

基于 Markov-FLUS-MCR 模型的晋中市“三生”空间优化

李红润, 刘慧芳^{*}, 王 瑾, 郭永龙

(山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

摘 要:“三生”空间优化是落实各级国土空间规划和引导土地合理开发保护的重要基础。该研究利用 Markov-FLUS 模型模拟预测 2025 年晋中市“三生”空间, 选取最小累计阻力 (Minimum Cumulative Resistance, MCR) 模型评价国土空间开发适宜性, 在空间上叠加分析模拟预测结果与开发适宜性评价结果, 对晋中市进行“三生”空间优化。结果表明: 1) 从模拟预测结果来看, Markov-FLUS 模型模拟 2018 年晋中市“三生”空间变化, 与实际数据对比精度达到 97.17%, 模型具有适用性。2025 年晋中市生产与生活空间均呈增长态势, 其中生产空间涨幅较大, 增长面积达 813.53 km², 生态空间面积减少 892.65 km²。2) 从开发适宜性来看, MCR 模型将晋中市国土空间分为 5 种类型: 生态保护区、生态优化区、限制开发区、优化开发区和适宜开发区。生态优化区面积最大为 4 994 km², 占整个研究区的 30.59%, 适宜开发区面积最小为 1 546 km²。3) “三生”空间优化后, 晋中市划分为生产空间、生态空间、生活空间、生产-生活空间、生产-生态空间、生活-生态空间和生态-生活-生态空间 7 种类型, 表现出“整体集聚, 局部零散”的空间分布特征, 其中生态空间面积占比最大, 为 41.20%。研究结果有助于促进“三生”空间优化理论与方法的深入研究, 也可对晋中市国土空间合理开发保护提供参考。

关键词: 土地利用; 优化; 分区; Markov-FLUS-MCR 模型; “三生”空间

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.032

中图分类号: F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0267-10

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.032 http://www.tcsae.org

Li Hongrun, Liu Huifang, Wang Jin, et al. Optimization of production-living-ecological space based on Markov-FLUS-MCR model in Jinzhong, Shanxi of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 267-276. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.032 http://www.tcsae.org

0 引 言

国土空间是社会发展和人类经济的载体, 而随着城镇化和工业化的高速发展, 国土空间格局发生剧烈变化, 出现一系列可持续发展问题。2019 年 5 月, 《中共中央、国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》指出“到 2035 年, 全面提升国土空间治理体系和治理能力现代化水平, 基本形成生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀、安全和谐、富有竞争力和可持续发展的国土空间格局”^[1], 其中生态、生产和生活空间是国土空间的一种综合性分区方式, 而分区是优化配置国土空间的中心内容与关键基础^[2], 因此“三生”空间优化成为当前学术研究热点和国土空间规划亟待解决的现实问题。

近年来国内外学者对“三生”空间进行了大量研究, 从“三生”空间识别来看, 目前常用的方法有归并分类法和量化测算法^[3], 前者的本质是依据土地利用主导功能, 将各类用地归并为对应的空间类型^[4], 后者依靠建立评价指标体系实现对“三生”的量化识别^[5]。从划分模式来看, 包括单一空间和复合空间两种类型, 部分学者仅

考虑土地主导功能划分出生活、生态、生产空间三类单一空间, 也有学者考虑多功能利用空间的需求, 划分出生态生产、生产生活和生产生活生态等复合空间^[6]。从模拟预测方法来看, 可分为数量预测法和空间分布预测法 2 种。在最初的模拟预测研究中主要以数量预测为主, 具体包括灰色预测法、回归分析预测法和马尔科夫 (Markov) 模型, 其中, Markov 模型“无后效性”的特点使其近年来被广泛应用到土地利用变化模拟中^[7]。空间分布预测法主要包括 CLUE 模型、CA 模型和 FLUS 模型^[8-9]。数量与空间分布预测法均存在一定的局限性, 部分学者将两者进行了结合。从“三生”空间优化来看, 存在基于“多规合一”的优化和基于适宜性评价的优化两种主要类型^[10], 大部分学者认为基于适宜性评价的优化更具科学性^[11]。丰富的理论和实践成果体现出学术界对“三生”空间优化问题的高度关注, 也为本研究提供了大量的理论指导。

目前各数量与空间预测方法虽在土地利用结构及空间布局优化问题中使用比较广泛, 但应用于“三生”空间模拟优化的研究较少^[8]。同时在对国土空间开发适宜性进行评价时多以综合指标体系法为主, 鲜少有利用最小累计阻力 (Minimum Cumulative Resistance, MCR) 模型研究国土空间适宜性评价问题, 此评价模型可将生态安全融入“三生”空间优化中。另外, 优化研究多局限于现状情况, 对未来“三生”空间变化的考虑略有不足, 很少结合模拟预测与适宜性评价, 而“三生”空间优化

收稿日期: 2022-04-02 修订日期: 2022-05-15

基金项目: 山西省软科学一般项目 (2018041069-3)

作者简介: 李红润, 研究方向为土地资源管理。Email: 756698548@qq.com

※通信作者: 刘慧芳, 副教授, 研究方向为土地可持续利用。

Email: liuhuifang0354@sxau.edu.cn

是一个既需要考虑前瞻性,又需要兼顾科学性的过程。

综上,本研究首先采用类型归并法对“三生”空间现状进行识别,其次利用 Markov-FLUS 模型模拟预测 2025 年晋中市“三生”空间,然后采用 MCR 模型评价国土空间开发适宜性,最后在空间上叠加分析模拟预测结果与开发适宜性评价结果,采用复合分区并提出管控对策的方式对国土空间进行“三生”空间优化。Markov-FLUS-MCR 耦合模型的优点在于其同时发挥了 Markov-FLUS 和 MCR 模型的作用,既可模拟“三生”空间需求数量,又能以较高精度模拟“三生”的空间变化,还可基于生态过程评价国土空间适宜性。在“三生”空间优化中,一方面融入生态安全,另一方面充分考虑“三生”随时间变化过程中,数量规模和空间分布的演变。该研究不仅有助于完善“三生”空间优化理论,同时可为晋中市国土空间开发利用和规划布局提供科学依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

晋中市地处山西省中部,位于黄土高原东部边缘,东靠太行山,西接汾河,南与长治市、临汾市毗邻,北与省会太原市相接,东北与阳泉市相连,西南与吕梁市邻接(图 1)。地形东南高西北低,由山区至平原呈阶梯状倾斜,中低山区、黄土丘陵区、冲积平原区相间分布。晋中市位于 $111^{\circ}25' \sim 114^{\circ}05'E$, $36^{\circ}40' \sim 38^{\circ}06'N$ 之间,全市共辖 8 个县、2 个市辖区和 1 个县级市,国土总面积为 $1.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。属暖温带大陆性半干旱季风气候,四季分明,年平均气温 9.1°C ,年降水量为 $466 \sim 532 \text{ mm}$,降水量自东向西递减。

