

DOI: 10.5846/stxb202105291413

张考, 黄春华, 王志远, 伍瑾意, 曾志强, 穆佳佳, 杨文艳. 基于 DTTD-MCR-PLUS 模型的三生空间格局优化——以长沙市为例. 生态学报, 2022, 42 (24): 9957-9970.

Zhang K, Huang C H, Wang Z Y, Wu J Y, Zeng Z Q, Mu J J, Yang W Y. Optimization of “production-living-ecological” spaces based on DTTD-MCR-PLUS Model: Taking Changsha City as an example. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (24): 9957-9970.

基于 DTTD-MCR-PLUS 模型的三生空间格局优化 ——以长沙市为例

张 考^{1,2}, 黄春华^{1,3,*}, 王志远^{1,3}, 伍瑾意^{2,4}, 曾志强², 穆佳佳², 杨文艳²

1 南华大学建筑学院, 衡阳 421001

2 浙江汉宇设计有限公司, 义乌 322000

3 湖南省健康城市营造工程技术中心, 衡阳 421001

4 南华大学土木工程学院, 衡阳 421001

摘要: 优化三生空间格局有助于实现区域国土空间可持续高质量发展。研究提出利用动态交通时间数据优化最小阻力成本模型指标体系, 对生态累计最小阻力与生活最小累计阻力差值进行聚类分析, 利用突变点对各情景下的三生空间数量进行优化, 从生活扩张、生态优先及基于资源与环境承载力视角下的粮食安全 3 个方面, 提出了一种基于 DTTD-MCR-PLUS 的三生空间格局优化方法。研究发现: (1) 基于动态数据优化的长沙市生态功能优化分区结果显示生态空间保护核心区面积为 4111.41 km², 生态空间保护边缘区面积为 2285.29 km², 生产空间开发重点区面积为 2144.79 km², 生产空间开发边缘区面积为 1928.59 km², 生活空间扩张集中区面积为 1235.55 km²; (2) 耦合 DTTD-MCR-PLUS 模型模拟的多情景结果表明: 生活优先情景下, 生活空间面积增幅高达 43.57%, 主要分布在望城区南部, 长沙县西部和雨花区东部; 生态优先情景下, 生态空间转出速度最低, 与生活优先情景相比下降了 3.11%; 粮食安全情景下, 生产空间侵占生态空间速度加快, 增幅高达 58.79%; (3) 协调基本农田、生态保护红线、以及自然保护区下的 2030 年长沙市三生空间格局优化布局方案结果表明: 生产空间、生活空间和生态空间比例分别为 37.63%、7.67% 和 54.70%。

关键词: 国土空间格局; PLUS 模型; 动态交通时间数据; 最小累计成本法; 生态安全格局; 三生空间

Optimization of “production-living-ecological” spaces based on DTTD-MCR-PLUS Model: Taking Changsha City as an example

ZHANG Kao^{1,2}, HUANG Chunhua^{1,3,*}, WANG Zhiyuan^{1,3}, WU Jinyi^{2,4}, ZENG Zhiqiang², MU Jiajia², YANG Wenyi²

1 School of Architecture, University of South China, Hengyang 421001, China

2 Zhejiang Hanyu Design Company Limited, Yiwu 322000, China

3 Hunan Healthy City Construction Engineering Technology Research Center Hengyang 421001, China

4 School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China

Abstract: Optimizing the spatial pattern of “production-living-ecological” spaces is conducive to achieving regional sustainable and high-quality development. This study introduced a methodology for optimizing the spatial pattern of “production-living-ecological” spaces, called DTTD-MCR-PLUS. Considering the spatial heterogeneity of land expansion costs, the Minimum Cumulative Resistance (MCR) method and mutation detection were applied to conduct quantity

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51876087); 国家自然科学基金重点项目 (U1867221); 南华大学博士科研启动基金 (190XQD047); 湖南省教育厅课题 (18C0418)

收稿日期: 2021-05-29; **网络出版日期:** 2022-08-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1977691619@qq.com

optimization in “production-living-ecological” spaces, and a patch-generating land use simulation (PLUS) model was used to reflect its spatial distribution under three different scenarios containing food security, ecological priority and production priority. Furtherly, the dynamic traffic time data (DTTD) was innovatively introduced to portray living and ecological space expansion cost. The research found that: (1) After the ecological function optimization zoning, the core protection area of Changsha’s ecological space was 4111.41 km², the edge protection area of ecological space was 2285.29 km², the key area of production space was 2144.79 km², and the area of production space was 1928.59 km². In addition, the area of the concentrated living space expansion area was 2570.99 km². (2) The multi-scenario results simulated by the coupled DTTD-MCR-PLUS model revealed that: under the living priority scenario, the living space area increased by 43.57%, which was mainly distributed in the southern part of the urban area, the western part of Changsha County, and the eastern part of Yuhua District. Under the ecological priority scenario, the land transition-out of ecological space is the lowest compared with other scenarios, which was 3.11% lower than that of living priority scenario. Under the food security scenario, the proportion of encroachment of production space into ecological space was accelerated, with an increase of up to 58.79%. (3) The results of coordinating the basic farmland, ecological protection red line, nature protected area, and the optimized Changsha’s “production-living-ecological” spaces in 2030 showed that, the proportions of production space, living space and ecological space were 37.63%, 7.67%, and 54.70%, respectively.

Key Words: Land space pattern; PLUS model; dynamic traffic time data; Minimum Cumulative Resistance; ecological security pattern; “production-living-ecological” spaces

党的十八大报告将优化国土空间开发格局作为生态文明建设的首要举措,提出“促进生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的总体要求。三生空间作为人类活动的载体,承载着人民对美好生活的向往,是国土空间配置优化的核心组成部分。其中,三生空间格局优化将开发保护制度与各类尺度空间规划落位于主体功能区之中,促进国土空间从顶层设计层面实现配置优化,进而优化国土空间开发格局。

当前国内外学者从“边界划定”和“三生空间”两个方面对国土空间配置优化展开讨论。其中“边界划定”视角下,研究者从建设用地开发适宜性评价和资源环境承载力视角^[1-8],利用 CA 模型从不同情景划定建设用地刚性与弹性边界^[9-14]。如张韶月等^[7]基于双评价结果协调生态保护红线与永久基本农田冲突区,利用 FLUS-UGB 模型划定了长春市城镇开发边界,完善了多规合一视角下的城镇开发边界划定方法;王志远等^[10]基于建设用地适宜性评价,探讨了纳入动态交通数据是否会影响城市增长边界划定的准确性,其结果表明纳入动态交通数据作为建设用地驱动因子有助于进一步提升城市增长边界划定的准确性。而严政等^[15]和冯涛等^[16]认为“边界划定”视角虽从建设用地本底视角优化区域国土空间格局,但未考虑经济发展要素对区域内的生产、生活和生态要素的影响,该方法可能会影响主体功能区的准确性划定。此后林伊琳等^[17]采用 MCR 模型,从生态安全格局视角下对国土空间配置数量进行优化,借助 Makov-FLUS 模型从生产、生活扩张和生态优先三个视角模拟了滇中城市群未来三生空间,完善了三生空间视角下的国土空间配置优化方法。

