doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.017

基于 MCR－FLUS－Markov 模型的区域国土空间格局优化

林伊琳[1,2]　赵俊三[1,2]　陈国平[3]　张　萌[1,2]

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093;2.智慧矿山地理空间信息集成创新重点实验室,昆明 650093;
3.昆明冶金高等专科学校测绘学院,昆明 650033)

摘要:以滇中城市群为例,将 GIS 技术和 MCR－FLUS－Markov 模型应用于国土空间格局优化配置研究中,提出一种基于生态安全格局的国土空间格局优化配置方法,在生活空间扩张情景、生产空间开发情景、生态空间保护情景和综合优化情景 4 种模式下,对 2030 年国土空间结构布局情况进行预测,最终形成“生活-生产-生态空间”协调下的滇中城市群国土空间格局优化分区。结果表明:以生态保护红线作为生态源地,以城镇用地和农村居民点用地作为生活空间扩张源,选取 9 个阻力因子,采用 MCR 模型和累积耗费距离模型构建城市群生态安全格局,形成生态空间保护核心区、生态空间保护边缘区、生产空间开发重点区、生产空间开发边缘区和生活空间扩张集中区 5 个生态安全格局功能分区;以生态功能分区作为约束条件,通过 MCR－FLUS－Markov 模型模拟得到滇中城市群 2030 年 3 种情景下“生活-生产-生态空间”优化配置结果。生活空间扩张情景考虑了生活需要及政策指导下以生活空间扩张建设为主导的三生空间数量及结构的发展方向;在生产空间开发情景下,生活空间扩张规模得到一定控制,开发了部分生态空间潜力;在生态空间保护情景下,生产空间面积少量减小,生活空间面积少量增加。根据国土空间的主导功能及多功能性,滇中城市群 2030 年综合情景方案下的“生活-生产-生态空间”优化布局划分为生活空间、生产空间、生态空间、生活-生产空间、生活-生态空间、生产-生态空间和生活-生产-生态空间 7 大类,以生产-生态空间面积最小,生态空间面积最大,并结合城市群各县域发展特点提出了各空间类型的生活、生产开发建设和生态保护的重点及方向。研究认为,基于“生活-生产-生态空间”协调的综合情景方案更为合理,其他 3 种情景方案可为综合情景方案的实施进行补充和调整。

关键词:区域国土空间格局;生态安全格局;三生空间;优化配置;MCR－FLUS－Markov 模型

中图分类号:F301.24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)04-0159-12　　**OSID**:

Optimization of Regional Territory Space Pattern Based on MCR－FLUS－Markov Model

LIN Yilin[1,2]　ZHAO Junsan[1,2]　CHEN Guoping[3]　ZHANG Meng[1,2]

(1. *Faculty of Land Resource Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650093, *China*
2. *Key Laboratory of Geospatial Information Integration Innovation for Smart Mines*, *Kunming* 650093, *China*
3. *Geomatics Engineering Faculty*, *Kunming Metallurgy College*, *Kunming* 650033, *China*)

Abstract: Through GIS technology, using the MCR－FLUS－Markov model, and the urban agglomeration in central Yunnan was taken as an example investigation of the optimized allocation of a territory spatial pattern to put forward a method of optimization of territory spatial patterns based on an ecological security patterns. The layout of the territory spatial pattern in 2030 was studied under the following four modes: the expansion of the living space, development of the production space, protection of ecological space and comprehensive optimization scenario, and finally an optimization of the territorial spatial pattern of the study area was formed as coordinated living－production－ecological space. The results revealed that: using the MCR and the cumulative cost distance model to construct the ecological security pattern of urban agglomeration, five functional zones of ecological security patterns were formed, which were as follows: the core area of ecological space protection, edge area of ecological space

收稿日期:2020－11－12　修回日期:2021－02－07

基金项目:国家自然科学基金项目(41761081)和昆明理工大学引进人才科研启动基金项目(KKZ3202021055)

作者简介:林伊琳(1991—),女,讲师,博士,主要从事国土空间规划与演化模拟研究,E-mail:601960754@qq.com

通信作者:赵俊三(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事 GIS 和国土资源信息化研究,E-mail:junsanzhao@netease.com

protection, key area of production space development, edge area of production space development and concentration area of living space expansion. Coupled with MCR - FLUS - Markov model, optimal allocation results for living - production - ecological space were obtained for four scenarios in 2030, and the focus of the various scenario simulations set by the research were different. According to their dominant functions and multi-functional natures of the territory space, the optimized layout of the living - production - ecological space under the comprehensive scenario plan for the urban agglomeration in central Yunnan in 2030 were divided into living, production, ecological, living - production, living - ecological, production - ecological, living - production - ecological spaces, with the area of the production - ecological and ecological space as the smallest and largest, respectively. It was believed that a comprehensive scenario plan based on the coordination of the living - production - ecological space would be more reasonable, and the other three scenarios can be used to supplement and adjust the implementation of the fundamental, comprehensive scenario plan.

Key words: regional territory space pattern; ecological security pattern; living - production - ecological space; optimization allocation; MCR - FLUS - Markov model

0 引言

生产、生活、生态空间构成的三生空间是国土空间研究范式[1],落实到土地利用上则反映了土地的利用方式,也反映了物质空间环境之间存在的复合型功能特征,即生产功能、生活功能和生态功能[2],各功能之间存在的交叉重叠阻碍了三生空间的协调发展。目前,国土空间规划工作正在积极推进,用地功能的多元化发展、用地结构的改变致使国土空间功能不断扩张,主体功能逐渐凸显。国土空间格局优化的目的是实现“生活-生产-生态空间”在空间布局上的协调配置,追求国土空间整体效益的最大化[3]。准确判别三生空间主体功能、并对其结构布局进行优化,有利于确定区域定位和发展重点,为实现区域三生空间的有序发展以及相关规划的制定提供决策依据。

国土空间格局优化模拟已成为研究热点。国内研究大多以土地资源为研究对象,对国土空间资源进行优化配置[4-6]。在研究方法上,以智能算法应用居多,包括采用线性规划、目标规划、模拟退火、遗传算法、微粒群算法、蚁群算法等对土地利用数量结构进行优化[7-9],也有学者将 GIS 软件与元胞自动机模型(CA)、小尺度土地利用变化及其空间效应模型(CLUE - S)、未来土地利用模拟模型(FLUS)、Markov 模型、多智能体模型等相结合,开辟了国土空间数量结构和布局优化的新途径[10-13]。在研究目标上,通常根据不同规划目标和利益需求设置主导目标和约束条件,又或是以兼顾双目标或效益最大化的优化研究为主[14-16]。在国家推进生态文明建设的远景目标下,许多学者开始重视生态安全格局构建方面的研究[17-21],最小累积阻力模型(MCR)成为建立生态安全格局和优化生态空间的重要手段[17],用于探寻在生态安全格局下的国土空间优化配置方案,相关研究仍处于初探阶段。

将数量结构和空间布局优化相结合是当前国土空间格局优化配置研究领域的重要方向之一,将区域生态安全融入国土空间格局优化过程是实现区域国土空间资源可持续利用的关键。现有研究缺乏基于三生空间视角下的区域国土空间格局优化方法和路径的研究。本文以滇中城市群为例,从三生空间视角出发,提出一种基于生态安全格局的国土空间格局优化配置方法,即运用 MCR - FLUS - Markov 耦合模型,在“生活-生产-生态空间”协调的基础上进行滇中城市群国土空间格局优化研究,以期为滇中城市群生态环境保护、资源有效利用和国土空间规划编制提供理论参考。

1 研究区概况

滇中城市群地处中国西南部、云南省中部,为典型的高原山区城市。区域位于东经 100°43′ ~ 104°49′,北纬 24°58′ ~ 25°9′之间,由昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄彝族自治州及红河哈尼族彝族自治州北部 7 县市,共 49 个县(市、区)组成,国土面积为 111 402.00 km^2。属低纬度高海拔地区,地势起伏较大,呈现出多样的低纬高原季风气候类型和典型的立体气候特点,区域内土地资源包含有山、原、谷、盆,生态资源优越,生态系统服务功能较强。研究区位置如图 1 所示。

2 研究方法与数据

2.1 数据来源与处理

本文涉及的 2009、2015 年土地利用类型数据为矢量数据,比例尺 1∶10 000,坐标系为 GCS_Xian_1980,数据来源于土地利用现状年度更新数据库。借鉴最优样方尺寸计算方法[22],结合群域面积及计