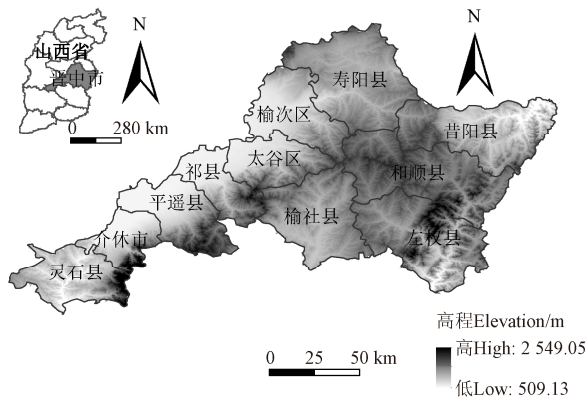


图 1 研究区地理区位图
Fig.1 Location of study area

1.2 数据来源与处理

研究数据包括晋中市 2014 与 2018 年的土地利用、高程、坡度数据,生态保护红线和永久基本农田数据库、年均气温、降水数据和晋中市道路、水体、村庄、城市、建制镇土地利用数据。其中,土地利用数据来源于晋中市土地利用现状年度更新库;年均气温来源于《晋中市统计年鉴 2019》;年均降水来源于《2019 年晋中市水资源公报》;道路、水体、村庄、城市、建制镇数据来自晋中市第三次国土调查数据库;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

(http://www.gscloud.cn) 30 m 分辨率的 DEM 数据。在 ArcGIS10.5 软件平台下构建晋中市“三生”空间格局优化基础数据库,对所有矢量数据运用 Arcgis10.5 统一投影到 CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_38 坐标系下并面转栅格至本研究单元 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 网格栅格。

2 研究方法

2.1 “三生”空间优化分析框架

国土空间格局优化要求确定各类用地的规模、结构和布局;其中,规模及结构的确定是明确各类用地需求数量的过程,实质是确定“量”;而布局的确定,是对各类空间内部进行适宜性划分,体现空间“质”的区别。“三生”空间优化是指按照某种原则,对未来“三生”空间“质”及“量”的筹划与设计^[8]。“量”即研究区内生产、生活和生态空间的规模与结构,“质”即“三生”空间布局的确定。基于历史数据进行预测确定“量”,从前瞻性、合理性和科学性三个方面考虑,对空间“质”进行安排,首先从前瞻性的角度出发,通过模拟确定未来自然发展情景下“三生”空间格局,考虑其动态演变过程,模拟过程中将生态红线与基本农田作为限制条件以确保合理性。然后出于科学性的考虑,以“最小累计阻力”理论为基础,通过生态用地与建设用地扩张能力的相对强弱来衡量资源环境限制下土地进行国土空间开发行为的适宜性程度,将国土空间分为生态保护区、生态优化区、限制开发区、优化开发区和适宜开发区^[12]。最后,综合适宜性评价结果与“三生”空间变化情况,进行冲突识别与协同分区,在考虑未来国土空间数量与分布可能发生的变化时同时融入国土空间开发适宜性评价。以上述“三生”空间优化的要求为导向,模拟预测和国土空间开发适宜性分区为手段,提出如下分析框架(图 2)。

其中,“三生”空间模拟预测结果与适宜性评价结果二者之间冲突识别与协同的依据是:从“三生”空间来看,生态空间为未进行开发建设的区域,生活空间为城市、建制镇和村这类集中开发建设的区域,而生产空间既包含了建设区也包含了非建设区。国土适宜性评价是基于生态扩张和建设扩张最小累计阻力的差值进行的,差值越小表示生态用地较建设用地更容易扩张,对差值划分等级,从小到大分别对应生态保护区、生态优化区、限制开发区、优化开发区和适宜开发区。在空间上叠加评价分区结果与三生空间模拟预测结果,依据生活、生态和生产空间是否需要开展建设和通过评价得出的各分区是否适宜开展建设进行优化复合分区。

生态保护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,故将生态保护区内部且与生态保护区冲突的区域全部划为生态空间。生态优化区的建设阻力次之,可以为增强生态安全提供空间,因此主要以生态空间为主。限制开发区建设阻力较小,可适当进行建设,但为避免开发建设的无序扩张,将其以生产空间这种既包含建设区也包含了非建设区的空间为主较为适宜。适宜开发区建设阻力最小,是进行开发建设活动的核心重点区,因此以生活空间这类需集中开发建设的空

间为主。优化开发区建设阻力同样较小，但不适宜集中开发建设，且该区域主要分布在适宜开发区周围，将该范围内划为生产生态空间，作为生活空间功能的补充较为适宜。

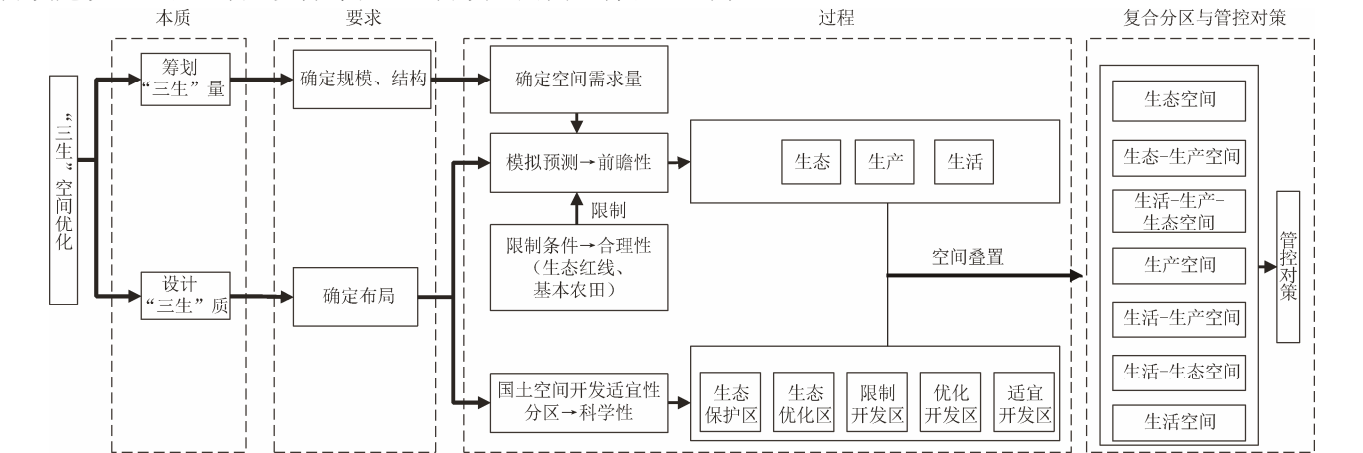


图 2 “三生”空间优化分析框架

Fig.2 Analysis Framework of “production-living-ecological” spatial optimization

以上述分析为依据，基于国土空间的多功能性与主导功能，构建叠置矩阵（表 1），在空间上叠加适宜性评价分区结果与 2025 年三生空间模拟预测结果，将研究区分为 7 大类：生态空间、生产-生态空间、生活-生产-生态空间、生产空间、生活-生产空间、生活-生态空间与生活空间，缓解研究区国土空间结构性矛盾^[13]。

表 1 适宜性评价结果与“三生”叠置矩阵

Table 1 Overlay matrix of suitability evaluation results and “production-ecological-living” spaces						
分类	生态保护区	生态优化区	限制开发区	优化开发区	适宜开发区	
Classification	Ecological protection zone	Ecological optimization zone	Restricted development zone	Optimized development zone	Suitable development zone	
生态空间	生态	生态	生产-生态	生产-生态	生活-生态	
生产空间	生态	生产-生态	生产	生产	生活-生产	
生活空间	生态	生活-生态	生活-生产	生活-生产-生态	生活	

2.2 模拟预测

2.2.1 “三生”空间分类与衔接

本研究采用类型归并法，基于《第二次全国土地调查土地分类表》和《土地利用现状分类 2017》中各类型用地的含义与主导功能，同时参考李媛洁等^[14-15]对“三生”空间分类的已有成果，确定晋中市“三生”空间与土地利用类型的衔接表，如表 2 所示。