对于区域三生空间配置优化而言,未来三生空间预测模型的选择是优化区域三生空间格局的关键。在以往用地模拟研究中,研究者常采用 CA-Markov、Clues 和 FLUS 等模型模拟未来土地空间分布格局。其中早期以 CA-Markov 模型为代表,该模型借助 Markov 模型分析历史土地利用变化规律,在预测时仅需两期土地利用数据,在用地空间布局模拟时较为便捷^[18-19],但有学者^[20-21]指出该模型未探讨土地利用空间变化与空间驱动因子关系,可能会导致模型模拟精度不高。此后, Peter Verburg 提出了基于 Logistic 算法的 Clues 模型,探讨了土地利用空间变化与空间驱动因子的关系^[2,13],较大的提升了模型预测精度^[22-24],但 Liang 等^[25]人指出土地利用变化与空间驱动因子是复杂的非线性关系,为完善 Clues 模型缺陷,提出了基于随机森林算法下的 PLUS 模型,该模型利用随机森林算法较好的解释了土地空间变化与空间驱动因子的相关性,并采用自适应惯性循环机制预测了未来不同土地类型的空间分布,已被广泛应用于土地利用空间分布预测。

综上所述,现有生态安全格局评价体系研究缺乏引入动态交通时间数据,在三生空间配置优化方法中对生态保护红线与永久基本农田冲突区上呈现协调不足,为完善生态安全格局指标体系在多规合一视角下的三生空间配置优化中的应用,本文以长沙市为例,结合动态交通数据(DTTD)、最小阻力成本模型(MMCR)以及 PLUS 模型(Patch-generating land use simulation),提出了基于 DTTD-MCR-PLUS 模型的三生空间格局优化方法,通过构建“生活优先”、“生态优先”和“粮食安全”三种情景,模拟 2030 年不同情景下的长沙市三生空间格局,并基于现状三生空间用地类型,协调基本农田、自然保护区以及生态红线冲突区,提出多情景预测结果下的综合优化方案,以为长沙市生态环境保护、资源有效利用以及国土空间规划编制提供理论参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长沙市地处湖南省东部,位于东经 $111^{\circ}53'$ — $114^{\circ}15'$,北纬 $27^{\circ}51'$ — $28^{\circ}41'$ 之间,市域共有 6 个区 1 个县,2 个县级市,全域面积为 11849.94 km^2 ,如图 1 所示。区域内地形东西高,中部低,年均降水量为 1358.6 — 1552.5 mm 。近年来长沙市“生活空间”扩张速度持续加快,且生态空间数量持续下降。作为湖南省省会城市、长株潭城市群核心城市,长沙市未来“生活”和“生产”空间需求将进一步加大,生态空间将面临重大考验,如何精确识别长沙市生态安全格局,协调长沙市三生空间的供给平衡,模拟未来长沙市三生空间分布状况,有助于提出更为合理的长沙市国土空间格局的优化方案。

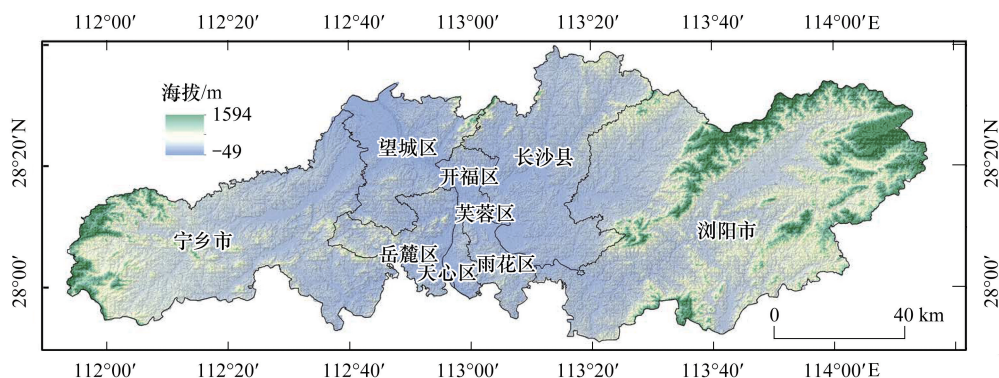


图 1 长沙市区位图

Fig.1 Location of Changsha City

1.2 数据来源

研究所用数据包括土地利用数据、地形地貌数据、社会经济数据、气象数据、POI 点数据、百度地图动态交通时间数据、道路网数据和禁止建设区数据。其中长沙市 2000 年、2010 年和 2018 年 30 m 土地利用数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),用于识别长沙市各时期的三生空间;地形地貌数据包括高程、坡度和坡向数据,其中 30 m 高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),坡度和坡向是利用高程数据是在 GIS 空间分析工具生成;社会经济数据主要包括 1 公里 GDP 和人口密度栅格,来源于中科院资源环境科学与数据中心,人口数据来源于中国知网(<https://www.cnki.net/>)下载的《长沙市统计年鉴》;气象数据包括年平均气温和年平均降水,来源于中科院资源环境科学与数据中心;POI 数据和百度动态交通数据来源于百度地图,其中动态交通时间数据是通过火车头采集软件向百度地图批量请求 2021 年 3 月 8 日至 3 月 18 日每日早 8 点,中午 12 点以及下午 18 点三个时段到达长沙市各行政区中心所需交通时间的时间点导航数据;道路网数据来源于 OSM(Open Street Map)地图;禁止建设区数据包含长沙市生态保护红线、自然保护区数据和基本农田,来源于长沙市自然资源和规划局。

表 1 三生空间分类标准^[26—28]

Table 1 Classification standard of production-living-ecological spaces

空间类别 Space category	中国科学院 LUCC 遥感监测分类 LUCC remote sensing monitoring classification of Chinese Academy of Sciences	优化措施 Optimization measures
生产空间 Production space	11 水田、12 旱地、53 其他建设用地	将基本农田区域内不是生产空间的区域进行调整
生活空间 Living space	51 城镇用地、52 农村居民点	
生态空间 Ecological space	21 有林地、22 灌木林地、23 疏林地、24 其他林地、31 高覆盖度草地、32 中覆盖度草地、33 低覆盖度草地 41 河渠、42 湖泊、43 水库坑塘、44 永久性冰川雪地、45 滩涂、46 滩地、64 沼泽地、61 沙地、62 戈壁、63 盐碱地、65 裸土地、66 裸岩石质地、67 其他未利用地	将生态红线区域内的不是生态空间的区域调整为生态空间

LUCC: 土地利用/土地覆盖变化 Land use and land cover change

2 研究方法

2.1 基于最小成本距离法的生态安全格局识别

识别长沙市生态安全格局是国土空间格局优化的关键要素,该部分主要分为目标源的选取、阻力面的构建和最小累计阻力面的测算三个部分^[29—30]。

2.1.1 目标源的选取

目标源的选取是利用 MCR 模型识别长沙市生态安全格局的首要要素,包含生态空间源选取和生活源选取两个部分。生态空间源的选取主要包括生态保护红线、自然保护区和研究区内的公园绿地,其中生态保护红线和自然保护区是城市具有重要生态功能的区域,将此作为生态源,是维系长沙市生态安全的基本保障区域^[19],而城市公园绿地是城市景观构成要素,将其选为生态源是维系城市品质的必要条件;生活源的选取主要包括长沙市内公共服务设施,含长沙市域范围内的学校、医院、政府机关所在地、银行和医疗 POI 点要素,这些要素是影响城市人民生活质量的基础要素,将此作为生活源是维护城市高质量发展的基本保障。

