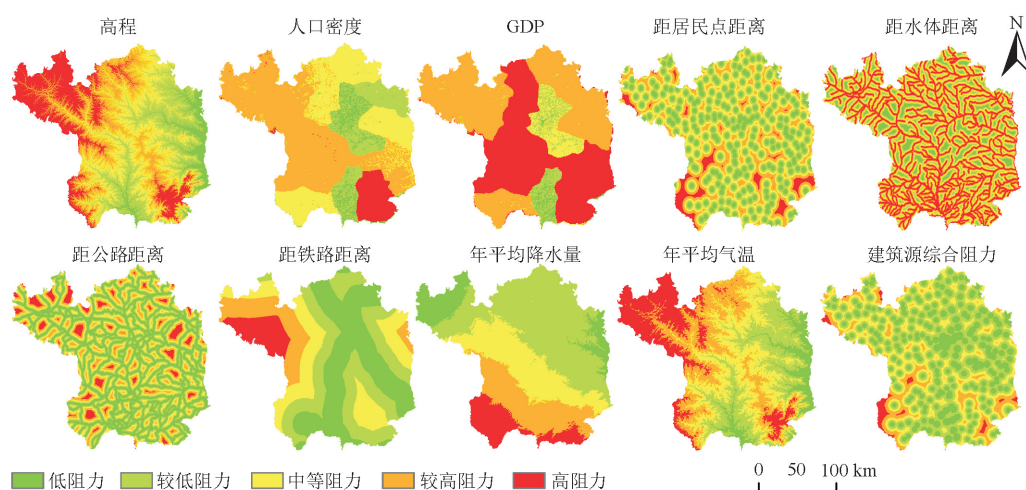


图 4 建筑源阻力因子等级图及建筑源综合阻力

Fig. 4 Building source resistance factor rating chart and building source integrated resistance

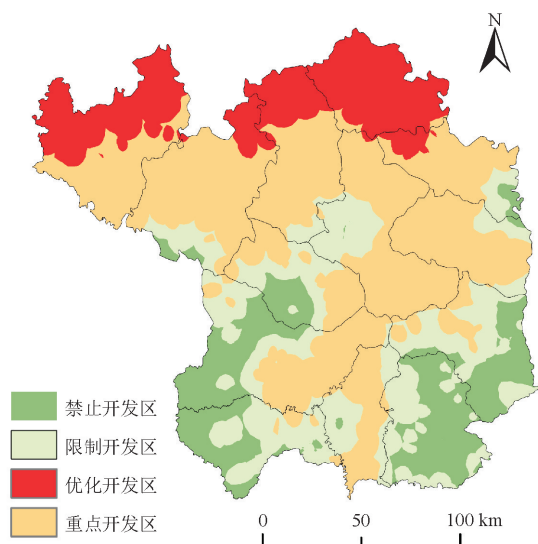


图 5 延安市国土空间开发适宜性分区空间布局

Fig. 5 Spatial layout of spatial development suitability zoning in Yan'an City

2)生态空间:面积为 5 892.33 km<sup>2</sup>,主要分布于延安南部的黄龙、黄陵及宜川,包括自然保护区、森林公园、湿地公园等生态功能较高区域。在此区域内应禁止开发建设项目,并根据实际情况采取保护措施,以充分发挥其生态价值。

3)生活空间:面积仅 37.39 km<sup>2</sup>,主要集中在延

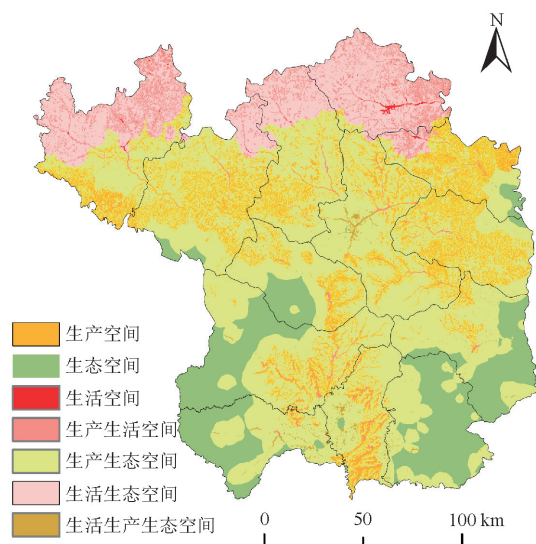


图 6 2030 年优化分区结果

Fig. 6 Optimized zoning results in 2030

安北部,其余地域零星分布。该区域内,应提升人口聚集水平,进一步吸引人口聚集,优化区域结构,并提高居住区生活质量,根据需求新建道路、提高植被覆盖度,修缮公共设施。

4)生产生活空间:面积为 1 667.5 km<sup>2</sup>,主要集中在延安市的北部地区,包括子长、吴起等县。对于

此类空间应集中开展综合整治,减少居住条件不良的生活空间比例,与此同时开展生活空间集中开发,综合治理,保证耕地总量平衡。

5)生产生态空间:面积为19 528.46 km<sup>2</sup>,面积最广,集中在研究区的中部及南部地区。该区域内应以充分发挥其生态功能为主,再适当开发利用。调整相关产业,发展林下经济等,促进生态保护与生产开发协调发展。