2.2.2 Markov 模型

Markov 模型在三生空间变化研究中的应用是通过设定某空间类型 $t+1$ 时的状态只与 t 时有关来实现国土空间变化的模拟，其表达式如下：

$$S_{(t+1)} = P_{ab} \cdot S_{(t)}$$

式中 $S_{(t)}$ 、 $S_{(t+1)}$ 为 t 时、 $t+1$ 时的研究区国土空间类型状态矩阵； P_{ab} 表示由类型 a 转换为类型 b 的转移概率矩阵。

本文以 2014、2018 年两期国土空间格局数据为基础获取参数，对 2025 年晋中市自然发展情景下的三生空间状况进行数量上的模拟预测。

2.2.3 FLUS 模型

首先利用神经网络算法（Artificial Neural Networks, ANN）从基期年“三生”空间数据和包含人为及自然效应的多种驱动力因子获取各用地类型在研究范围内的适宜性概率，然后将适宜性概率与邻域因子、自适应惯性系数和转换成本结合，得出各元胞的总体转换概率，经过轮盘竞争机制最终得出模拟结果^[16]。

表 2 晋中市“三生”空间分类与土地利用类型衔接表

Table 2 Connection between production-living-ecological space classification and land use type in study area		
一级分类	二级分类	第二次全国土地调查分类
Primary classification	Secondary classification	Classification of the Second National Land Survey
生产空间 Production space (PS)	农业生产空间 (PS1)	水田、水浇地、旱地、果园、茶园、其他园地
	工矿生产空间 (PS2)	铁路用地、公路用地、农村道路、机场用地、设施农用地、港口码头用地、管道运输用地、水工建筑用地与水利设施用地、采矿用地、风景名胜及特殊用地
生活空间 Living space (LS)	城镇生活空间 (LS1)	城市、建制镇
	农村生活空间 (LS2)	村
生态空间 Ecological space (ES)	绿地生态空间 (ES1)	有林地、灌木林地、其他林地、天然牧草地、人工牧草地、其他草地
	水域生态空间 (ES2)	河流、湖泊、水库、坑塘水面，沿海滩涂、内陆滩涂、沟渠、冰川及永久积雪、沼泽地
	其他生态空间 (ES3)	空闲地、田坎、盐碱地、沙地、裸地

1) 驱动力因子的选取

本研究从驱动国土空间发生变化效应较强的地形条

件和可达性两个方面选取因子：①地形条件中高程和坡度是主要因素；②可达性主要有到城镇中心的距离与交

通条件, 具体有: 到城市中心的距离、到村庄的距离、到一般公路(乡、县、省道)的距离、到高速公路的距离、到铁路的距离、到河流水面的距离和到镇中心的距离^[17]。用 ArcGIS 软件中的欧式距离工具对各驱动因子进行预处理。

2) 适宜性概率与邻域因子

ANN 分为输入层、隐藏层和输出层。本文对 9 种驱动因子的基础数据进行归一化处理, 采用均匀采样法对国土空间数据和驱动因子进行采样, 经 ANN 计算得到不同空间的适宜性概率^[18], 计算式为:

$$sp(p, i, t) = \sum_j w_{ji} \cdot \text{sigmoid}(net_j(p, t))$$

$$= \sum_j w_{ji} \cdot \frac{1}{1 + e^{-net_j(p, t)}} \quad (2)$$

式中 $sp(p, i, t)$ 是 i 类型空间在栅格 p 下、时间 t 时的适宜性概率; w_{ji} 表示输出层和隐藏层之间的权重; $\text{sigmoid}()$ 为隐藏层到输出层的激励函数; $net_j(p, t)$ 代表第 j 个隐藏层栅格 p 在时间 t 时接收的信号。神经网络算法得到的各个空间类型适宜性概率之和恒为 1 即^[19]:

$$\sum_i sp(p, i, t) = 1 \quad (3)$$

选择邻域发展密度来衡量邻域效应, 计算式如下:

$$\Omega'_{p,t} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = i)}{N \times N - 1} \cdot w_i \quad (4)$$

式中 $\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = i)$ 表示在 $N \times N$ 的 Moore 邻域窗口上, 前一次迭代后第 i 种地类的栅格总数, 本研究 $N=3$, w_i 为各类空间的邻域作用权重。邻域因子参数范围为 0~1, 越接近 1 表示该用地类型的扩张能力越强, 本研究将扩张能力定义为生活用地最强, 生态用地最弱, 分别设为 1 和 0.1, 由于自然和人为活动的共同作用, 认为生产用地扩张能力适中, 基于以上考虑, 邻域因子参数设置如下(表 3)。

表 3 邻域因子参数

Table 3 Neighborhood factor parameters

空间类型 Type of space	生活空间 Living space	生产空间 Production space	生态空间 Ecological space
邻域因子参数 (w_i) Neighborhood factor parameters	1	0.6	0.1

3) 惯性系数和转换成本

将 Markov 模型计算得到的研究区 2025 年 3 类空间的数量作为预期需求。各类空间的惯性系数由现有的土地数量与需求之差决定, 并在迭代过程中自适应调整, 确保各类空间的规模在模拟过程中逐渐向目标值靠近, 其计算式如下^[20]:

$$Interia_i^t = \begin{cases} Interia_i^{t-1}, |D_i^{t-2}| \leq |D_i^{t-1}| \\ Interia_i^{t-1} \cdot \frac{D_i^{t-2}}{D_i^{t-1}}, 0 > D_i^{t-2} > D_i^{t-1} \\ Interia_i^{t-1} \cdot \frac{D_i^{t-1}}{D_i^{t-2}}, D_i^{t-1} > D_i^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $Interia_i^t$ 表示第 i 类空间在迭代时间 t 上的惯性系数, D_i^{t-1} 、 D_i^{t-2} 分别表示上一次和上两次迭代时, 第 i 类空间的栅格数量与需求数量之差。

转换规则即一种空间向另一种空间转换的困难程度, 当一类空间类型可以向另一类空间类型转化时, 把对应的矩阵值设为 1, 不允许向其他类型空间转化时则设为 0。本研究中, 自然发展情景下三类空间均允许相互转换, 具体转换矩阵设置见表 4。

表 4 国土空间变化转换矩阵

Table 4 Transformation matrix of land spatial changes

空间类型 Type of space	生产空间 Production space	生活空间 Living space	生态空间 Ecological space
生产空间	1	1	1
生活空间	1	1	1
生态空间	1	1	1

4) 总体转换概率和约束

得到各个栅格的总概率后, 以 CA 模型迭代的方式, 将各空间类型分配到栅格中。在 t 时刻, 栅格 P 转化为 i 类空间的概率可表示成:

$$TProb_{p,i}^t = sp(p, i, t) \cdot \Omega'_{p,t} \cdot Interia_i^t \cdot (1 - sc_{c \rightarrow i}) \quad (6)$$

式中 $sp(p, i, t)$ 是神经网络输出的适宜性概率; $sc_{c \rightarrow i}$ 为国土空间类别 c 转为类别 i 的成本, $1 - sc_{c \rightarrow i}$ 代表发生转化的困难程度^[21]; $\Omega'_{p,t}$ 表示邻域作用。