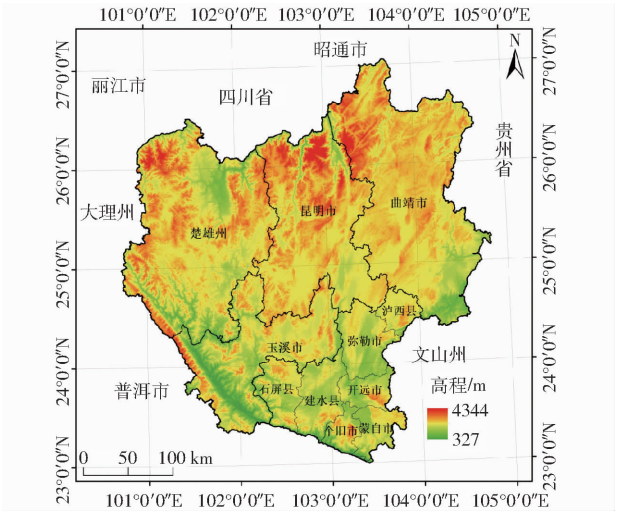


图 1　研究区地理区位图

Fig. 1　Location of study area

算机处理能力，将研究区划分为 500 m × 500 m 栅格单元，并运用 ArcGIS 软件将两期土地利用数据统一到该栅格尺寸下。从三生空间视角出发，在第二次全国土地利用调查分类和中国 LUCC（多时期土地利用土地覆被变化）遥感监测数据分类体系的基础上，以国土空间安全下的生态安全、粮食安全和经济社会发展安全为出发点，结合研究区生态保护红线和永久基本农田保护红线，建立滇中城市群三生空间类型与土地利用类型的衔接和融合关系[23]。涉及的地形数据有高程、坡度、坡向，高程采用 SRTM 30 m 分辨率的 DEM（数字高程模型）数据，坡度、坡向由 DEM 数据派生得到；交通、水系、居民点等距离数据通过欧氏距离法计算得到；人口密度、人均 GDP、人均可支配收入、年平均气温等经济社会数据由统计年鉴获取，以县为统计单元，通过 Kriging 插值法插值为栅格数据。2009、2015 年滇中城市群三生空间现状分布情况如图 2 所示。

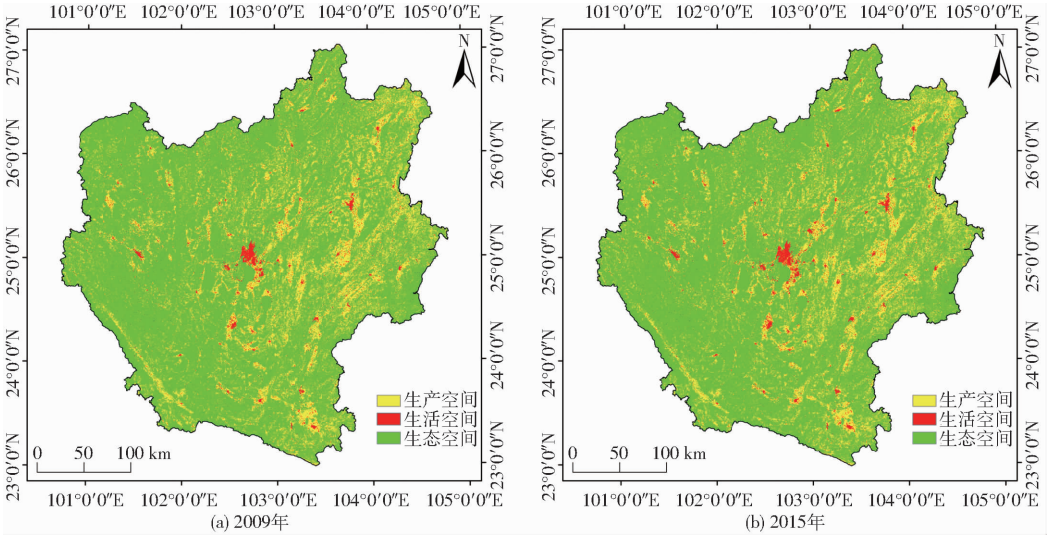


图 2　2009、2015 年滇中城市群三生空间现状分布图

Fig. 2　Distribution maps of current situation of living－production－ecological spaces of study area

2.2　生态安全格局识别

与社会经济因素的不确定性相比，生态环境因素对国土空间格局变化的约束是相对稳定的，所以从生态约束的角度建立国土空间格局优化配置模型的方法可行。将国土空间格局扩张看作是生态源和扩张源向四周扩散，借助 GIS 技术，构建 MCR 模型以表达两种国土空间资源的空间跨越特点[24－25]，以最小累积阻力差值结果作为构建研究区生态安全格局的依据。

2.2.1　目标源确定

在生态安全格局识别中最重要的步骤就是确定目标源地。生态保护红线的划定对象为研究区内生态保护的核心区，其中包括国家级和省级重点风景名胜区、自然保护区、国家森林公园、城市水源地、水源涵养区、世界自然和文化遗产地等的部分重要区域，这些核心区具有重要生态功能或高度生态敏感性和脆弱性[26]，以其作为生态源，是维系滇中城市群生态安全的基本保障区域，原则上任何城市扩张行为均不得占用。同时考虑为消除细碎图斑对生态安全格局构建的影响，综合研究区实际情况，提取生态保护红线区内图斑面积大于 5 km^2 的单个图斑作为生态源地，生活空间扩张源主要是指城市群内城镇用地和农村居民点用地。

2.2.2　阻力因子选取

选取高程、坡度、土地利用类型、土壤类型、植被覆盖度、年均气温、年均降水量、与道路距离、与水体距离 9 个指标作为生态源、生活空间扩张源阻力因子[20,27－29]。同时对各阻力因子等级进行划分并采用层次分析法确定权重。每个因子划分为 5 个等级：1、2、3、4、5，等级越低，阻力越小，表示生

态源越容易得到保护和维持,反之则表示生活空间扩张能力越强。两个过程的阻力分级相反。各个目标源阻力因子分级及权重赋值如表 1 所示。高程、坡度分级参照文献[23]进行划分;土地利用类型依据土地利用分类及转换标准(八大类转换)重分类为 5 级;土壤类型采用中国土壤类型空间分布数据并提取研究区内土壤类型数据,以土壤属性为依据对其进行等级划分;植被覆盖度采用 2015 年云南省公里格网归一化植被指数数据集并提取研究区内数据,运用 ENVI 软件计算植被覆盖度指数,参照文献[28-29]并结合研究区实际,对其进行等级划分;气温、降水数据分级依据研究区实际划分;与道路、水体距离的分级标准参照文献[20]并结合研究区实际划分。

表 1 生态源、扩张源阻力因子分级及权重

Tab.1 Classification and weight of resistance factors of ecological source and expansion source

阻力因子	阻力因子分级(生态源/扩张源)					权重
	1(低阻力)/5(高阻力)	2(较低阻力)/4(较高阻力)	3(中等阻力)/3(中等阻力)	4(较高阻力)/2(较低阻力)	5(高阻力)/1(低阻力)	
高程/m	>3 500	2 500~3 500	1 500~2 500	500~1 500	0~500	0.131 1
坡度/(°)	>25	15~25	8~15	2~8	0~2	0.131 6
土地利用类型	林地、水域	草地、园地	耕地	未利用地	城镇	0.144 7
土壤类型	黄棕壤、棕壤、暗棕壤、黑毡土	燥红土、粗骨土、草甸土、山地草甸土、赤红壤、红壤	新积土、紫色土、水稻土、砖红壤、黄壤	红粘土、沼泽土	石灰土、岩石	0.079 3
植被覆盖度/%	>75	60~75	45~60	30~45	0~30	0.148 9
年均气温/℃	0~15	15~17	17~19	19~21	>21	0.063 4
年均降水量/mm	>780	741~780	705~741	672~705	0~672	0.069 2
与道路距离/m	>9 500	6 500~9 500	3 500~6 500	1 500~3 500	0~1 500	0.108 7
与水体距离/m	0~10 000	10 000~50 000	50 000~100 000	100 000~150 000	>150 000	0.123 1