6)生活生态空间:面积为4 545.46 km<sup>2</sup>,集中在研究区的北部。由于北部生态环境的脆弱性,应尽量提高生态空间的比例,在满足生态空间需求后,扩张生活空间,并强化基础设施建设,合理规划布局,提高区域土地利用效率。

7)生活生产生态空间:面积为207.70 km<sup>2</sup>,面积最小,集中在延安市的中部,主要是安塞区,黄陵、洛川等地也有少量分布。该区域内地理位置优越,应在保障生态空间供给的前提下,充分发挥优势,因地制宜,成为延安城镇化建设进程的标杆。加强基础设施,提高生活生产质量,促进区域环境协调发展。

## 4 讨论

随着西部大开发战略的持续进行,延安市城镇化水平显著提升,不可避免地造成区域内生活空间挤压生产空间及生态空间,这与已有研究结果<sup>[33]</sup>保持一致。在“三生”空间模拟过程中,各种驱动因子的选择以及后续参数的设置会对模拟结果产生重要影响,因此需要科学合理选取因子及调整参数。本研究基于数据的合理性及可获取性选择9种驱动因子,未考虑政策及地质变化等影响,参数设置存在一定主观性,精度仍有待提高。

本研究基于最小累积模型构建“三生”空间优化体系,其景观阻力类型赋值及权重会对后续规划分区结果产生重要影响<sup>[34]</sup>,需要科学确定各参数。参考前人相关研究进行赋值,使用层次分析法确定各阻力因子权重,仍需更为全面的数据以减少分区结果的局限性。

在进行分区优化的过程中仅考虑自然发展情景,后续可根据实际需要构建“粮食安全”“城镇发展”“生态优先”等不同情景,以充分满足地区发展不同诉求,并展开定期评估,充分实现国土空间的有效利用。

## 5 结论

本研究从“三生”空间视角出发,利用Markov-FLUS模型模拟2030年延安市“三生”空间,利用MCR模型划分国土空间,两者叠加,优化延安市“三生”空间布局,在此基础上针对各类空间提出对应发

展策略。

在选取自然条件、经济条件和可达性条件3种,共9个驱动因子后,利用Markov-FLUS模型对于延安市的“三生”空间进行模拟,模拟结果Kappa系数为0.798,总体精度为92.3%,表明该模型在研究区内具有适应性。根据模拟结果显示,在2030年,生产空间和生态空间因生活空间的扩张而减少。生产空间主要分布在洛川、延川、宜川吴起、志丹、子长、安塞和宝塔区。生活空间主要分布在宝塔区、洛川、子长等人口较密集区域。生态空间面积较广,全域均有覆盖。

选用城镇与农村居民点作为建设源地,利用保护区等作为生态源地,选取9个阻力因子,利用最小累积阻力模型进行土地适宜性评价,将延安市按阻力阈值分为禁止开发区、限制开发区、重点开发区、优化开发区4类,其中重点开发区面积最大,禁止开发区面积最小。

利用GIS的空间叠加功能,优化“三生”空间,既考虑未来“三生”空间的变化,又充分的结合实际,针对不同复合空间采取不同管控措施,最大限度地利用国土空间资源。

## 参考文献:

- [1] 罗莎莎,赖庆标,林彬,等. “三生”空间视角下东南丘陵地区土地利用冲突识别[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 148-156.  
LUO S S, LAI Q B, LIN B, *et al.* Land use conflict identification in southeast hilly area from perspective of “production-living-ecological” space[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 148-156. (in Chinese)
- [2] 韩株桃,石杰锋,吴金华,等. 基于POI数据及四叉树思想的“三生空间”识别方法[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1107-1119.  
HAN Z T, SHI J F, WU J H, *et al.* Recognition method of “the production, living and ecological space” based on POI data and quad-tree idea[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(6): 1107-1119. (in Chinese)
- [3] 苏迎庆,刘庚,赵景波,等. 基于FLUS模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1152-61.  
SU Y Q, LIU G, ZHAO J B, *et al.* Multi-scenario simulation prediction of ecological space in the Fenhe River Basin using the FLUS model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1152-1161. (in Chinese)
- [4] 付晶莹,邵强,江东,等. 黑土保护与粮食安全背景下齐齐哈尔市国土空间优化调控路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1662-80.  
FU J Y, GAO Q, JIANG D, *et al.* Optimal regulation of spatial planning in the context of black soil preservation and food security in Qiqihar[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1662-1680. (in Chinese)
- [5] 冀正欣,刘超,许月卿,等. 基于土地利用功能测度的“三生”空间识别与优化调控[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 222-231.