2.1.2 阻力面构建

阻力面的构建是识别长沙市生态安全格局的关键要素,主要分为阻力源的选取、生态源和扩张源阻力评价体系构建以及最小阻力成本的测算。

在生活源和生态源阻力等级构建上,本文从社会经济、地形地貌、气候条件、以及公共服务设施可达性四个层面选取 9 个指标作为生态源、生活源的阻力源,参考湖南省《双评价技术指南》和以往研究构建生态安全格局的分级标准^[17],对上述四个方面的阻力因子等级进行划分,并采用层次分析法确定权重,如表 2 所示。在因子分级划分上,采用高成本、较高成本、中成本、较低成本和低成本 5 个等级。考虑到各地区社会经济条件的不同,本文采用自然断点法对 GDP 和人口密度进行分类;气候条件和公共服务设施可达性分级是参考《湖南省双评价技术指南》,并结合实际情况设置划分。关于地形地貌条件在生态源最小阻力因子等级划分上,孙丽蓉等^[31]基于石羊河流域景观生态风险时空分布特征研究,指出生态风险空间等级越低高程越高,坡度越大;刘迪等^[32]以陕西省米脂县为例对区域生态风险与地形梯度进行了相关性分析,结果表明生态风险等级时空分布随高程和坡度梯度变化显著,高程越高和坡度越大的区域生态风险与其风险转移越不明显;另一方面从 MCR 模型构建体系上上来看,林伊琳等^[17]基于 MCR-FLUS-Markov 模型的滇中城市群国土空间格局优化中采用高程越高、坡度越大的区域设置为生态成本阻力面较低的等级,此外在基于自然修复理论角度来看,人类活动干扰行为具有一定特殊性,针对自然修复理论中的基于人类对生态系统的不同利用方式主要有未经干预、最小干预和利用被修复生态系统三种方式^[33],其中长沙市在高程越高和坡度越大的区域主要分布在长沙市西部和长沙市东北部,如图 4 中的高程和坡度图所示,该部分区域位于国土空间规划划定的生态安全屏障内,属于最小干预方式,因此在长沙市生态源阻力面计算中,将高程越高和坡度越大的区域设置为低等级的生态阻力面。

表 2 生态源、扩张源阻力分级及权重

Table 2 Ecological source and expansion source resistance classification and weight

阻力因子名称 Name of resistance factor	阻力因子分级(生态源/生活源) Resistance factor classification (ecological source / living source)					权重 Weight
	低成本/ 高成本 Low cost/ High cost	较低成本/ 较高成本 Lower cost/ Higher cost	中成本/ 中成本 Medium cost/ Medium cost	较高成本/ 较低成本 Higher cost/ Lower cost	高成本/ 低成本 High cost/ Low cost	
高程 Altitude	3500 m	2500—3500 m	1500—2500 m	500—1500 m	500 m	0.13
坡度 Slope	>25°	15°—25°	8°—15°	2°—8°	<2°	0.11
距离水域距 Distance from water area	<1500 m	1500—3000 m	3000—5000 m	5000—8000 m	>8000 m	0.10
GDP (Gross domestic product, GDP)	在 GIS 中采用自然断点法分类					0.11
人口密度 Population density	在 GIS 中采用自然断点法分类					0.10
年平均气温 Annual average temperature	>15℃	15—18℃	18—20℃	20—23℃	<23℃	0.08
年平均降水 Distance from road	>1600 mm	1400—1600 mm	1200—1400 mm	1000—1200 mm	<1000 mm	0.09
距离道路距离 Distance from road	>8000 m	5000—8000 m	3000—5000 m	1000—3000 m	<1000 m	0.10
距离城镇中心动态交通时间 Dynamic traffic time from urban center	>120 min	90—120 min	60—90 min	30—60 min	<30 min	0.18

2.1.3 最小累计阻力的识别

最小累计阻力的计算是通过 GIS 中的最小成本距离工具计算得来,其计算方式如下所示^[34]:

$$D_{k1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (C_i + C_{i+1}) \qquad D_{k2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sum_{i=1}^n (C_i + C_{i+1})$$

式中, C_i 是指成本源到第 i 个像元的消耗总值; n 为研究区的像元总数; D_{k1} 是指只各区域沿像元边长运动到目标源的最小累积成本; D_{k2} 是指各区域沿像元的对角线方向运动到目标源的最小累计成本。

2.2 情景设置

考虑到长沙市未来三生空间发展的不确定性,研究结合生活成本与生态成本差值的突变分析,通过 Markov 模型设置“生活扩张情景”、“生态优先情景”和“粮食生产安全情景”三个部分。其中生活扩张情景是指利用生态成本面与生活成本面的差值找出生活成本突变点,再用 Markov 模型利用历史转移概率计算出生态空间和生产空间的数量,该情景下只以水域作为限制区;生态优先情景是指基于生态成本面与生活成本面的差值找出生态成本突变点,并利用历史三生空间转移概率结合 Markov 模型计算得来,该情景将生态保护红线设置为限制区;粮食生产安全情景是指利用历史人口数据先计算出长沙市未来人口数量,根据年人均粮食消耗量,反推出长沙市生产用地的需求,再利用人均建设用地面积计算出生态用地和生活用地的数量,与此同时在模拟时需将基本农田设置为限制区。

表 3 粮食需求预测

Table 3 Food demand forecast

名称 Name	公式 Formula	R^2	解释 Explain
长沙市人口需求预 Population demand forecast of changsha city	$y = 6.9801x - 13376$	0.969	其中 x 是年份; y 是人口数量(万人); 该公式通过《长沙市统计年鉴》中的常住人口总数与时间的拟合 得来
粮食需求预测 Food demand forecast	$y_1 = 479 \times 10000x_1$	—	y_1 为长沙市粮食需求; x_1 为人口数量; 479 kg/人(该指标来源于国家统计局)
生产用地需求预测 Production land demand forecast	$y_2 = x_2 / 100k$	—	x_2 为粮食需求量; 生产用地产值 k 为 6367 kg/hm ² (该指标来源于国家统计局); y_2 为粮食生产用地需求(km ²)

2.3 PLUS 模型

PLUS 模型是土地利用变化模拟的前沿模型,该模型主要由数据转换及土地利用空间变化提取、基于随机森林下的用地适宜性概率分布预测、基于自适应惯性机制空间分配和精度验证 4 大板块组成,具体运行机制及参数说明如表 4 所示^[35]。

表 4 PLUS 模型
Table 4 Patch-level land use simulation model

模块类型 Module type	模块参数 Module parameters	运行设置 Run settings	参数说明 Parameter description
数据转换及土地利用空间变化提取 Data conversion and land spatial change extraction	Land expansion map	—	将 2010 年、2018 年三生空间数据导入
基于随机森林下的用地适宜性概率测算 Probability Calculation of Land Use Suitability Based on Random Forest	Folder of driving factors Humber of regression tree Sampling rate mTry	输入驱动因子的文件夹 决策树数量 采样比例 子树数量	— 20 10% 16
基于自适应惯性机制空间分配 Space allocation based on adaptive inertial mechanism	Development potential Land use pattern Conversion constrains Output Path Neighborhood size	用地适宜性概率分布 土地利用数据 输入限制区 储存路径 邻域类型	输入随机森林算法计算出的用地适宜性概率 输入 2010 年三生空间数据 输入基本农田与生态保护红线 — 3×3 摩尔型
精度验证 Accuracy verification	KappaOA (Overall Accuracy)	—	输入实际的 2018 年三生空间数据与预测的三生空间数据

2.4 三生空间优化路线

基于不同情景下的预测结果,结合当前长沙市生态红线、自然保护区与基本农田冲突的实际情况,本文提出以现状遥感数据为基础的综合优化方案。在该方案中,先从现状遥感数据出发,识别基本农田和生态红线以及生态红线冲突区域内的现状土地利用类别,并基于现状土地类别,调整区域的生态保护红线和基本农田红线,并将优化部分作为综合优化方案的本底,其次先将生态优先情景下的生态空间叠加至上述优化方案中,再将粮食安全情境下的生产空间分布纳入该方案,最终将生活扩张情景中的生活空间叠加至其中,形成了综合各类情景模拟下的长沙市国土空间格局优化方案,优化方案流程如图 2 所示。