本研究选取生态红线作为生态保护限制因素, 有关管控政策在调节和控制工矿建设用地扩张方面也发挥了显著的管控作用, 选取基本农田保护区作为政策性约束条件^[17]。

2.3 国土空间开发适宜性分区

2.3.1 MCR 模型

MCR 模型的本质在于由源地到达目标所在地需要克服的阻力最小值, 体现的是一种可达性。本研究将国土空间格局演变看作是生态源与建设源向周围扩散的结果, 运用 GIS 技术建立 MCR 模型, 分别构建研究区的生态源地最小累计阻力面和建设源地最小累计阻力面来表示两种类型国土资源的空间跨越特点, 计算式为:

$$C_M = f \sum D_{mn} R_m \quad (7)$$

式中 C_M 是范围内任一栅格中心的最小阻力和其到所有源地距离关系的函数; f 为未知负函数, 代表最小累积阻力和它到所有源地的负相关关系; D_{mn} 为物种从源地 n 穿过景观 m 到空间某栅格的距离; R_m 表示物种穿越景观表面 m 的阻力。

2.3.2 目标源的确定

“源”即向外扩张的起点^[22], 具有外部扩张能力强、内部一致和吸引能力突出的特征^[23], 生态源地是生态功能重要、生态脆弱性及敏感性程度比较高的区域, 建设源地为建设扩张的中心^[24]。本研究选取生态保护红线内水源涵养区、国家森林公园、世界文化和自然遗产地以及国家级和省重点风景名胜区为生态源, 维系晋中市生态安全; 选取城镇和居民点作为建设扩张源, 这类用地是建设密集区和人口集聚地, 对各要素聚集有较大吸引力。

2.3.3 阻力面建立

生态源地和建设源地彼此存在着竞争关系, 这种竞争的特点为此消彼长、彼此抑制。不同因子对生态源地和建设源地的扩张阻力有别, 构建指标相同、赋值取反

的评价指标体系可以体现两种源地之间的这种特征关系。选取高程、坡度、土地利用类型、年均气温、年均降水以及距道路和水体距离 7 个阻力因子，结合研究区具体情况使用自然断点工具，参考有关文献[25]来确定各阻力因子的等级以及取值，并使用 AHP 层次分析法得出权重，体系构建结果如表 5 所示。

表 5 生态源、建设源阻力因子分级及权重
Table 5 Classification and weight of resistance factors of ecological source and construction source

阻力因子 Resistance factors	阻力因子分级 Level of resistance factors					权重 Weight
生态源 Ecological source	1	2	3	4	5	
建设源 Construction source	5	4	4	2	1	
高程 DEM/m	>1 613~2 549	>1 365~1 613	>1 157~1 365	>925~1 157	>509~925	0.188 6
坡度 Slope/(°)	>28~75	>18~28	>11~18	5~11	<5	0.188 6
土地利用类型 Land use type	林地、水域	草地、园地	耕地	未利用地	城镇	0.249 0
年均气温 Mean annual temperature/℃	>6.3~7.5	>7.5~8.7	>8.7~9.9	>9.9~10.3	>10.3~10.8	0.060 7
年均降水量 Average annual precipitation/mm	>532~569	>497~532	>482~497	>466~482	>453~466	0.068 0
距道路距离 Distance from the road/m	>11 170~18 497	>7 253~11 170	>4 279~7 253	1 813~4 279	<1 813	0.101 8
距水体距离 Distance from the water/m	0~2 206	>2 206~4 989	>4 989~8 155	>8 155~12 089	>12 089~24 465	0.143 2

采用 MCR 模型构建生态源地和建设源地这两种类型扩张过程中的最小累积阻力面，达到反映生态源和建设源空间演变态势的目的。使用 ArcGIS 软件中的栅格计算器以及重分类等工具，借助 Cost Distance 分析功能依次计算两个目标源地的最小累积阻力面，记为 MCR_{生态源}和 MCR_{建设源}。

2.3.4 最小累计阻力差值计算

基于生态源最小累计阻力和建设源最小累计阻力之差，确定阈值划分国土空间开发适宜性分区，继而约束“三生”空间布局。

$$MCR_{差值} = MCR_{生态} - MCR_{建设} \quad (8)$$
式中 MCR_{差值}为生态源最小累计阻力与建设源最小累计阻力之差；MCR_{差值}<0 时，代表生态源地较建设源地更容易向四周扩张，该区域内开展生态保护适宜性较高；MCR_{差值}>0 时，代表建设源地比生态源地更容易扩张，该区域内进行开发建设适宜性较好。

2.4 Markov-FLUS-MCR 模型的配置

Markov-FLUS-MCR 耦合模型其优势在于一方面在国土空间格局优化中，充分考虑资源环境约束下土地供给人类进行国土空间开发行为的适宜性程度，另一方面可以做到对国土空间演变信息数量和空间分布的充分挖掘，模型间的耦合关系及各模型在本文中的应用如图 3 所示。

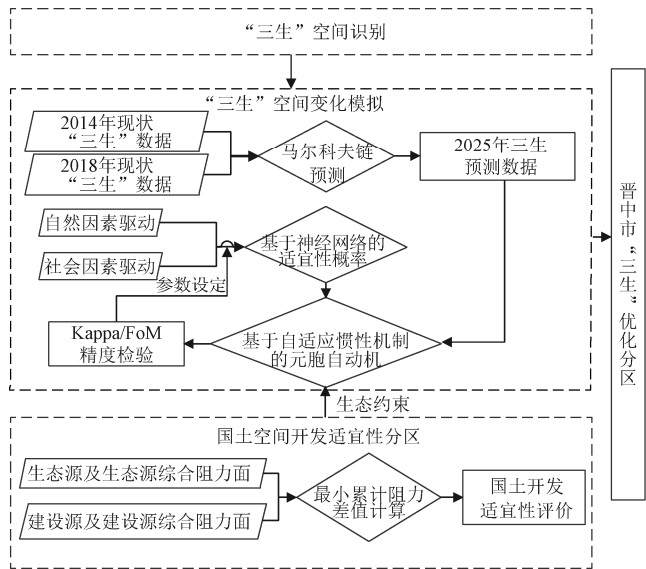


图 3 Markov-FLUS-MCR 耦合模型配置

Fig.3 Markov-FLUS-MCR coupled model configuration

3 结果与分析

3.1 “三生”空间模拟预测

根据表 2 的分类体系，对晋中市 2014 年和 2018 年的土地利用情况进行“三生”空间分类识别（表 6、图 4a、图 4b）。晋中市国土空间以生态空间为主，生活和生产空间规模相对较小。在空间分布上，生活与生产空间主要集中在市域西部和各县中心城区及城区周边，而生态空间主要集中于东部山区。

为验证 FLUS 模型的模拟精度，以晋中市 2014 年“三生”空间现状为基期数据，模拟 2018 年的空间分布情况，结果如图 4c 所示，将这一结果与 2018 年实际进行比较，FLUS 模型模拟出的总体精度是 97.17%，Kappa 系数为 0.984，FoM 指数为 0.732 6，空间分布模拟效果优良，模型及其参数适宜作为本研究的基础。

模拟结果显示（表 6，图 4d），2025 年晋中市的生态空间呈下降态势，减少面积达 892.65 km²，生产与生活空间均呈增长态势，其中生活空间为小幅度增长，生产空间涨幅较大，增长面积分别为 79.13 km²和 813.53 km²，这在一定程度上与中国城镇化与工业化高速发展、生活空间提质和生产空间增量的特点相一致。空间布局上，晋中市生态空间大多分布在榆社、和顺和左权；生产空间主要分布在寿阳、榆次、太谷、祁县、平遥和介休县，灵石和昔阳也有一定分布；生活空间主要分布在榆次、太谷和介休等常住人口较多区域，而常住人口较少、农村城镇空间分散的县域内零星分布。