- [6] 冀正欣,许月卿,黄安,等.冀北山区“三生”空间识别与演化特征分析——以张家口市为例[J].北京大学学报:自然科学版,2022,58(1):123-34.
- J I Z X,XU Y Q,HUANG A,*et al.* Spatial pattern and evolution characteristics of the production-living-ecological space in the mountainous area of northern Hebei Province:a case study of Zhangjiakou city[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,2022,58(1):123-134. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] CLARKE K C. Land use change modeling with SLEUTH:improving calibration with a genetic algorithm[J]. *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*,2018:139-61.
- [9] 刘欣,赵艳霞,冯晓森,等.基于 CLUE-S 模型的多目标土地利用格局模拟与优化——以河北省廊坊市北三县为例[J].地理与地理信息科学,2018,34(5):92-98.
- [10] WANG Y,LI X,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.
- [11] 田贺,梁迅,黎夏,等.基于 SD 模型的中国 2010—2050 年土地利用变化情景模拟[J].热带地理,2017,37(4):547-561.
- [12] JIN G,CHEN K,WANG P,*et al.* Trade-offs in land-use competition and sustainable land development in the North China plain[J]. *Technological Forecasting and Social Change*,2019,141:36-46.
- [13] 刘家福,王平,李京,等.基于 Markov 模型的长岭县土地利用时空变化研究[J].水土保持研究,2009,16(3):16-19.
- [14] MUNTHALI M G,MUSTAK S,ADEOLA A,*et al.* Modeling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid cellular automata and markov model[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*,2020,17.
- [15] 席梅竹,赵中秋,吴攀升,等.基于改进 CA-Markov 模型的滦河流域山区段土地利用变化模拟及预测[J].西北林学院学报,2021,36(4):150-158.
- XI M Z,ZHAO Z Q,WU P S,*et al.* Changes and predictions of land use in mountain section of the Hutuo River basin based on improved CA-Markov model[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2021,36(4):150-158. (in Chinese)
- [16] HAMAD R,BALZTER H,KOLO K. Predicting land Use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios[J]. *Sustainability*,2018,10(10):3421.
- [17] 陈新云,王甜,李宝健.北京市西北部生态涵养区未来土地利用及生态系统服务变化情景模拟[J].西北林学院学报,2021,36(1):86-95.
- CHEN X Y,WANG T,LI B J. Simulation of the future land use and ecosystem services in the ecological conservation area in northwestern Beijing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2021,36(1):86-95. (in Chinese)
- [18] LIANG X,LIU X,LI X,*et al.* Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method[J]. *Landscape and Urban Planning*,2018,177:47-63.
- [19] REN Y,LÜ Y,COMBER A,*et al.* Spatially explicit simulation of land use/land cover changes:current coverage and future prospects[J]. *Earth-Science Reviews*,2019,190:398-415.
- [20] 黄安,许月卿,卢龙辉,等.“生产-生活-生态”空间识别与优化研究进展[J].地理科学进展,2020,39(3):503-518.
- [21] 金贵.国土空间综合功能分区研究——以武汉城市圈为例[D].北京:中国地质大学,2014.
- [22] 司慧娟.青海省国土空间综合功能分区与管制研究[D].北京:中国地质大学,2018.
- [23] 杨天荣,匡文慧,刘卫东,等.基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局[J].地理研究,2017,36(3):441-452.
- [24] DAI L,LIU Y,LUO X. Integrating the MCR and DOI models to construct an ecological security network for the urban agglomeration around Poyang Lake, China[J]. *Sci. Total Environ*,2021,754:141868. (in Chinese)
- [25] 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.
- [26] 罗双晓,何政伟,高笋,等.基于 CA\_Markov 模型的天府新区土地时空变化预测[J].水土保持研究,2018,25(3):157-163.
- [27] 李红润,刘慧芳,王瑾,等.基于 Markov-FLUS-MCR 模型的晋中市“三生”空间优化[J].农业工程学报,2022,38(10):267-276.
- [28] 于成龙,刘丹,冯锐,等.基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J].生态学报,2021,41(1):290-301.
- YU C L,LIU D,FENG R,*et al.* Construction of ecological security pattern in Northeast China based on MCR model[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2021,41(1):290-301. (in Chinese)
- [29] 谢凌凌,许进龙,臧俊梅,等.基于 Markov-FLUS 模型的广西土地利用变化模拟预测[J].水土保持研究,2022,29(2):249-254,264.
- [30] 汉瑞英,赵志平,肖能文,等.高晓奇.基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2022,42(3):95-102.
- [31] 刘孝富,舒俭民,张林波.最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例[J].生态学报,2010,30(2):421-428.
- LIU X F,SHU J M,ZHANG L B. Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment;as an example of Xiamen city[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2010,30(2):421-428. (in Chinese)
- [32] 刘煦,黄明华,雷文韬.陕北黄土高原生态脆弱区土地利用时空演变[J/OL].中国农业资源与区划:1-15[2023-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20220920.1134.010.html>.
- [33] 孙善良,张小平,张志斌.陕西省 2000—2018 年土地利用时空演变及驱动因素[J].水土保持通报,2021,41(4):339-349,369.
- [34] 代继平,朱坤,周天宇,等.基于 MSPA 和 MCR 模型的曲靖中心城市生态网络优化研究[J].西北林学院学报,2022,37(6):250-257.
- DAI J P,ZHU K,ZHOU T Y,*et al.* Optimization study of Qujing central city ecological network based on MSPA and MCR models[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2022,37(6):250-257. (in Chinese)