2.2.3 阻力面建立

为了反映生态源和扩张源运行的空间态势,采用 MCR 模型建立生态源地与生活空间扩张源地这两个生态变化过程的最小累积阻力面。MCR 模型计算公式为

$$C_M = f\sum D_{ij}R_i \tag{1}$$

式中 C_M——空间中任一像元中心的最小阻力与其到所有源地的距离关系函数

f——未知负函数,表示最小累积阻力与其到所有源地的负相关关系

D_{ij}——物种从源地 j 穿过景观 i 到空间某像元的距离

R_i——物种穿越景观表面 i 的阻力值

2.2.4 累积耗费距离模型

累积耗费距离模型的计算原理是以图论为基础,通过方程计算每个空间单元到源地运动过程中的最小累积耗费距离。采用网格图解法分析国土空间类型格局的性质,用节点-链接的像元表示法来表示某一代价表面,像元的中心称为目标节点,每个目标节点被多条链连接,每条链表示一定大小的阻力,该阻力与该代价表面上的各个像元所代表的耗费值和运动方向有关[30]。累积耗费距离表达式为

$$D_{k1} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(C_i + C_{i+1}) \tag{2}$$

$$D_{k2} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sum_{i=1}^{n}(C_i + C_{i+1}) \tag{3}$$

式中 C_i——第 i 个像元的耗费距离

n——像元总数

D_{k1}——通过某一代价表面沿像元水平或垂直方向运动到源地的累积耗费距离

D_{k2}——通过某一代价表面沿像元的对角线方向运动到源地的累积耗费距离

2.3 FLUS 模型

FLUS 主要用于模拟大尺度乃至全球尺度的未来各种土地利用类型在不同的土地需求情景下的空间分布情况[31],也是目前较为成熟且被广泛应用的土地利用优化配置模型。该模型由基于神经网络的适宜性概率计算和基于自适应惯性竞争机制的元胞自动机模块构成。前者主要通过对影响土地利用变化的驱动因子在空间上的分布进行样本采样和神经网络训练,从而得到各用地类型在各栅格上的适宜性概率;后者则基于适宜性概率分布计算出各栅格在规定时间上转化成某种用地类型的总概率,并且在 CA 迭代时间内将适宜性概率高的用地类型分配到栅格中,最终实现土地利用布局模拟。FLUS 模型模拟实验相关参数及具体设置情况如表 2 所示。

表 2　FLUS 模型模拟实验相关参数及具体设置情况

Tab. 2　Relevant parameters and specific settings of simulation experiment of FLUS model

模型运行模块	主要参数	说明及要求	具体设置情况
基于神经网络的适宜性概率计算模块	Land Use Data	初始年份用地类型栅格数据，用地类型编号从 1 开始，属于区域内的用地类型设置为“Valid Data”，区域外设置为“NoData Value”	研究区国土空间类型共 3 种；初始年份：2009 年
	ANN Training	设置神经网络获取训练样本的采样模式、采样比例及隐藏层数	采样模式：均匀采样模式 采样比例：20，即采样点占研究区有效像元的 2% 隐藏层数：12（默认值），层数增高可降低误差，提高概率数据精度
	Save Path	设置存放路径及输出概率数据的精度类型	数据精度类型：Single Accuray
	Driving Data	加载驱动因子栅格数据，各因子数据的行列数要与用地类型栅格数据保持一致	研究区驱动因子共 14 个，用于神经网络适宜性概率计算
基于自适应惯性机制的元胞自动机	Land Use Data	数据说明及要求同上模块中的“Land Use Data”	初始年份：2009 年、2015 年
	Probability Data	加载适宜性概率数据	基于神经网络的适宜性概率计算模块得到的各用地类型的分布概率数据
	Restricted Data	输入约束用地变化的限制数据。该数据为二值数据，即“0”和“1”两个数值。数值 0 表示不允许用地类型发生转化，1 表示允许发生转化	研究区含有滇池和抚仙湖等多个流域，湖面面积 625.14 km^2，将其作为限制区域
	Simulation Setting	设置模拟参数。参数包括：迭代次数：300；邻域大小：3×3；加速因子：0.1（默认）；初始年份的用地类型像元数：2009 年各用地类型数量；模拟的目标像元数：2015 年各用地类型数量；成本转换矩阵：根据研究区 2009—2015 年国土空间格局面积转移矩阵设置；邻域因子参数：参数范围 0～1，越接近 1 表示该用地类型的扩张能力越强，该参数设置情况经多次对比调整后确定	
	Save Simulation Result	设置模拟结果保存路径	

2.4　Markov 模型

Markov 模型主要用于预测国土空间类型在数量上的变化情况，具有无后效性和平稳性特征[32]。在国土空间格局变化研究中，将国土空间类型变化过程视为 Markov 过程，将某一时刻的国土空间类型对应于 Markov 过程中的可能状态，它只与前一时刻的国土空间类型相关，国土空间类型之间相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率。本文将滇中城市群生态安全格局下各生态功能分区面积作为目标函数的约束条件；重点考虑群域内国土资源开发与保护以及生态保护下三生空间的需求，利用 Markov 模型，分别模拟 2030 年生活空间扩张情景、生产空间开发情景和生态空间保护情景下各国土空间类型用地需求量。

2.5　MCR－FLUS－Markov 模型的优化配置原理

运用 MCR－FLUS－Markov 模型进行滇中城市群国土空间格局优化配置，其优势在于集合了 MCR 模型可以通过生态过程对国土空间景观单元进行优化调整，FLUS 模型处理国土空间复杂系统在空间上变化的能力和 Markov 在预测未来国土空间类型数量上的特点。通过 3 个模型的耦合，一方面在空间和数量上实现对国土空间动态演变信息的充分挖掘，另一方面在国土空间格局优化中，使其具有最高生态安全格局特征。MCR－FLUS－Markov 模型的空间分配结构图如图 3 所示。