表 6 2018 年与 2025 年自然发展情景下“三生”空间面积
Table 6 Areas of “production-living-ecology” space under natural development scenario in 2018 and 2025 km²

年份 Year	生产空间 Production space	生活空间 Living space	生态空间 Ecological space
2018	4 765.44	764.17	10 867.20
2025	5 578.96	843.29	9 974.50
变化 Changes	813.53	79.13	-892.65

3.2 晋中市国土空间开发适宜性分区

3.2.1 累计耗费距离表面

1) 生态源阻力面建立

按表 5 分级情况对生态源阻力因子重分类，再对各

阻力因子加权求和后划分成 5 个等级, 获得生态源综合阻力因子等级图 (图 5)。由图 5 可知, 晋中市生态源阻

力因子具有明显的区域差异性, 西部和各县中心城区及其周边阻力较大, 而中部和东部阻力普遍较低。

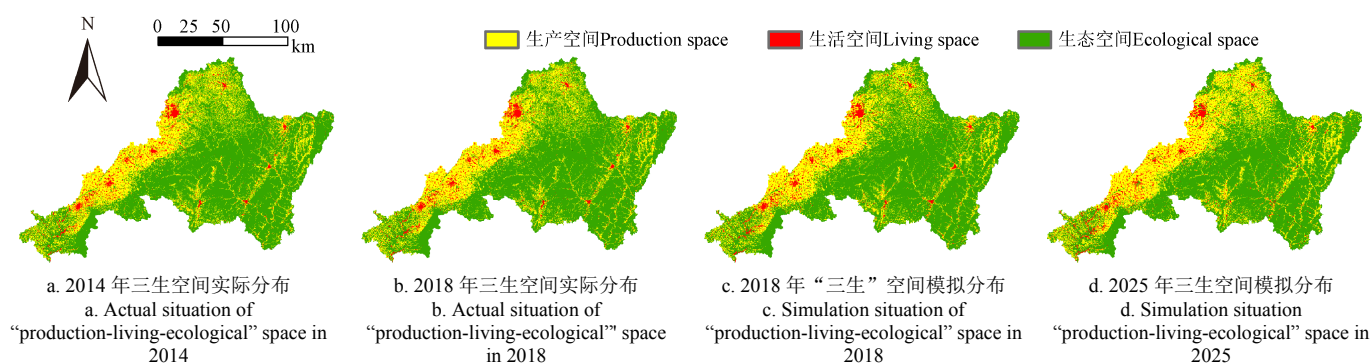


图 4 研究区三生空间实际与模拟分布图

Fig.4 Actual and simulation situation of "production-living-ecological" space of study area

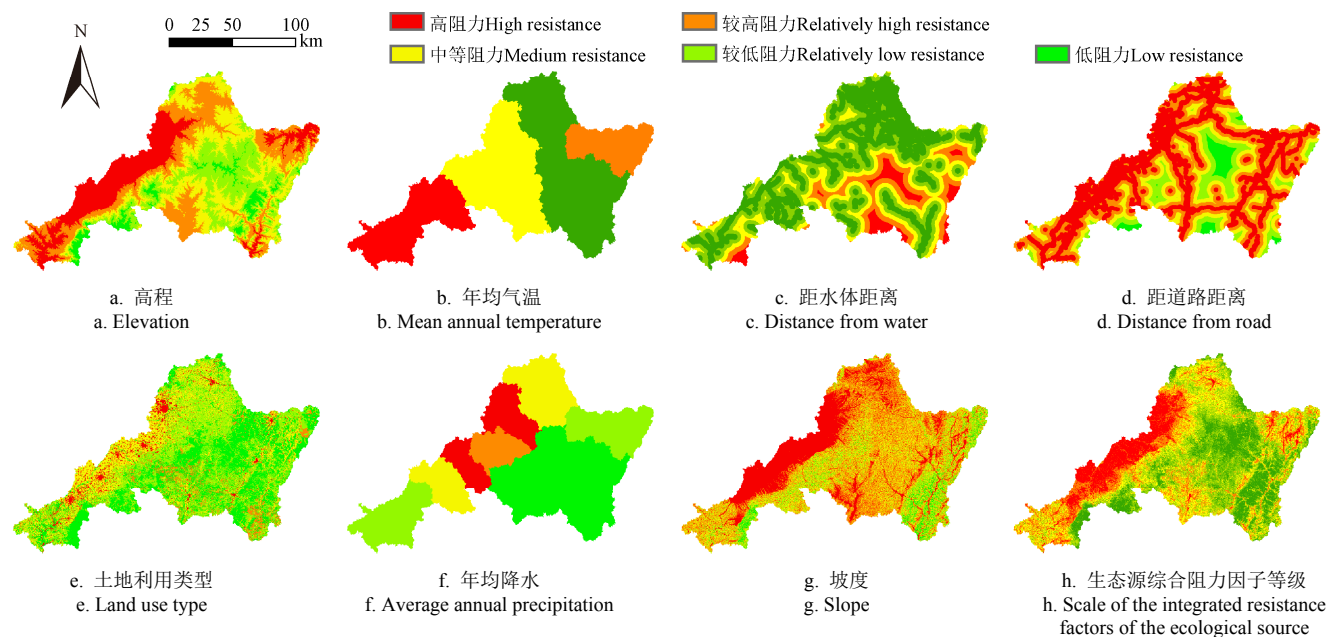


图 5 生态源阻力因子等级系列图

Fig.5 Series of ecological source resistance factors

2) 建设源阻力面建立

采用同样的流程, 对各建设源阻力因子进行处理得到建设源阻力因子等级系列图 (图 6)。建设源综合阻力高值集中于市域中部和东部等成片山林区, 阻力低值集中于市域西部地势较平坦的区域, 较高阻力、中等阻力和低阻力值在空间分布上相对分散。

3.2.2 国土空间适宜性评价

以最小累计阻力面差值计算结果为依据, 参考相关文献分区情况^[26], 将晋中市国土空间适宜性分为 5 类, 即生态保护区、生态优化区、限制开发区、优化开发区和适宜开发区。各分区差值及面积统计见表 7。

从表 7、图 7 来看, 生态保护区面积占 21.56%, 分布在生态源及周围, 主要位于晋中市的东南部和中部; 生态优化区面积为 4 994 km², 规模最大, 占整个研究区的 30.59%, 该区围绕生态保护区分布, 集中在晋中市中部、东部和南部; 限制开发区为晋中市总面积的 21.2%, 分布在晋中市的西南部、北部以及南部; 优化开发区占晋中市总面积的 17.18%; 适宜开发区面积为 1 546 km²,