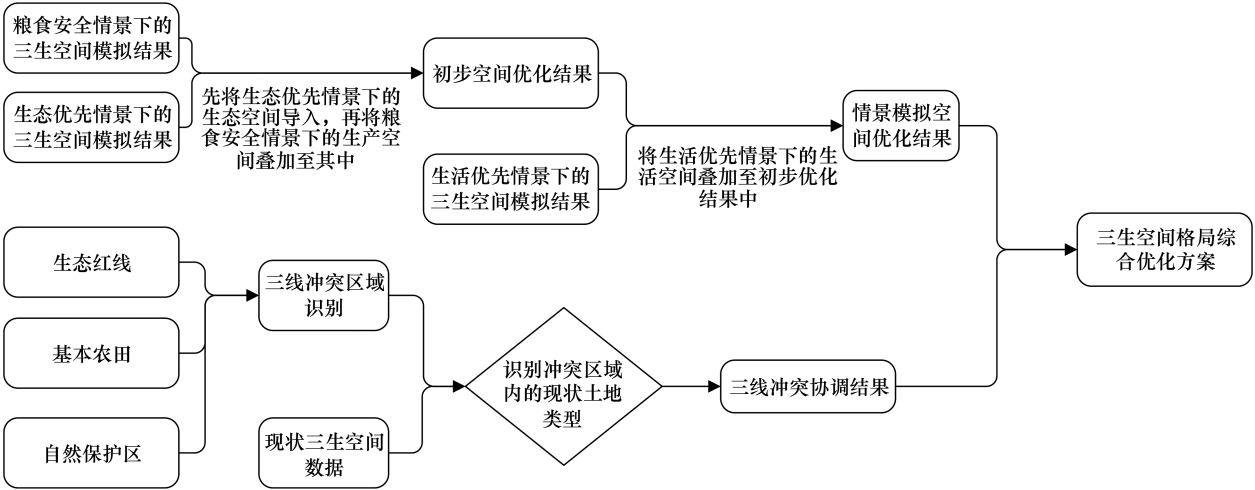


图 2 三生空间优化路线图
Fig.2 “production-living-ecological” spaces optimization roadmap

3 结果与分析

3.1 长沙市三生空间变化分析

根据表 5 分类结果,如图 3 所示,长沙市三生空间格局主要以生态空间为主,2000 年占比为 65.77%,至 2018 年减少为 63.60%,而生产空间和生活空间面积分别由 2000 年的 3527.45 km²和 162.05 km²,增长至 2018 年的 3760.98 km²和 547.40 km²。其中生产空间占生态空间转出面积比例最高,2000—2010 年生态空间共转移 159.72 km²,占比为 61.78%;2010—2018 年转移 244.91 km²,占比高达 90.52%。另一方面生活空间增长速度提升最为明显,尤其是 2000—2010 年,生活空间共增长 241.28 km²,增长幅度高达 90.82%,主要分布在望城区、长沙县东北部以及浏阳市;2010—2018 年增长 40.44 km²,增长幅度为 7.98%,主要分布在长沙县东部和天心区南部。

表 5 2000—2018 年三生空间转移矩阵
Table 5 Transfer matrix of “production-living-ecological” spaces from 2000 to 2018

空间类型 Space type	生产空间/km ² Production space	生活空间/km ² Living space	生态空间/km ² Ecological space	总计/km ² Total
生产空间 Procudtion space	3527.45/3498.72	162.05/40.15	96.45/158.95	3785.95/3697.81
生活空间 Living space	10.70/17.36	245.99/481.59	8.99/8.01	265.68/506.96
生态空间 Ecological space	159.72/244.91	98.80/25.66	7526.09/7360.90	7784.61/7631.47
总计 Total	3697.87/3760.98	506.96/547.40	7631.53/7527.86	11836.24/11836.24

表中数据为 2000—2010 年三生空间数量变化/2010—2018 年三生空间数量变化

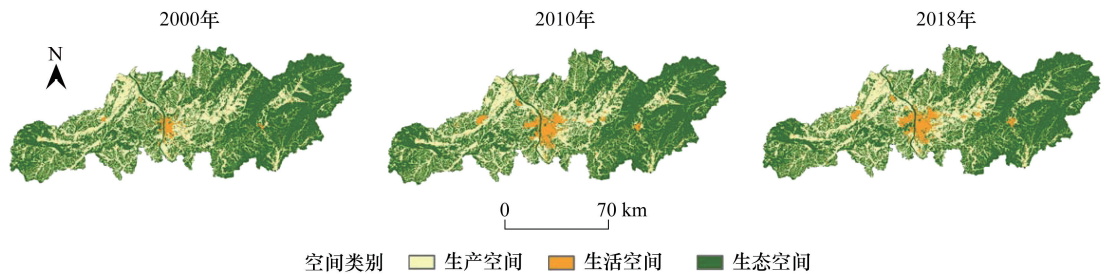


图 3 2000—2018 年长沙市三生空间格局
Fig.3 The spatial pattern of “production-living-ecological” spaces in Changsha from 2000 to 2018

3.2 长沙市生态安全格局构建

3.2.1 生态源最小累计阻力测算

根据表 2 生态源阻力因子分级情况,通过 GIS 重分类工具将各空间要素进行处理,得到生态阻力因子空间分布图,如图 4 所示,随后通过 GIS 中的栅格计算器将各阻力因子空间分布图进行加权求和,得到生态源最小累计阻力等级图,如图 5 所示。各生态成本等级由低到高的面积分别为 925.65 km²、2270.97 km²、3323.61 km²、4015.800 km²和 1170.23 km²,其中成本低阻力和较低阻力的区域主要分布在长沙市的西部和东部,成本中阻力分布在各区县中心城区周边;成本较高阻力和高阻力分布在中心城区周边及宁乡市中心城区。

3.2.2 生活源最小累计阻力测算

采用与生态成本同样的计算方式得到生活源阻力因子等级(图 6)和生活成本因子等级图(图 7)。生活源最小累计阻力等级由低到高的面积分别为 807.20 km²、5297.37 km²、2686.30 km²、2180.24 km²和 725.15 km²,其中扩张阻力较小的区域主要分布在长沙市中心城区和宁乡市中心城区附近,较高的区域主要分布在长沙市东部和西部。