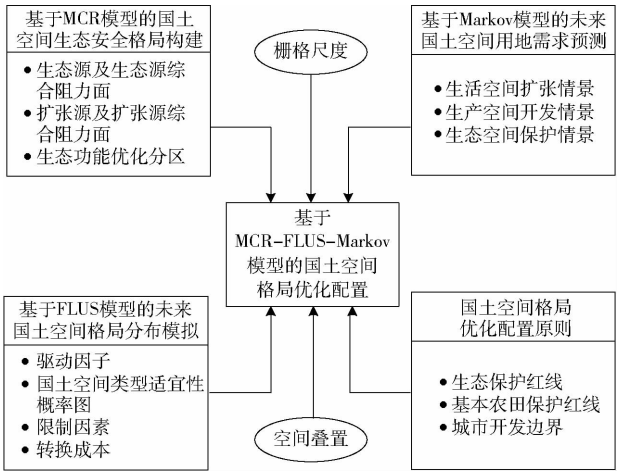


图 3　MCR－FLUS－Markov 模型的分配结构图

Fig. 3　Distribution structure diagram of MCR－FLUS－Markov model

3　结果与分析

3.1　FLUS 模型模拟结果精度检验

以 2009 年滇中城市群国土空间分布现状为基期数据，模拟 2015 年国土空间分布情况，结果如图 4 所示。FLUS 模型模拟的 2015 年研究区国土空

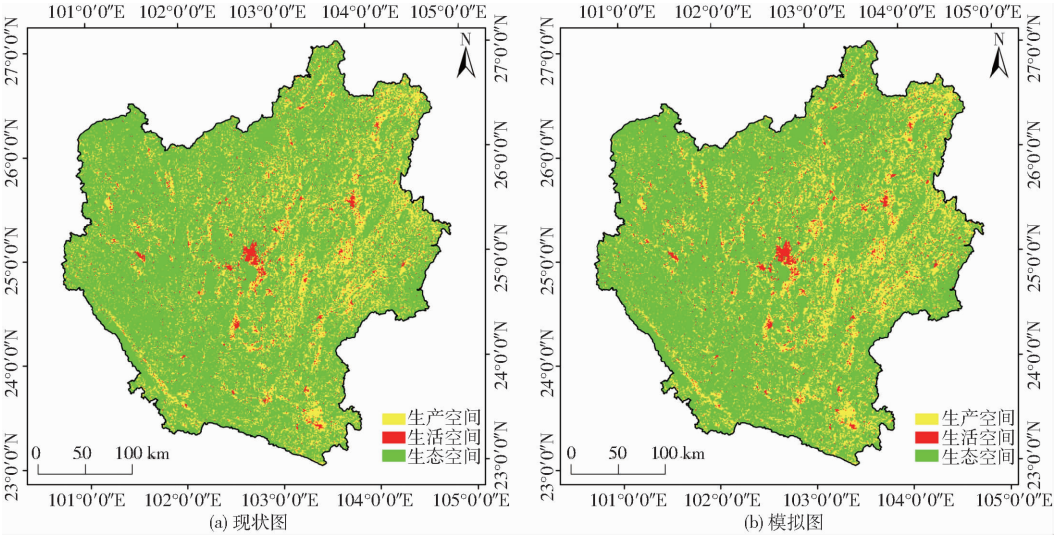


图 4 2015 年国土空间格局现状图及模拟图

Fig. 4 Current situation and simulation map of territory spatial pattern in 2015

间格局总体精度为 98.07%，Kappa 系数为 0.968 4，空间分布模拟效果良好，模型及模拟数据可作为优化配置研究的基础。

3.2 滇中城市群生态安全格局构建

3.2.1 目标源综合阻力面

(1)生态源阻力面建立

根据表 1 生态源阻力因子分级情况，重分类后得到各阻力因子空间分布图(图 5)，再将各阻力因子空间分布图进行加权求和后根据值域分为 5 个等级，得到生态源综合阻力因子等级图(图 6)。

(2)扩张源阻力面建立

采用上述同样的方法得到生活空间扩张源阻力因子等级系列图(图 7)和综合阻力因子等级图(图 8)。

3.2.2 最小累积阻力面计算

运用 ArcGIS 软件中的 Cost Distance 分析功能分别计算两个目标源地的最小累积阻力面，记为 MCR 生态源和 MCR 扩张源，再求得生态源与扩张源阻力面的差值面。基于 MCR 差值与面积曲线进行突变检测[25]。从图 9 中可以看出，栅格数目随最小累积阻力差值的增大呈先增后降趋势，当 MCR 差值为 -23 960.674 1、-6 590.245 8、7 306.096 8 和 21 202.439 5 时，栅格数目存在一个突变过程。将突变点上的阻力值作为细化分区的阈值，结合实际，建立滇中城市群综合生态安全格局下的国土空间利用优化配置分区，即生态空间保护核心区、生态空间保护边缘区、生产空间开发重点区、生产空间开发边缘区和生活空间扩张集中区。

3.2.3 生态功能优化分区

根据研究区综合生态安全格局下的国土空间利用优化配置分区结果(图 10、表 3)，生态空间保护核心区以生态环境保护为主导，禁止开展任何开发建设活动，这些区域地势较高，森林密布，作为研究区各类自然保护区的核心地带，中部及东部分布相对较少；生态空间保护边缘区应该在保护的基础上进行合理开发利用，该类区域主要以天然牧草地、灌木林地等组成，属水源涵养林的生态过渡区，也是保障研究区生态安全的屏障；生态空间保护核心区和生态空间开发边缘区均为生态空间，总体以生态保护及恢复为主，原则上不得用作其他用途。生产空间开发重点区以农业生产开发为主，主要以耕地、基本农田、园地和高原农业组成；生产空间开发边缘区作为生活空间扩张集中区与生产空间开发重点区的过渡带，主要分布有少量质量较差的耕地和一些未利用地，是今后国土整治、国土开发利用的重点区域，也是工矿生产空间开发的后备用地，还可适当作为生活空间扩张用地；生活空间扩张集中区主要包括现已开发建成的生活空间和重点建设的县域及周边具有扩张潜力的区域，作为今后生活空间集中扩张区域。

3.3 不同情景方案国土空间格局优化配置预测

将研究区生态安全格局功能分区作为目标函数约束条件，并根据 3 种情景下各空间类型用地需求，利用 FLUS 模型模拟 2030 年生活空间扩张情景、生产空间开发情景和生态空间保护情景下研究区“生活-生产-生态空间”分布情况。生活空间扩张情景主要为城镇用地和农村居民点用地扩张区域，为满足人口增加对生活空间的需求而进行生活空间的扩张。生产空间开发情景是以粮食安全和经济社会发展安全为出发点，为维护一定数量的耕地数量以满足人类社会发展对粮食的需求，同时保证其他产业生产空间稳定，以达到经济社会发展的完美融合。生态空间保护情景是从顾及生态安全优先的国家战