仅占 9.47%, 晋中市最适宜开发区域面积偏小, 主要分布在研究区的西北部 and 南部及北部的少量区域。

从各类分区构成及特点来看, 生态保护区建设阻力最高, 地势较高, 分布有省级自然保护区、国家公园和国家湿地公园等水源涵养和水土保持功能显著的生态保护核心地带, 以保护生态环境为主, 禁止所有开发建设项目。生态优化区主要分布着灌木林地和天然牧草地, 属水土保持和水源涵养的过渡区, 该区阻力差值区间从负到正, 说明生态和生活空间的适宜性都比较高, 但基于生态优先的准则, 应优先开展生态保护。限制开发区以农业生产为主, 主要由耕地、基本农田和园地组成; 优化开发区阻力差值较高, 建设阻力显著降低, 由少许质量较差的耕地和一些未利用地组成, 是之后国土开发利用和国土整治的主要对象, 此外, 作为限制开发区和适宜开发区的过渡带, 它同样是今后工矿生产项目开展的后备用地; 适宜开发区建设阻力最低, 这些区域地势相对平坦, 包括现已开发建成的生活空间和重点建设的市区、县域和周边具有扩张潜力的区域, 是今后生活空间集中扩张区域。

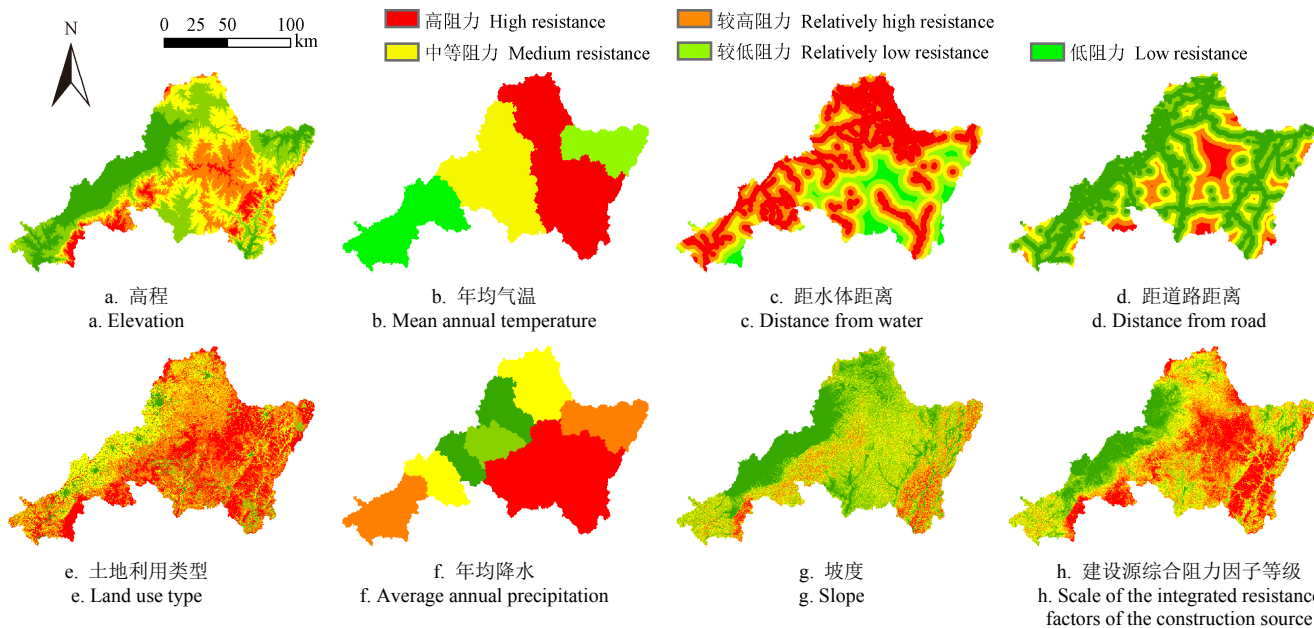


图 6 建设源阻力因子等级系列图
Fig.6 Series of resistance factors of the construction source

表 7 研究区适宜性分区结果
Table 7 Suitability zoning results of study area

类别 Category	阻力差值区间 Range of resistance differences	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%
生态保护区	-43 144.68~-2 289.94	3 520	21.56
生态优化区	-2 289.94~7 649.34	4 994	30.59
限制开发区	7 649.34~19 882.31	3 461	21.20
优化开发区	19 882.31~40 143.16	2 806	17.18
适宜开发区	40 143.16~115 932.97	1 546	9.47

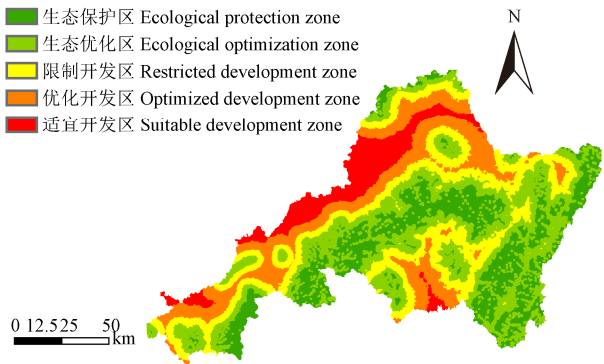


图 7 国土空间开发适宜性分区
Fig.7 Zoning of suitability of land and space development

3.3 复合分区与管控对策

采用 ArcGIS 软件内的叠加分析工具，在空间上叠加生态适宜性分区结果和模拟预测结果，以分区叠置矩阵（表 1）为指导，对晋中市进行“三生”空间优化复合分区，结果如图 8 所示。

1) 生产空间：面积为 2 947.11 km²，主要分布在研究区北部、西部以及西南部。此区域内禁止其他类型的建设活动占用基本农田保护区，基本农田与城镇建设用地之间需要设置一定的隔离带。为提高生产功能，该区域应以土地整治为优化空间的主要措施，通过土地综合整治项目，消除田块空间限制，提升有效耕地面积；改

善渠道设施，提高灌溉效率；以修建网格型田间道路的方式，使得机械化作业能够实现，构建现代农业生产体系。此区域内应以增加产能为主要目标，尽量不占或少占生态用地，可通过整体搬迁各项基础设施条件较次的生活空间扩大生产空间规模，进行开发利用。

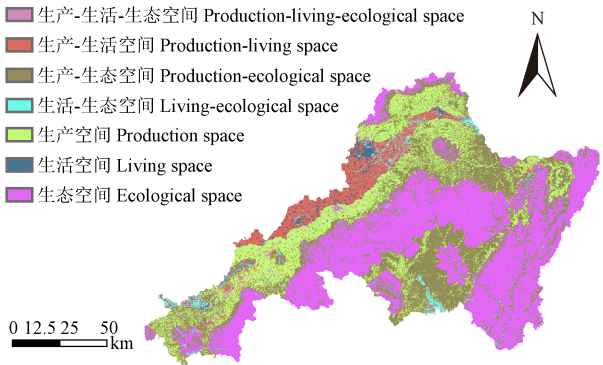


图 8 2025 年研究区“三生”模拟优化结果
Fig.8 Simulation optimization results of “production-living-ecological” of study area in 2025

2) 生活空间：面积为 234.70 km²，主要分布在研究区西北部、北部和南部，其余地域有零星分布，相较于现状，优化后该类型空间扩展布局有聚集态势，扩张至生产空间周围。优化生活空间应以归并和提质为主，进行村庄整体搬迁工程，搬迁合并人口规模小、人居环境差、偏远山区的村庄，提高村民生活便利水平^[27]。归并后的生活空间应以整治人居环境为重点，改善居住区、宅基地空间布局，按需新修道路、提高绿化用地占比，最大化利用地上地下空间，地上加强输电工程建设，地下优化给排水工程建设。

3) 生态空间：面积为 6 752.62 km²，占比最大，达 41.20%，主要分布在研究区东部、中部和西南部，集中在生态保护红线区范围内，区域内包括绵山、八缚岭省