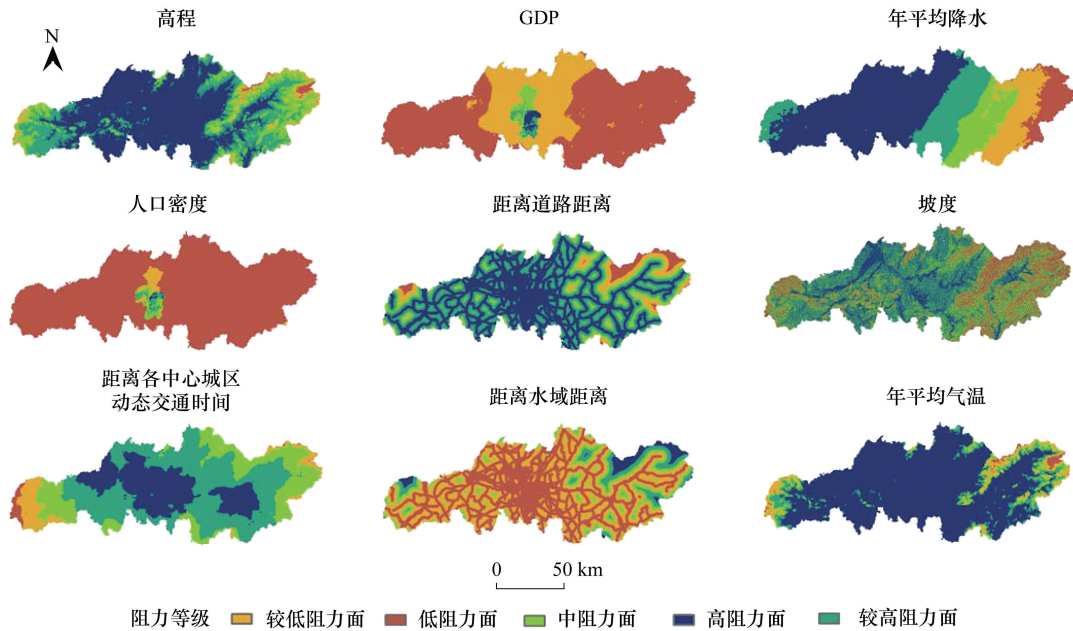


图 4 生态阻力因子

Fig.4 Ecological resistance factor

3.2.3 最小累计差值突变分析

通过 GIS 软件的成本距离工具箱,分别计算出生态源最小累计阻力面和生活源最小累计阻力面,随后采用栅格计算器计算出两者的差值面,并对其差值面进行突变分析。其结果如图 8 所示,当 MCR 差值为 -19915.64、-2011.26、12185.21 和 24576.51 时,栅格数目变化速度出现突变点。利用上述突变点,对 MCR 差值面进行重分类,提出国土空间格局数量优化配置分区,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。

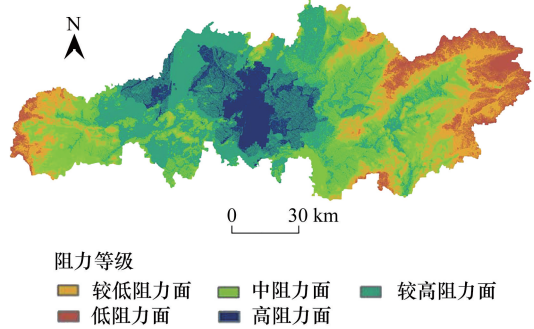


图 5 生态源最小累计阻力等级

Fig.5 Ecological source minimum cumulative resistance level

3.2.4 三生空间格局数量优化

依照最小累计阻力差值结果,对不同突变点下的各类三生空间数量进行统计,并参照表 4 计算的粮食安全下的耕地数量和生活空间,综合 Markov 模型得出各情景下的三生空间数量关系如表 6 所示。其中生态优先情景各类空间数量需求,是依照生态空间保护区和生态空间保护边缘区累加得出,该情景下生态空间总数占研究区总面积的 54.64%,主要分布在各生态源的附近,其中生态空间保护区主要分布在研究区的东部、西北部、西部和西南部,如图 9 所示,这些区域主要为生态保护红线和自然保护区,且用地类型主要为林地,但也有少部分分布在中心城区,这是由于这部分地区是城市的公园绿地,而生产空间和生态空间数量需求是依照历史转移概率结合 Markov 计算得来;生活优先情景下的各类空间数量需求,是依照生活扩张集中区面积划定而来,该集中区占研究区用地面积的 10.55%,是城市扩张潜力较高和现已开发建成的生活空间区域,主要分布在城市建成区附近或城市建成区内,该情景下的生态空间和生产空间数量需求遵循生活优先情景的计算方式;粮食安全情景需求是通过表 3 计算出到 2030 年为止长沙市总人口数量将达到 793.60 万人,所需粮食按照国家统计局公布的 479 kg/人,计算出 2030 年长沙市在不对外进口粮食的情况下所需粮食 380.13 万吨,

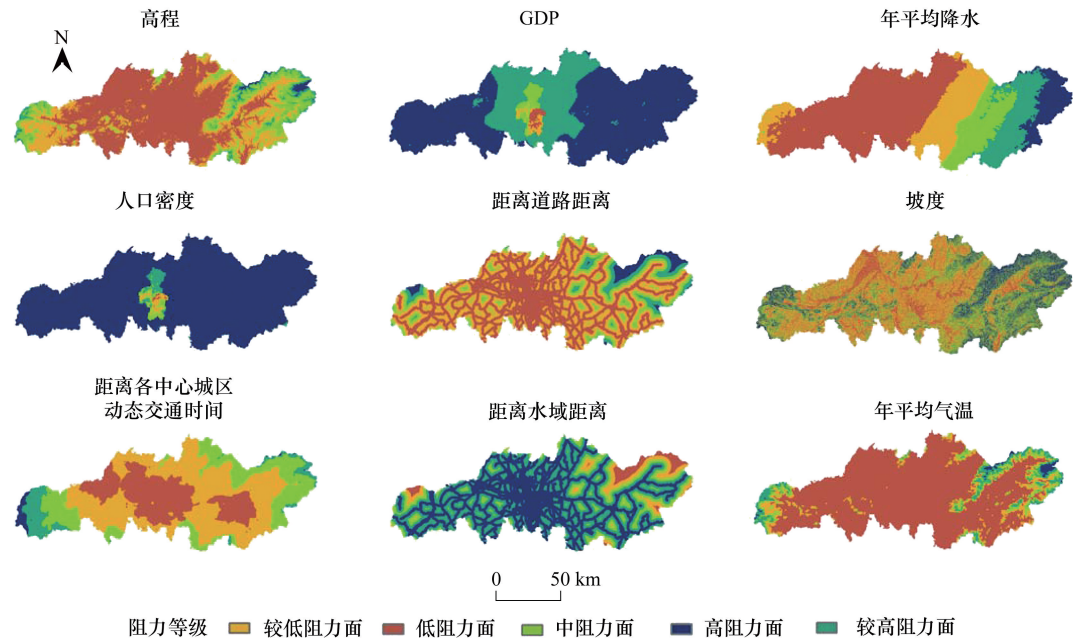


图 6 生活阻力因子

Fig.6 Resistance factor

按照国家统计局公布的 1 hm²生产用地每年生产 6367 t 粮食为依据,计算出 2030 年长沙市在粮食自给自足的情况下供需 5870.41 km²生产用地,考虑到当前国土空间规划编制中常从资源与环境承载力的角度推算各类型土地需求,本文以粮食安全情景作为长沙市粮食承载力的依据,因此在推算结果的基础上,将基本农田作为限制条件,得出生产空间比例为 50.44%,而生活空间根据人口预测总量并结合长沙市人均建设用地指标计算得出,占比为 6.70%。

3.3 不同情景下的三生空间模拟结果

3.3.1 基于 PLUS 模型的精度验证

研究以 2010 年长沙市三生空间分布现状为基础,模拟 2018 年三生空间分布情况,其预测结果如图 4 所示。为验证模型的可靠性,将 PLUS 模型模拟的 2018 年三生空间分布图与真实的三生空间格局进行对比,其结果表明总体精度为 0.95,Kappa 系数为 0.91,表明该模型模拟效果较好,能适用于未来三生空间分布预测。