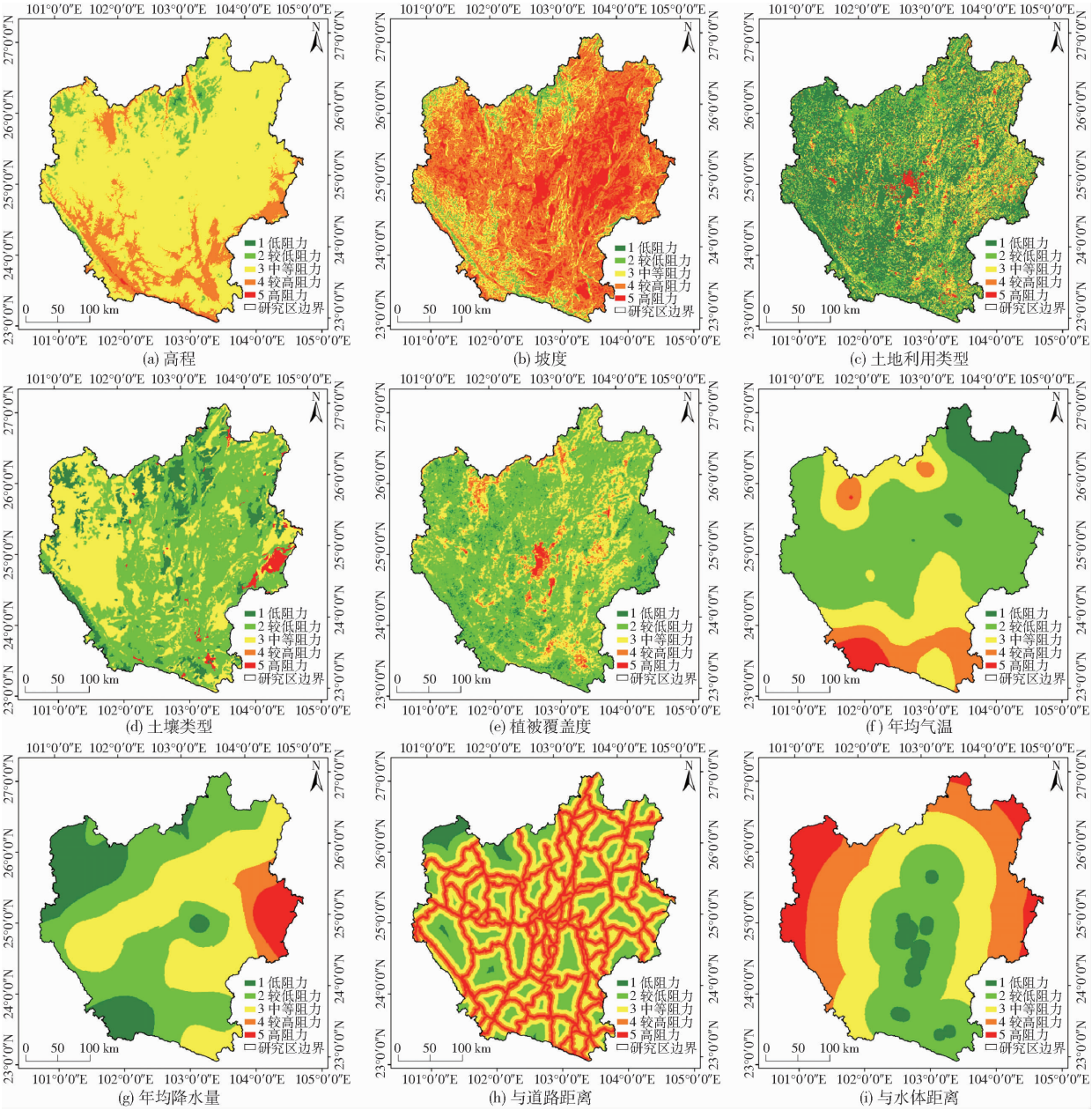


图 5　生态源阻力因子等级系列图

Fig. 5　Series of ecological source resistance factors

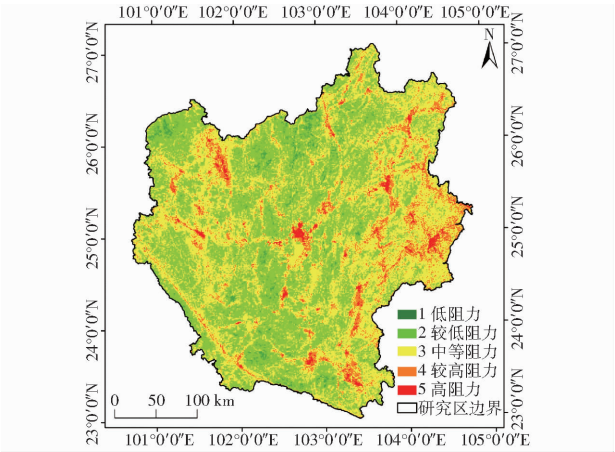


图 6　生态源综合阻力因子等级图

Fig. 6　Comprehensive resistance factor grade map of ecological source

略角度出发，重点保护研究区天然林地和水域。结果表明：生活空间扩张情景中，生活空间、生产空间、生态空间的面积分别为 4 817.02、30 192.90、76 392.08 km^2；生产空间开发情景中，生活空间、生产空间、生态空间的面积分别为 4 391.49、30 986.63、76 023.89 km^2；生态空间保护情景中，生活空间、生产空间、生态空间的面积分别为 4 142.69、30 101.86、77 157.45 km^2。3 种情景下“生活-生产-生态空间”的分布情况如图 11 所示。

3.4　综合情景方案国土空间格局预测结果

基于上述 3 种情景方案下研究区 2030 年国土空间类型优化配置结果，采用 ArcGIS 软件中空间叠置功能，对生活空间扩张情景、生产空间开发情景和生态空间保护情景模拟结果图在空间上进行叠加分

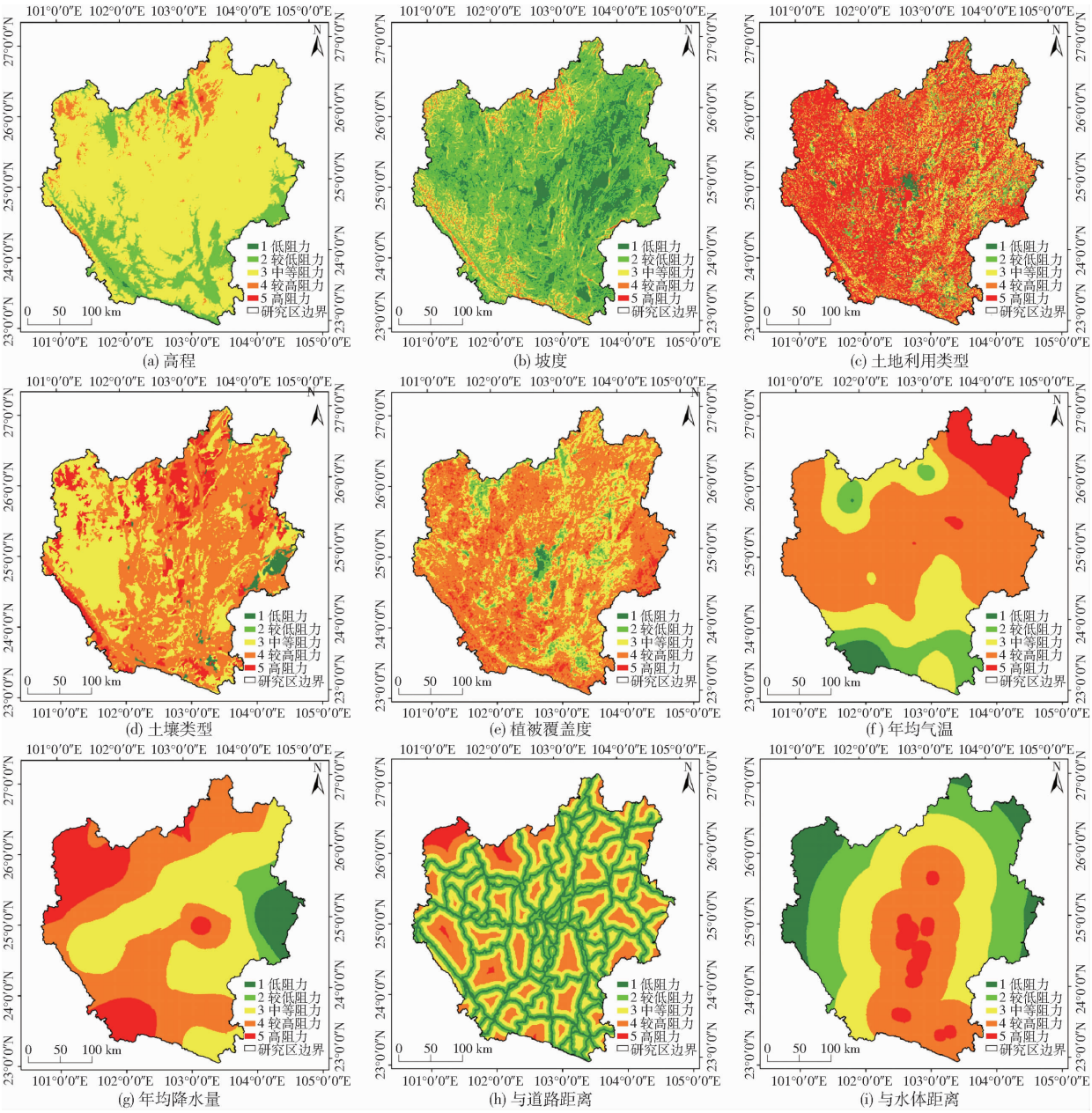


图 7 扩张源阻力因子等级系列图

Fig. 7 Series of expansion source resistance factors

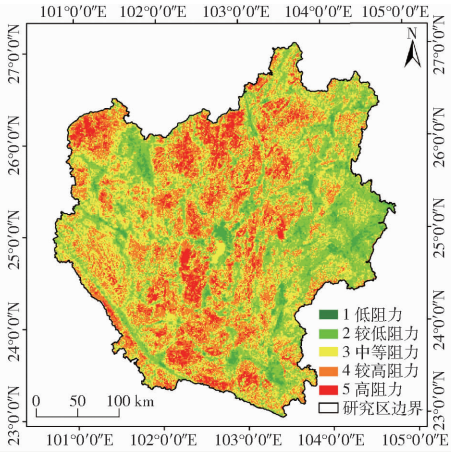


图 8 扩张源综合阻力因子等级图

Fig. 8 Comprehensive resistance factor grade map of expansion source

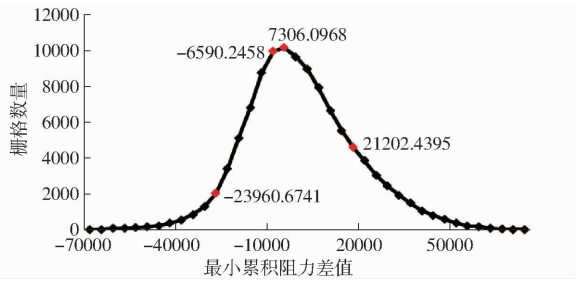


图 9 最小累积阻力差值与栅格数目的关系

Fig. 9 Relationship between minimum accumulated resistance difference and number of grids

析。遵循以下原则进行滇中城市群各国土空间类型在空间布局上的优化配置。首先,坚持生态优先为前提,保障群域生态空间面积,将叠加结果中处于生态空间内部且与生态空间冲突的区域以及生态保护