级自然保护区、国家森林公园、汾河国家湿地公园等生态敏感性较高和生态功能重要性程度较高的区域。应完全禁止对这些区域开展开发建设项目, 保护措施需针对不同功能生态空间。

4) 生产-生活空间: 面积为 $1\,279.10\text{ km}^2$, 主要分布在西部、西南部和中南部, 其余地区少量分布。晋中市各类型低效用地规模较大, 存在建设用地粗放利用的问题^[28], 建议集中开展综合整治工作, 减少居住环境较差和交通不便地区的生活空间比例, 同期开展建制镇用地和农村居民点用地的集约节约开发, 综合治理, 分区保护, 通过对生活空间的整治, 实现耕地总量动态平衡。

5) 生产-生态空间: 面积为 $4\,444.93\text{ km}^2$, 主要分布在研究区西南部、北部和中南部, 其余地区少量分布。该区域应以优先保障生态安全, 在合理的限度内开发利用, 在优先保护生态环境的前提下, 可开展生产活动。发展过程中应优先扶持旅游、教育、高新产业等可以尽可能避免对生态环境造成破坏的产业。

6) 生活-生态空间: 面积为 438.86 km^2 , 主要分布在研究区西南部、中南部和西北部。多分布在生态区和生活区交界地带, 属于生态功能重要性及生态敏感性中间等级, 能够对其开展生态重建来补充生态空间。同时, 按照《山西省主体功能区规划》对“生活”空间和“生态”空间的规定, 在满足生态空间需求后, 允许生活空间扩张建设。该类型区域应进一步强化基础设施和公共服务设施建设, 科学有序规划各类生活及生态区。

7) 生产-生活-生态空间: 面积为 230.08 km^2 , 主要分布在研究区西南部和西部, 其它地区零星分布。该类型空间利用功能最为丰富, 应以生态空间功能为主开展保护, 在保障生态空间供给的前提下, 可考虑用作各项基础设施和工矿生产的建设与完善, 扩大居民居住及活动区范围, 也能用来扩张生产空间, 提高耕地规模。此类别空间以满足生态需求为主, 适当提高生活、生产空间规模, 优化基础设施以实现利用率最大化, 推动生态文明建设, 促进区域经济环境协调发展。

4 结论与讨论

1) Markov-FLUS 模型可以较好地模拟晋中市“三生空间”数量结构及空间布局。通过选取包含人类活动方面与自然条件影响的 9 个驱动因子, 模拟出 2018 年晋中市“三生”空间, 总体精度为 97.17%, Kappa 系数为 0.984, 该模型具有可行性。2025 年模拟结果显示, 生产与生活空间规模均呈增长态势, 生态空间面积减少。从空间布局看, 生态空间大多分布在榆社、和顺和左权; 生产空间主要分布在寿阳、榆次等县, 灵石等也有一定分布; 生活空间主要分布在榆次等常住人口较多区域, 而常住人口较少、农村城镇空间分散的县域内零星分布。

2) 选用生态保护红线为生态源地, 选用城镇用地与农村居民点用地为建设源地, 选取 7 个阻力因子、采用 MCR 模型对晋中市国土空间开发适宜性进行评价, 确定阈值并分区: 生态保护区、生态优化区、限制开发区、

优化开发区和适宜开发区, 其中生态优化区面积最大, 适宜开发区面积最小。

3) 借助 GIS 技术和 Markov-FLUS-MCR 模型研究“三生”空间优化问题, 考虑未来“三生”空间变化情况, 强调资源环境限制下土地供给人类的适宜性程度。这种耦合配置不仅考虑了生活空间扩张、生产空间开发和生态空间保护需求, 还划定了复合功能区, 分区结果更具科学性、适用性和前瞻性。优化后晋中市分为生产空间、生态空间、生活空间、生产-生活空间、生产-生态空间、生活-生态空间和生产-生活-生态空间, 表现出“整体集聚, 局部零散”的空间分布特征, 其中生态空间面积占比最大, 为 41.20%。针对不同空间用途, 提出了相关管控对策。

本研究提出的优化分区与各类空间提升策略对晋中市未来生态空间的管控、治理和修复, 生产空间的扩张及利用和生活空间的改善与调整具有较好的借鉴意义。但也存在一定的不足: 1) 对国土空间模拟驱动因子和生态源阻力因子考虑不够充分。本文在模拟规则的制定过程中虽综合考虑了降水、气温、地形和人类活动等多要素的影像, 提取了包含自然和人文因素的 9 种驱动因子和 7 种生态源、建设源阻力因子, 以尽可能改进模型的精确性, 但由于研究对象的复杂性, 仍存在一些如生物和地质环境因素未能充分考虑, 今后的研究中应进一步考虑多方面因素, 以推动三生空间及其优化耦合模型更加科学、合理和适用, 以此更好地加快实现国土空间格局优化, 帮助达到区域的可持续发展。2) 本文尝试建立兼顾“量”和“质”的“三生”空间优化分析理论框架, 但对研究对象形成的内在机理、与土地利用优化的差异和目标的量化方面未充分考虑, 今后可类比、借鉴土地利用冲突相关理论和方法开展研究探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 江东, 林刚, 付晶莹. “三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1085-1101. Jiang Dong, Lin Gang, Fu Jingying. Discussion on scientific foundation and approach for the overall optimization of “production-living-ecological” space[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1085-1101. (in Chinese with English abstract)
- [2] 凌子燕, 李延顺, 蒋卫国, 等. 山江海交错带城市群国土三生空间动态变化特征: 以广西北部湾城市群为例[J]. 经济地理, 2022, 42(2): 18-24. Ling Ziyang, Li Yanshun, Jiang Weiguo, et al. Dynamic change characteristics of “production-living-ecological spaces” of urban agglomeration interlaced with mountains, rivers and sea: A case study of the Beibu Gulf Urban Agglomeration in Guangxi[J]. Economic Geography, 2022, 52(2): 18-24. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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. Ji Zhengxin, Liu Chao, Xu Yueqing, et al. Identification and optimal regulation of the production-living-ecological space based on quantitative land use functions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 222-231. (in Chinese with English abstract)