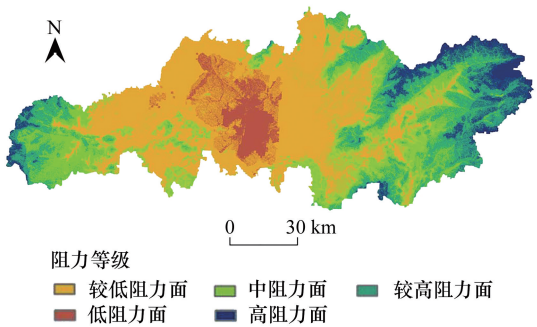


图 7 生活源最小累计阻力等级

Fig.7 Minimum cumulative resistance level of living source

表 6 三生空间格局数量优化

Table 6 “production-living-ecological” spatial pattern quantity optimization

情景名称 Scenario name	生态空间比例 Ecological space proportion	生产空间比例 Production space proportion	生活空间比例 Living space proportion
生态优先情景 Ecological priority seanario	54.64%	36.91%	8.15%
生活扩张情景 Life expansion scenario	50.63%	38.82%	10.55%
粮食安全情景 Food security scenario	42.86%	50.44%	6.70%

从图 10 来看预测结果与实际的差异主要体现在斑块形态和大小上。从生活空间来看,岳麓区、雨花区、宁乡市和浏阳市的预测图中,生活空间的斑块大小相较于实际的斑块大小要小一些,尤其是生活空间集中区

周边,但预测图中的斑块紧凑度更强;从生产空间来看,主要不一致的地方在望城县的南部,其数量较实际的生产空间分布要多;从生态空间来看,在预测图中,宁乡市西南部的生态空间斑块更为密集,而真实的三生空间分布图中斑块较碎。

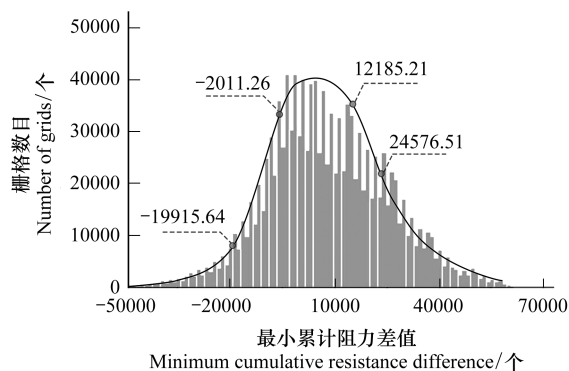


图 8 最小累积阻力差值与栅格数目的关系

Fig. 8 The relationship between the minimum cumulative resistance difference and the number of grids

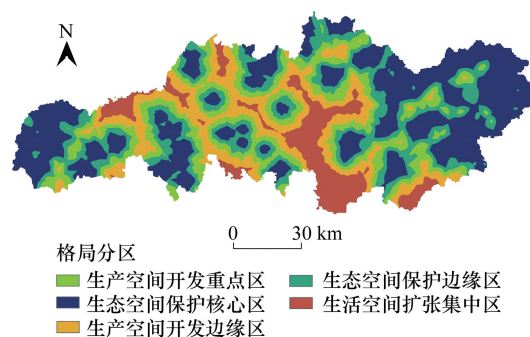


图 9 长沙市生态安全格局分区

Fig. 9 Zoning of ecological security pattern in Changsha City

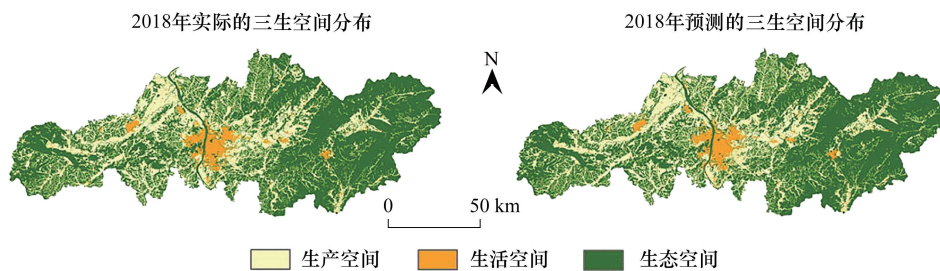


图 10 精度验证

Fig. 10 Accuracy verification

3.3.2 不同情景下的三生空间预测

根据 3 种情景下各空间类型用地需求,将长沙市国土空间数量优化作为三生空间优化的基本条件,利用 PLUS 模型模拟 2030 年生活优先情景、生态优先护情景和粮食安全情景下三生空间分布情况,其结果如图 11

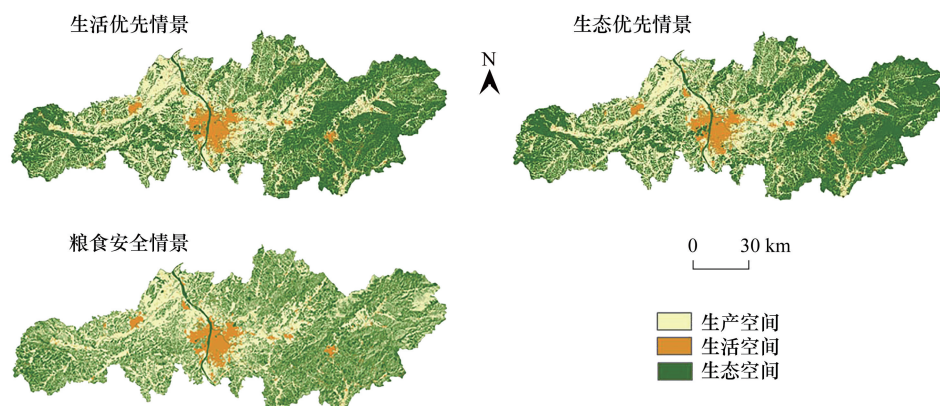


图 11 不同情景下的长沙市三生空间格局优化结果

Fig. 11 Optimization results of "production-living-ecological" pattern in Changsha City under different scenarios

所示。其中生活优先情景下,生产空间、生活空间和生态空间面积分别为 4583.49 km²、721.41 km²、6532.20 km²,与此同时该情景下长沙市生活空间出现大规模扩张,与 2018 年相比,提升了 31.53%,主要分布在望城区南部,长沙县西部和雨花区东部,扩张形式主要以边缘式扩张为主。生态优先情景是以地区生态本底为目标,同时在模拟时限制生态红线内的土地流转,预测结果显示生产空间、生活空间和生态空间面积分别为 4369.07 km²、964.72 km²、6503.30 km²,该情景下生态空间主要分布在浏阳市和宁乡市,此外,生态空间聚集最为明显。粮食安全情景是维护地区经济发展稳定的必要条件,在此情景下,生产空间、生态空间和生活空间面积分别为 5970.62 km²、691.01 km²、5175.45 km²,但值得注意的是该情景下,生产空间大量侵占区域内的生态空间,主要分布在各生活空间附近,且生态空间破碎化程度尤为突出。

3.4 长沙市三生空间格局优化

长沙市 2030 年国土空间配置优化分为三线冲突区域协调和基于多情景模拟结果下的叠加优化两个步骤,其中三线冲突区域协调过程如图 12 所示,长沙市三线冲突区面积为 136.32 km²,主要分布在长沙市的南部和东部,其现状三生空间类别主要为生产用地和生态用地,三线冲突区域协调后的生产、生活、生态用地面积分别为 46.05 km²、1.41 km²和 88.86 km²。