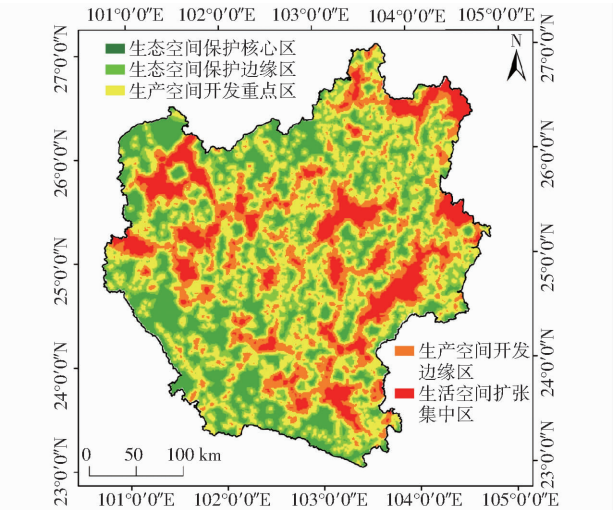


图 10　生态安全格局功能分区

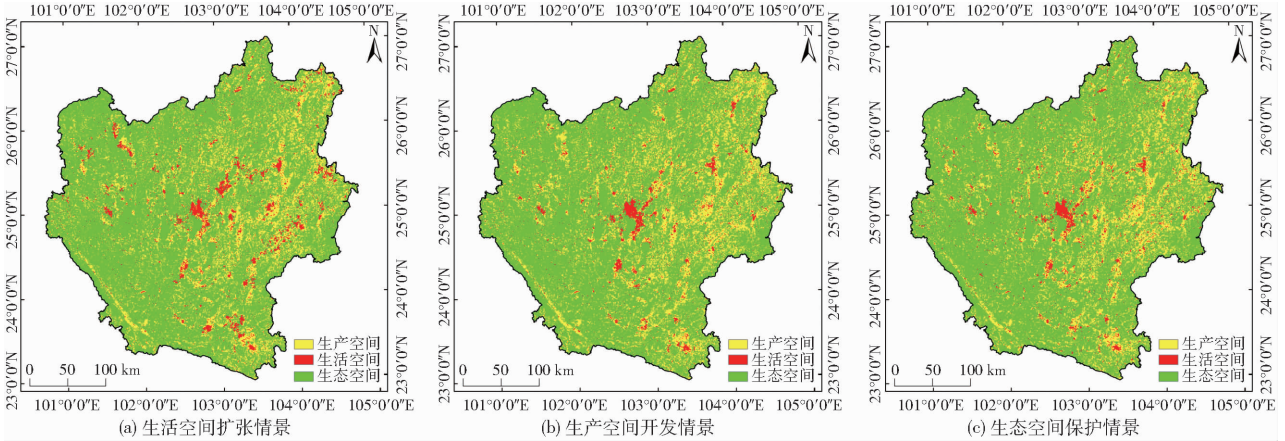
Fig. 10　Functional zoning of ecological security pattern

红线区全部划为生态空间；其次，保证区域生产空间结构稳定，严守基本农田保护红线，将坝区破碎化程度较高的生活空间与基本农田保护红线区划为生产空间；最后，根据收集的部分市、县相关规划中的城市开发边界以及叠加结果适度调整生活空间扩张规模，实现群域“生活-生产-生态空间”用地之间的相互协调。根据国土空间的主导功能及多功能性，分为 7 大类：生活空间、生产空间、生态空间、生活-生产空间、生活-生态空间、生产-生态空间和生活-生产-生态空间（图 12）。其中，生活空间面积为 3 423.73 km^2，生产空间面积为 30 393.16 km^2，生态空间面积为 77 242.83 km^2，生活-生态空间面积为 94.97 km^2，生活-生产空间面积为 106.25 km^2，生产-生态空间面积为 53.64 km^2，生活-生产-生态空间面积

表 3　生态安全格局功能分区统计

Tab. 3　Functional zoning statistics of ecological security pattern

功能分区	面积/km^2	百分比/%	主要分布区域
生态空间保护核心区	28 058.21	27.67	生态源周围，以研究区的北部、西北部、西部和西南部呈大面积分布
生态空间保护边缘区	24 336.41	24.00	生态空间保护核心区周围，主要分布在研究区中部、东部及东北部
生产空间开发重点区	15 639.84	15.42	主要分布于研究区的东北部、西北部、西南部和东部
生产空间开发边缘区	20 917.04	20.63	主要分布于研究区的中部、东部、西北部、东北部和西南部
生活空间扩张集中区	12 450.50	12.28	主要分布于研究区的中部、东部、西北部、东北部及南部的少部分区域



(a) 生活空间扩张情景　(b) 生产空间开发情景　(c) 生态空间保护情景

图 11　2030 年滇中城市群 3 种情景方案下国土空间类型优化配置结果

Fig. 11　Results of optimal allocation of territory spatial types under three scenarios of study area in 2030

为 87.42 km^2。此外，还看出，基于“生活-生产-生态空间”协调下的 2030 年研究区各国土空间类型的空间分布聚集效应显现。

（1）生活空间：如图 12 所示，主要是研究区中部、东部、南部及西北部地区生活空间出现增加。扩张布局总体较为紧凑，有集约节约用地的趋势。扩张位置主要分布在生产空间周围。在满足人类生活居住的情况下，应实施“退房还林”、“退房还湖”，将偏远山区的生活空间转变为生态空间，同时在该区域内，应在合理的限度内进行开发利用，在优先保护生态环境的前提下，可开展生产开发活动。

（2）生产空间：研究区东部、中部和南部地区的生产空间面积减少明显。严禁研究区内其他用地类型的开发建设占用基本农田，基本农田保护区与城镇建设用地之间要有一定的隔离带。如图 12 所示，针对研究区西北部、东北部、西南部以及东西部大部分地区生活空间扩张建设较为粗放的地区，应进行集中的综合整治，降低居住环境恶劣和交通不便地区的生活空间规模，对基础设施等生活条件较差的生活空间进行整体搬迁，转为生产空间进行开发利用。同时开展农村居民点用地和建制镇用地的集约节约开发，分区保护和综合治理，通过对生活空间的

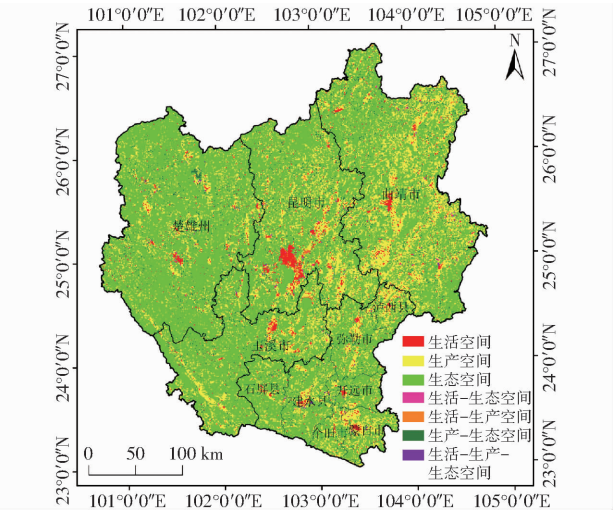


图 12 “生活-生产-生态空间”协调下的 2030 年国土空间格局优化结果

Fig. 12 Optimization results of territory spatial pattern in 2030 under coordination of living - production - ecological space

整治,实现耕地总量动态平衡。另外,研究区特有的地势条件造成坝区耕地资源有限,应实施差别化土地政策,引导生活空间和生产空间向坝区边缘适建山地发展。

(3)生态空间:研究区生态空间略有增加,主要集中在生态保护红线区范围。区域内包括国家级和省级重点风景名胜区、自然保护区、国家森林公园等部分重要区域,生态敏感性较高,是维持研究区整体生态安全的重要区域。故此,应严厉禁止对这些区域内的生态用地进行任何形式的开发建设活动,且针对不同保护区采取不同的保护措施进行保护。

(4)生活-生态空间:主要分布于研究区东部、中部、西北部、西南部和南部,其余地区零星分布。该区域的生态敏感性处于中间等级,可用于生态空间进行生态环境保护和重建,根据《云南省主体功能区规划》的主体功能区定位要求在优先保障生态空间的基础上也可以进行生活空间扩张建设,同时在该区域应进一步加强基础设施和公共服务设施建设,科学合理规划各类生活及生态区。

(5)生活-生产空间:主要分布在研究区中部、东部、西南部,西北部有少量分布。该优化结果与滇中城市群规划结果较为一致,昆明市主城区内不适宜发展劳动密集型产业,应布局在外围的宜良县、晋宁区等区域,重化工向嵩明县-寻甸-东川的特定区域转移。曲靖市作为重要新型工业基地,优势的农业生产资源和生产能力也使其在未来农业发展中将成为滇中农业发展的重点;此外,曲靖半小时经济圈具备广阔的城镇及产业发展空间。楚雄州作为滇中城市群中相对弱的一个州,重点发展农副产品加工和民族文化产业;蒙自市、建水县、开远市、弥勒市和个旧市,重点发展旅游、烟草、新材料、机械制造与现代农业等。因此,该优化区域内可按照各州市规划引导,进行农产品种植和其他产业开发,以促进经济发展;也可进行建设用地的扩张,以满足人口日益增长对生活用地的需求。