- [4] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391.
Huang Jinchuan, Lin Haoxi, Qi Xiaoxiao. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 378-391. (in Chinese with English abstract)
- [5] 于贵思, 赵明华. 基于文献计量的国内“三生空间”研究现状综述[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2018, 17(3): 76-82.
Yu Guisi, Zhao Minghua. Research status summary of domestic “three-life space” research based on bibliometrics[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2018, 17(3): 76-82. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邹利林, 王建英, 胡学东. 中国县级“三生用地”分类体系的理论构建与实证分析[J]. 中国土地科学, 2018, 32(4): 59-66.
Zou Lilin, Wang Jianying, Hu Xuedong. An classification systems of “production-living-ecological” land on the county level: Theory building and empirical research[J]. China Land Science, 2018, 32(4): 59-66. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王芳莉. 基于 FLUS 模型的陇南市土地利用变化与模拟[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
Wang Fangli. Change and Simulation of Land Use in Longnan City Based on FLUS Model[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
Huang An, Xu Yueqing, Lu Longhui, et al. Research progress of the identification and optimization of “production-living-ecological” spaces[J]. Progress in Geography, 2020, 39(3): 503-518. (in Chinese with English abstract)
- [9] Campbell D J, Gichohi H, Mwangi A, et al. Land use conflict in Kajiado District, Kenya[J]. Land Use Policy, 2000, 17: 337-348.
- [10] 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 Runmiao, Chen Songlin. 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.
- [11] 金贵. 国土空间综合功能分区研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
Jin Gui. Study on Comprehensive Function Regionalization of National Spatial Territory[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郑洋, 郝润梅, 吴晓光, 等. 基于 MCR 模型的村庄“三生空间”格局优化研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 362-367.
Zheng Yang, Hao Runmei, Wu Xiaoguang, et al. Research on the spatial pattern optimization of production-living-ecological spaces in village based on MCR Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 362-367. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王昆. 基于适宜性评价的生产-生活-生态(三生)空间划定研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Wang Kun. Study on Delimitation of the Ecological-Production-Living Space Based on Suitability Evaluation: A Case Study of Henan Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李媛洁, 叶长盛, 黄小兰. 基于 CLUE-S 模型的南昌市“三生”空间时空演变及情景模拟研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 325-332.
Li Yunajie, Ye Changsheng, Huang Xiaolan, et al. Temporal-spatial evolution and scenario simulation of production-living- ecological space in Nanchang based on CLUE-S Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 325-332. (in Chinese with English abstract)
- [15] 林伊琳, 赵俊三, 张萌, 等. 滇中城市群国土空间格局识别与时空演化特征分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 176-191.
Lin Yilin, Zhao Junsan, Zhang Meng, et al. Identification of territory space pattern and spatio-temporal evolution analysis of urban agglomeration in Central Yunnan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 176-191. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李国珍. 基于 FLUS 模型的深圳市土地利用变化与模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
Li Guozhen. Land Use Change and Simulation in Shenzhen Based on FLUS Model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [17] 林沛锋, 郑荣宝, 洪晓, 等. 基于 FLUS 模型的土地利用空间布局多情景模拟研究: 以广州市花都区为例[J]. 国土与自然资源研究, 2019(2): 7-13.
Lin Peifeng, Zheng Rongbao, Hong Xiao, et al. Simulation of land use spatial layout based on FLUS model: A case study of Huadu district, Guangzhou[J]. Territory & Natural Resources Study, 2019(2): 7-13. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 Shuai, Jin Xiaobin, Yang Xuhong, 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. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈兵飞. 基于 FLUS 模型的万州区土地利用变化模拟及土地利用结构优化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
Chen Bingfei. Study on Land Use Change Simulation and Land Use Structure Optimization in Wanzhou District Based on FLUS Model[D]. Chongqing: Southwest University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
Wang Xu, Ma Bowen, Li Dan, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei province based on FLUS model[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 230-242. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王雪然, 潘佩佩, 王晓旭, 等. 基于 GeoSOS-FLUS 模型的河北省土地利用景观格局模拟[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 667-675.
Wang Xueran, Pan Peipei, Wang Xiaoxu, et al. Simulation of landscape pattern for land use in Hebei province based on GeoSOS-FLUS model[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(3): 667-675. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张颖, 徐辉. 基于 MCR 模型的农村居民点布局适宜性分区及优化模式研究: 以南京市六合区金牛湖街道为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1485-1492.
Zhang Ying, Xu Hui. Research on suitability subareas of rural residential distribution based on MCR model and optimization model: a case study of Jinnue street in Nanjing, Luhe district[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1485-1492. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李全宝. 基于 MCR 与 Markov-CA 模型的城镇增长边界划定研究: 以江苏省新沂市为例[J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(1): 83-88.
Li Quanbao. Study on the delimitation of urban growth boundary based on MCR and Markov-CA model: A case study of Xinyi City in Jiangsu Province[J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(1): 83-88. (in Chinese with English abstract)

- English abstract)
- [24] 汤鹏, 王浩. 基于 MCR 模型的现代城市绿地海绵体适宜性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 116-122. Tang Peng, Wang Hao. Analysis on the suitability of green sponge space in modern city based on MCR model[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2019, 43(3): 116-122. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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. Lin Yilin, Zhao Junsan, Chen Guoping, et al. Optimization of regional territory space pattern based on MCR-FLUS-Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 159-170, 207. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 Xiaofu, Su Jianmin, Zhang Linbo. 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 with English abstract)
- [27] 张永蕾, 栾乔林, 熊昌盛, 等. 基于多源空间数据的“三生”空间异质性评价与分区划定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 214-223. Zhang Yonglei, Luan Qiaolin, Xiong Changsheng, et al. Spatial heterogeneity evaluation and zoning of production-living-ecological space based on multi-source spatial data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(10): 214-223. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘慧芳, 毕如田, 王瑾, 等. 山西省县域城镇低效用地空间格局分异与影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 169-180, 208. Liu Huifang, Bi Rutian, Wang Jin, et al. Spatial pattern differentiation and influential factors of urban under-used land in county territories in Shanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 169-180, 208. (in Chinese with English abstract)

Optimization of production-living-ecological space based on Markov-FLUS-MCR model in Jinzhong, Shanxi of China

Li Hongrun, Liu Huifang*, Wang Jin, Guo Yonglong

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: An accurate and rapid optimization of “production-living-ecological” space has been one of the most important steps to implement territorial spatial planning at all levels, particularly for the better rational development and protection of land. Taking the Jinzhong City, Shanxi Province of China as the research object, the status quo of “production-living-ecological” space was first identified to establish the Markov-FLUS model. The number and distribution of “production-living-ecological” space were also predicted for the study area in 2025. Then, seven resistance factors were selected to evaluate the suitability of land development using the MCR model, in order to determine the threshold and zoning. Among them, the towns and residential areas were taken as the source of construction expansion, and the most important area for ecological protection was the ecological source. At last, the prediction and evaluation of development suitability were spatially superimposed to optimize the “production-living-ecological” space, according to the compound partitions. Subsequently, specific control measures were proposed for each partition. The research showed that: 1) The accuracy of the Markov-FLUS model was 97.17%, compared with the actual data. Thus, the model was very feasible to simulate the spatial changes of “production-living-ecological” in the study area in 2018. There was also an increasing trend for the production and living space in the study area in 2025. Specifically, the production space increased significantly, with an increase of 813.53 km², whereas, the ecological space decreased by 892.65 km². 2) The land space was divided into five types of zones: ecological protection, ecological optimization, restricted development, optimized development, and suitable development, from the perspective of development suitability using the MCR model. The ecological optimization zone presented the largest area of 4 994 km², accounting for 30.59% of the total. Meanwhile, the suitable development zone behaved the smallest area of 1 546 km². 3) Seven types of space after optimization were then divided: production, ecological, living, production-living, production-ecological, living-ecological, and production-living-ecological space. The spatial distribution was characterized by “the overall agglomeration, the local scattered”, of which the ecological space area was the largest proportion, accounting for 41.20%. As such, a recommendation was proposed for the management and control strategies, according to the different space uses. Consequently, the Markov-FLUS-MCR coupling model can balance the Markov-FLUS and MCR models at the same time, indicating the demand quantity and the spatial changes of “production-living-ecological” space with high precision. Land spatial suitability can also be evaluated using an ecological process. The ecological security was integrated during optimization to fully consider the evolution process of the quantity scale and spatial distribution of the “production-living-ecological” space over time. The finding can greatly contribute to promoting the “production-living-ecological” space optimization, particularly for the scientific guidance to the rational development and protection of land space in Jinzhong City, Shanxi Province, China.

Keywords: land use; optimization; zoning; Markov-FLUS-MCR model; production-living-ecological space