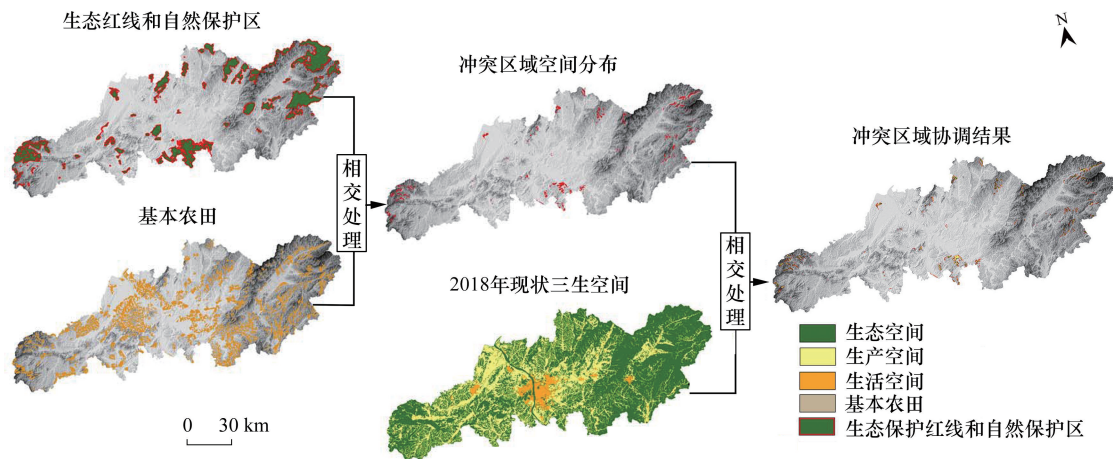


图 12 三线协调过程图

Fig.12 Three-line coordination process diagram

基于多情景模拟结果叠加优化如图 13 所示,研究将生态优先情景下的生态空间作为长沙市发展的本底,结合粮食安全下的生产空间进行叠加处理,形成初步优化结果所示,其次将生活情景下的生活空间叠加至初步优化结果中形成情景模拟的二次优化结果,该结果中的生产、生活和生态空间用地面积占比分别为 37.62%、7.67%和 54.71%。

依照上述两种优化方案,将冲突区协调结果叠加至二次优化结果中,得到长沙市 2030 年国土空间类型优化配置结果,如图 14 所示,其结果表明生活空间、生产空间和生态空间面积分别为 907.37 km²、4453.24 km²、6471.28 km²。其中生活空间主要分布在各县城中心城区,与 2018 年三生空间分布图相比,综合优化方案中的生活空间扩张分布在长沙县中部、望城县东北部;生产空间主要分布在生活空间附近,而生态空间主要分布在生产空间周边,除此之外还有少量生态用地分布在中心城区内部的公园绿地。此外,综合协调下的 2030 年各空间类型分布与 2018 年实际三生空间分布在生产空间上差异较大,这主要原因是为避免粮食缺口进一步扩大,综合协调方案中将粮食安全情景下的生产空间叠加到了优化方案,导致与 2018 年实际三生空间分布差异性大。

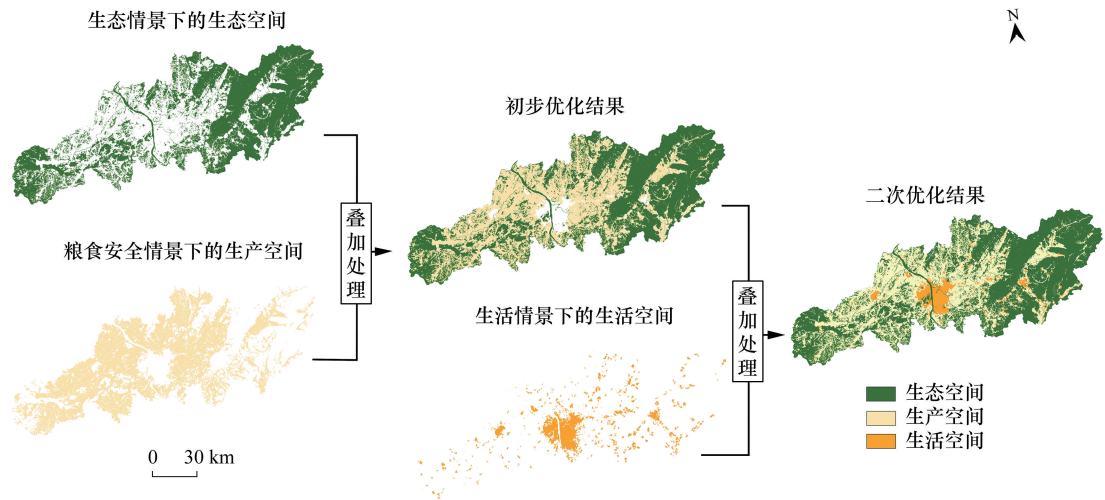


图 13 情景优化过程

Fig.13 Scenario optimization process

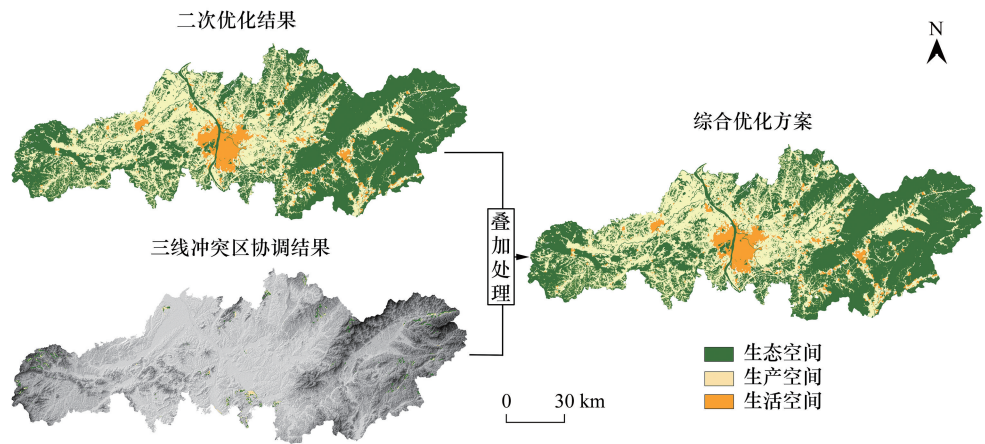


图 14 长沙市三生空间格局综合优化方案

Fig.14 Comprehensive optimization plan of “production-living-ecological” pattern in Changsha City

4 讨论

(1) 基于动态交通数据优化的生态安全格局评价体系

相较于以往生态安全格局评价研究,本文将动态交通时间数据纳入生态安全格局评价体系,基于生态最小累计阻力面与生活源最小累计阻力面差值突变点,提出三生空间数量配置需求优化方案,是构建生态安全格局评价体系的新思路。基于该方法的结果表明生态安全核心保护区面积为 4111.41 km²,主要分布在长沙市的西部和长沙市东北部,与 2010—2030 年版长沙市总体规划较为一致,体现了纳入动态交通时间数据构建的生态安全格局评价体系更具有准确性。未来,在生态安全格局评价研究中可进一步尝试引入新数据提升生态安全格局构建的准确性,如将公共服务设施动态交通数据和公园绿地动态交通时间数据纳入最小成本距离的计算,为更精确评价生态安全格局提供数据支撑。

(2) 区域三生空间布局综合优化

本文将优化后的生态安全格局评价结果纳入国土空间配置数量优化中,基于三线协调结果,从“粮食安

全”、“生活优先”、“生态优先”三种情景下,提出 2030 年长沙市三生空间配置综合优化方案,其优化结果表明与现状三生空间相比,三生空间综合优化后的生产空间出现大规模增加,这是由于优化方案考虑了在不依靠外来进口情况下保障长沙市的粮食供给安全,导致生产用地大规模扩张,但值得关注的是,优化结果中各类空间用地更为集聚,更符合城市用地集约发展的诉求。此外在今后三生空间优化研究中可重点关注以下 2 个方向:①三线冲突区具有空间差异性,对于不同区域的三生空间综合优化方法,研究还可以考虑冲突区域用地的经济价值,以此达到城市土地价值最大化;②区域发展具有动态性,三生空间划定结果应开展周期性实施评估。可从生活空间是否有效控制、生产空间配置是否提升、生态空间是否被侵占等方面展开实效评估,以此达到空间管制的目的。