(6)生产-生态空间:主要分布在西北部、东部、南部和西南部,其他地区零星分布。该区域应优先作为生态空间进行保护,或进行生态-农业产业种植,也可进行风景名胜区等工矿生产空间的开发和建设。譬如,楚雄州应大力整合民族文化资源,以文化资源引导旅游业发展。玉溪市作为亚洲最大的烟草产业基地,具有良好的生态环境,产业发展过程中应尽可能避免对生态环境造成破坏,应优先发展旅游、教育、高新产业等绿色环保型产业。

(7)生活-生产-生态空间:主要分布于研究区西北部、中部、东部,其他地区零星分布。该区域国土空间利用功能最为多样,应重点作为生态空间进行保护,满足生态空间需求后可考虑用于生活空间、基础设施和公共服务设施等工矿生产空间的开发建设,增加居民生活居住及活动区范围,也可用于生产空间开发,增加耕地数量。因此,在优先保障生态空间供给的前提下,适当扩张大生活空间和完善公共基础设施建设,提高生产空间效率,推动研究区国土空间协调利用,促进生活-生产-生态空间高效配置与绿色发展。

4 讨论

(1)融入区域生态安全的国土空间格局优化

以往的国土空间优化配置多侧重于数量结构上的优化,较少顾及国土空间布局优化,生态安全方面考虑更显不足。国土资源生态安全格局对维护和控制区域国土资源水平生态过程中有着关键作用[33-34]。本文从“三生空间”视角出发,运用 MCR - FLUS - Markov 模型,提出一种基于生态安全格局的国土空间格局优化配置新方法。将维护生态区域安全融入到国土空间格局优化过程中,探究在“生活-生产-生态空间”协调下的滇中城市群国土空间格局优化配置方案。

(2)区域国土空间布局综合优化

与现状相比,滇中城市群国土空间布局综合优化后 2030 年生活空间和生产空间的变动导致了经济效益和社会效益有所下降,但在生态优化过程中,不合理的用地空间类型转为了生态空间,使得生态效益提升显著。此外,优化后的空间结构与《滇中城市群规划》相比,考虑了生物物理因素和社会经济因素对用地空间布局的影响,顾及了用地配置的

复杂性和灵活性，满足了生活空间扩张、生产空间开发和生态空间保护需求，还划定了综合功能区，用地空间布局更具实用性。

5　结论

（1）以生态保护红线作为生态源地，以城镇用地和农村居民点用地作为生活空间扩张源，选取 9 个阻力因子、采用 MCR 模型和累积耗费距离模型构建滇中城市群生态安全格局，并结合实际进行了综合生态安全格局下的生态功能优化分区：生态空间保护核心区、生态空间保护边缘区、生产空间开发重点区、生产空间开发边缘区和生活空间扩张集中区，其中生态空间保护核心区面积最大，生活空间扩张集中区面积最小。

（2）通过 MCR－FLUS－Markov 模型得到滇中城市群 2030 年 3 种情景下国土空间格局优化预测结果。在 3 种情景下“生活-生产-生态空间”的面积和空间分布均存在较大差异。在生活空间扩张情景下，生活空间扩张主要分布在城市群中部、东部和南部地区，边远地区的生活空间转变为生态空间，随着城乡一体化建设的加速，生活空间明显增加，并愈加趋向集约、节约利用，分布也愈加集中化；在生产空间开发情景下，生活空间扩张规模得到控制，在一定程度上也控制了生产空间规模的减少，边远山区、交通设施落后区和居民点分散区的生活空间转变为生产空间和生态空间，但仍需大力提高闲置地的开发潜力，适当减小环境恶劣地区、交通不便地区和居民点破碎化程度较高的区域生活空间面积，对不适宜居住的区域应整体搬迁，并压缩村庄规模，将这些生活空间用于农业生产，进行开发利用；在生态空间保护情景下，生产空间面积少量减小、生活空间面积少量增加，城市群西北部、东北部、东部的生产空间转变为生态空间，西北部的生态空间转变为生活空间和生产空间，而在居民集中度较高的地区，在原生活空间的基础上生活空间向周围扩张。今后应继续大力植树造林，对重要水源进行保护，对现有生活空间、生产空间进行重点优化，以提高国土资源利用率。

（3）对滇中城市群 3 种情景空间进行综合叠加分析，坚持以生态优先为前提，保证城市群生产空间结构稳定，严守基本农田保护红线，并结合各州市的城市开发边界对冲突区域进行修正，得到“生活-生产-生态空间”协调下的 2030 年滇中城市群国土空间格局优化布局方案。根据国土空间的主导功能及多功能性，将城市群分为 7 种空间类型：生活空间、生产空间、生态空间、生活-生产空间、生活-生态空间、生产-生态空间和生活-生产-生态空间，各类空间面积存在较大差异，其中以生产-生态空间面积最小，生态空间面积最大。根据优化配置结果，结合城市群内各县域发展特点，指出各空间类型的生产、生活开发和生态保护建设的重点及方向，并提出了相关建议措施。

（4）本文设定的情景模拟侧重点不同，基于“生活-生产-生态空间”协调的综合情景不仅考虑了生活空间扩张、生产空间开发和生态空间保护的需求，而且还划定了综合功能区，因此综合情景方案更为合理，其他 3 种情景方案可为综合情景方案的实施进行补充和调整。

参　考　文　献

[1] 时振钦，邓伟，张少尧. 近 25 年横断山区国土空间格局与时空变化研究[J]. 地理研究，2018，37(3)：607－621.
SHI Zhenqin, DENG Wei, ZHANG Shaoyao. Spatial pattern and spatio-temporal change of territory space in Hengduan Mountains region in recent 25 years[J]. Geographical Research, 2018, 37(3): 607－621. (in Chinese)

[2] 邓玉婷. 基于“三生”功能协调的乡村空间规划探索——以箭塔村为例[C]//2018 城市发展与规划论文集，2018：595－600.

[3] 徐磊，董捷，李璐，等. 基于功能分区视角的长江中游城市群国土空间特征及优化[J]. 经济地理，2017，37(6)：76－83.
XU Lei, DONG Jie, LI Lu, et al. Characteristics and optimization of geographical space in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River based on the function zoning[J]. Economic Geography, 2017, 37(6): 76－83. (in Chinese)

[4] TIAN Fenghao, LI Mingyu, HAN Xulong, et al. A production－living－ecological space model for land-use optimisation: a case study of the core Tumen River region in China[J]. Ecological Modelling, 2020, 437: 109310.

[5] 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.

[6] 陈红，史云扬，柯新利，等. 生态与经济协调目标下的郑州市土地利用空间优化配置[J]. 资源科学，2019，41(4)：717－728.
CHEN Hong, SHI Yunyang, KE Xinli, et al. Spatial optimization of land use based on the objective of coordinated ecological protection and economic development in Zhengzhou City[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 717－728. (in Chinese)

[7] 杨露，颉耀文，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.
YANG Lu, JIE Yaowen, ZONG Leli, et al. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model of agro-pastoral ecotone in Northwest China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(3): 568－579. (in Chinese)

[8] LIU Yaolin, LIU Dianfeng, LIU Yanfang, et al. Rural land use spatial allocation in the semiarid loess hilly area in China: using

a particle swarm optimization model equipped with multi-objective optimization techniques[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(7): 1166 - 1177.

[9] MA Shifa, LIU Feng, HE Jianhua, et al. Land-use spatial optimization based on PSO algorithm[J]. Geo-spatial Information Science, 2011,14(1): 54 - 61.

[10] 包塔娜,布仁,齐晓明,等. 基于多模型测度的内蒙古中部地区土地利用空间布局优化研究[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(11):110 - 117.

[11] 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.

[12] 赵筱青,王海波,杨树华,等. 基于 GIS 支持下的土地资源空间格局生态优化[J]. 生态学报,2009,29(9):4892 - 4901.
ZHAO Xiaoqing, WANG Haibo, YANG Shuhua, et al. GIS-based ecological optimization of spatial patterns of land resources [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(9):4892 - 4910. (in Chinese)

[13] 王培俊,孙煌,华宝龙,等. 基于 GeoSOS - FLUS 的福州市滨海地区生态系统服务价值评估与动态模拟[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):249 - 257.
WANG Peijun, SUN Huang, HUA Baolong, et al. Evaluation and dynamic simulation of ecosystem service value in coastal area of Fuzhou City based on GeoSOS - FLUS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):249 - 257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200329&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.029. (in Chinese)

[14] 王昱,丁四保,卢艳丽. 建设用地资源的空间优化配置:现状、矛盾与实现路径[J]. 经济问题探索,2012(4):7 - 12.

[15] 董品杰,赖红松. 基于多目标遗传算法的土地利用空间结构优化配置[J]. 地理与地理信息科学,2003,19(6): 52 - 55.

[16] 张鸿辉,曾永年,尹长林,等. 城市土地利用空间优化配置的多智能体系统与微粒群集成优化算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(8):1003 - 1007.
ZHANG Honghui, ZENG Yongnian, YIN Changlin, et al. Simulating spatial optimization allocation of urban land use based on the integration of multi-agent system and particle swarm optimization algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011,36(8):1003 - 1007. (in Chinese)

[17] 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.
YANG Tianrong, KUANG Wenhui, LIU Weidong, et al. Optimizing the layout of eco-spatial structure in Guanzhong urban agglomeration based on the ecological security pattern[J]. Geographical Research, 2017,36(3):441 - 452. (in Chinese)

[18] 程迎轩,王红梅,刘光盛,等. 基于最小累计阻力模型的生态用地空间布局优化[J]. 农业工程学报,2016,32(16): 248 - 257,315.
CHENG Yingxuan, WANG Hongmei, LIU Guangsheng, et al. Spatial layout optimization for ecological land based on minimum cumulative resistance model[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(16):248 - 257,315. (in Chinese)

[19] WEI Wei, SHI Peiji, ZHOU Junju, et al. Configuration partition of land use optimization in arid inland river basin based on ecological security pattern[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(18):9 - 18.

[20] 赵筱青,李思楠,谭琨,等. 城镇-农业-生态协调的高原湖泊流域土地利用优化[J]. 农业工程学报,2019,35(8):296 - 307,336.
ZHAO Xiaoqing, LI Sinan, TAN Kun, et al. Land use optimization of plateau lake basin based on town - agriculture - ecological spatial coordination[J]. Transactions of the CSAE, 2019 35(8):296 - 307,336. (in Chinese)

[21] 刘建华,张启斌,YANG Di,等. 基于 MCR - ANN - CA 模型的包头市生态用地演变模拟[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):187 - 194.
LIU Jianhua, ZHANG Qibin, YANG Di, et al. Simulation of ecological land transition in Baotou City based on MCR - ANN - CA model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):187 - 194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190221&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.021. (in Chinese)

[22] 郑东玉,慎利,李志鹏. 面向对象建筑物目标提取的最优分割尺度选择[J]. 地理信息世界,2018(5):87 - 93.

[23] 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/OL]. 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 the urban agglomeration in central Yunnan[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):176 - 191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190820&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.020. (in Chinese)

[24] 姜晓丽,杨伟. 基于"三生"空间视角的城市建设用地拓展适宜性[J]. 江苏农业科学,2019,47(16): 282 - 285.
JIANG Xiaoli, YANG Wei. Suitability evaluation of urban construction land exploitation based on production - living - ecology space[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(16): 282 - 285. (in Chinese)

[25] 江倩倩,罗先香,张龙军. 生态适宜性评价研究及在海洋环境中应用的思考[J]. 海洋环境科学,2016,35(1): 155 - 160.
JIANG Qianqian, LUO Xianxiang, ZHANG Longjun. Research on ecological suitability evaluation and thinking of its application in the marine environment[J]. Marine Environmental Science, 2016,35(1):155 - 160. (in Chinese)

[26] 林勇,樊景凤,温泉,等. 生态红线划分的理论和技术[J]. 生态学报,2016,36(5): 1244 - 1252.
LIN Yong, FAN Jingfeng, WEN Quan, et al. Primary exploration of ecological theories and technologies for delineation of ecological redline zones[J]. Acta Ecological Sincia, 2016,36(5): 1244 - 1252. (in Chinese)

(下转第 207 页)

NIU Yaxiao, ZHANG Liyuan, HAN Wenting, et al. Fractional vegetation cover extration method of winter wheat based on UAV remote sensing and vegetation index[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 212 - 221. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180424&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.024. (in Chinese)

[28] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2014.

[29] 张智韬,谭丞轩,许崇豪,等. 基于无人机多光谱遥感的玉米根域土壤含水率研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 246 - 257.
ZHANG Zhitao, TAN Chengxuan, XU Chonghao, et al. Retrieving soil moisture content in field maize root zone based on UAV multi spectral remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 246 - 257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190727&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.027. (in Chinese)

[30] 汪小钦,王苗苗,王绍强,等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 152 - 157.
WANG Xiaoqin, WANG Miaomiao, WANG Shaoqiang, et al. Vegetation information extraction based on remote sensing of UAV in visible band[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 152 - 157. (in Chinese)

[31] IHUOMA S O, MADRAMOOTOO C A. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104860.

[32] 梁树英,杨春宇. 中国不同光气候分区地面日光光谱的观测与分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(12): 3475 - 3479.
LIANG Shuying, YANG Chunyu. Observation and analysis of terrestrial solar spectra in different climatic regions in China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(12): 3475 - 3479. (in Chinese)

[33] HOUBORG R, FISHER J B, SKIDMORE A K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 43: 1 - 6.

[34] 李冰,刘镕源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 160 - 165.
LI Bing, LIU Rongyuan, LIU Suhong, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 160 - 165. (in Chinese)

[35] 傅银贞. 遥感植被指数分析及应用研究[D]. 福州:福州大学, 2010.

[36] YU K, LENZ-WIEDEMANN V, CHEN X, et al. Estimating leaf chlorophyll of barley at different growth stages using spectral indices to reduce soil background and canopy structure effects[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 97: 58 - 77.

[37] ASNER G, MARTIN R. Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3958 - 3970.

[38] WANG J, ALAN H S. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling light absorption and albedo of discontinuous canopies[J]. Science in China(Series B), 1995, 38(7): 807 - 816.

(上接第 170 页)

[27] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250 - 258.
YANG Shanshan, ZOU Changxin, SHEN Weishou, et al. Construction of ecological security patterns based on ecological red line: a case study of Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1): 250 - 258. (in Chinese)

[28] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6305 - 6311.
XIE Hualin. Review and the outlook of land use ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6305 - 6311. (in Chinese)

[29] 卓静. 基于 3S 技术的陕北地区生态环境遥感动态监测及评价[D]. 西安:西北大学, 2008.

[30] 魏伟,雷莉,范雯,等. 基于累积耗费距离理论的石羊河流域水土资源优化配置[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 532 - 540.
WEI Wei, LEI Li, FAN Wen, et al. Water-soil resources optimization based on accumulative cost resistance model in Shiyang River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 532 - 540. (in Chinese)

[31] LIU Xiaoping, LIANG Xun, LI Xia, 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(5): 94 - 116.

[32] 林晓丹,范胜龙,孙巧燕,等. 基于 GIS 和 Logistic 回归模型的土地利用空间模拟与分析[J]. 福建农林大学学报, 2017, 46(4): 468 - 473.
LIN Xiaodan, FAN Shenglong, SUN Qiaoyan, et al. Spatial simulation and analysis of land use pattern based on GIS technology and Logistic regression model: a case study in Longhai City[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 46(4): 468 - 173. (in Chinese)

[33] 彭树宏,钱静,陈劲松,等. 基于 CLUE - S 模型的干旱区典型绿洲城市土地利用变化时空动态模拟研究——以新疆奎屯河流域为例[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(3): 61 - 67, 129.

[34] 官冬杰,赵祖伦,王秋艳,等. 三峡库区景观生态安全格局优化研究——以重庆市开州区为例[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 171 - 177.
GUAN Dongjie, ZHAO Zulun, WANG Qiuyan, et al. Pattern of optimization of landscape ecology security in Three Gorges reservoir region: a case study of Kaizhou District of Chongqing City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 171 - 177. (in Chinese)