5 结论

本研究提出了基于 DTTD-MCR-PLUS 模型的三生空间格局优化方法,以长沙市为例,设置生活优先、生态优先和粮食安全三种情景,模拟 2030 年不同情景下的长沙市三生空间格局,提出协调三线后的长沙市三生空间综合优化方案。研究结论如下:

(1)以生态保护红线和城市公园绿地作为生态源,将公共服务设施点作为生活源,从动态数据的角度优化 MCR 成本体系的构建,利用最小累积成本距离模型构建了长沙市生态安全格局,并结合生态源最小累计阻力面与生活最小累计阻力面的差值突变点,提出了长沙市生态功能优化分区,其中生态空间保护核心区和生态空间保护边缘区面积分别为 4111.41 km²和 2285.29 km²,生态空间主要分布在长沙市西部与长沙市东北部,与长沙市划定的生态红线分布较为一致,表明利用动态交通时间数据构建的 MCR 成本体系具有较强的准确性;生产空间开发重点区面积为 2144.79 km²;生产空间开发边缘区面积为 1928.59 km²;生活空间扩张集中区面积为 1235.55 km²。

(2)耦合 DTTD-MCR-PLUS 模型模拟的 2030 年不同情景结果表明:生活优先情景下,生活空间面积增幅高达 43.57%,以外延式扩张为主,主要分布在望城区南部,长沙县西部和雨花区东部;与生活优先情景相比,生态优先情景下,生态空间转出速度下降了 3.11%,且生态空间聚集最为明显;粮食安全情景下,生产空间侵占生态空间速度加快,增幅高达 58.79%,且生态空间斑块破碎化程度最大。

(3)协调基本农田、生态保护红线、以及自然保护区下的 2030 年长沙市国土空间格局优化布局方案结果表明:生产空间、生活空间和生态空间比例分别为 37.63%、7.67%和 54.70%,其中望城区和长沙县的生态空间转为生产空间尤为明显,而浏阳市生态空间转出量最少,与当前长沙市划定的国土空间格局较为一致,表明该优化方法具有较强的准确性,其原因是由于浏阳市内生态保护区面积最大,限制了生态用地转为其他用地。

参考文献 (References):

- [1] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究. 中国生态农业学报:中英文, 2021, 29(6): 1018-1029.
- [2] 胡波洋,张蓬涛,白宁,赵丽. 基于 CLUE-S 和 GMOP 模型的青龙满族自治县土地利用情景模拟. 中国农业资源与区划, 2020, 41(7): 173-182.
- [3] 叶高斌,苏伟忠,孙小祥. 基于 Dyna-CLUE 模型的太湖流域建设用地区域扩张模拟. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 725-734.
- [4] 刘阳,李志英,龙晔,李晨晨. 基于生态适宜性的昆明城市空间增长边界研究. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1555-1565.
- [5] 黄傅强,王志远,刘慧,齐增湘,吴欣昕. 基于生态系统服务价值的城市增长边界划定研究:以衡阳市中心城区为例. 生态与农村环境学报, 2020, 36(9): 1115-1125.
- [6] 张丽芳,方创琳,高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟. 生态学报, 2021, 41(4): 1267-1279.
- [7] 张韶月,刘小平,闫士忠,战强,刘彤起. 基于“双评价”与 FLUS-UGB 的城镇开发边界划定——以长春市为例. 热带地理, 2019, 39(3): 377-386.
- [8] 丛文翠,孙小银,栾晓林. 基于 CLUE-S 模型的南四湖流域土地利用变化模拟. 曲阜师范大学学报:自然科学版, 2021, 47(2): 106-112.
- [9] 徐磊,董捷,李璐,张俊峰. 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. 经济地理, 2017, 37(6): 76-83.

- [10] 王志远, 张考, 丁志鹏, 伍随意, 黄春华. 纳入动态数据的改进 FLUS 模型在城市增长边界划定中的应用. 地球信息科学学报, 2020, 22(12): 2326-2337.
- [11] 张世伟, 魏璐瑶, 金星星, 陆玉麒. 基于 FLUS-UGB 的县域土地利用模拟及城镇开发边界划定研究. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1848-1859.
- [12] 陆文涛, 代超, 郭怀成. 基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟. 地理研究, 2015, 34(9): 1619-1629.
- [13] 郭延凤, 于秀波, 姜鲁光, 查良松. 基于 CLUE 模型的 2030 年江西省土地利用变化情景分析. 地理研究, 2012, 31(6): 1016-1028.
- [14] 罗伟玲, 吴欣昕, 刘小平, 张大川, 刘鹏华, 何家律. 基于“双评价”的城镇开发边界划定实证研究——以中山市为例. 城市与区域规划研究, 2019, 11(1): 65-78.
- [15] 严政, 王壮壮, 周成杰, 李沛鸿. 基于生态保护重要性的江西省瑞金市生态安全格局构建. 水土保持通报, 2021, 41(1): 260-266.
- [16] 冯涛, 石培基, 张学斌, 刘春芳, 张伟萍. 河谷型城市“三生”空间竞争与生态环境效应——以兰州市为例. 水土保持研究, 2021, 28(3): 229-234, 241, 3.
- [17] 林伊琳, 赵俊三, 陈国平, 张萌. 基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化. 农业机械学报, 2021, 52(04): 159-170+207.
- [18] 刘洋, 张军, 周冬梅, 马静, 党锐, 马靖靖, 朱小燕. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [19] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 朱磊, 董通, 何盘星, 杨强军. 基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019.
- [20] 谢一茹, 高培超, 王翔宇, 宋长青, 程昌秀, 叶思菁, 沈石. 经济发展预期下的粮食产量与生态效益权衡——黑龙江省土地利用优化配置. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(6): 873-881.
- [21] Jia R M, Mu X Y, Chen M, Zhu J, Wang B, Li X P, Astakhov A S, Zheng M F, Qiu Y S. Sources of particulate organic matter in the Chukchi and Siberian shelves: clues from carbon and nitrogen isotopes. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(9): 96-108.
- [22] 唐宗, 周悟, 杨颖, 谢晓瑜, 胡月明. 基于交互效应 Logistic 回归模型的耕地质量评价方法研究. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2394-2403.
- [23] 冯源, 朱建华, 刘华妍, 肖文发. 基于土地利用变化的县域碳收支空间格局预测. 江西农业大学学报, 2020, 42(4): 852-862.
- [24] 文雅, 龚建周, 胡根银, 胡志仁. 基于生态安全导向的城市空间扩展模拟与分析. 地理研究, 2017, 36(3): 518-528.
- [25] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569.
- [26] 冀正欣, 刘超, 许月卿, 黄安, 卢龙辉, 段亚明. 基于土地利用功能测度的“三生”空间识别与优化调控. 农业工程学报, 2020, 36(18): 222-231, 315.
- [27] 曹根榕, 顾朝林, 张乔扬. 基于 POI 数据的中心城区“三生空间”识别及格局分析——以上海市中心城区为例. 城市规划学刊, 2019(2): 44-53.
- [28] 青亚兰. 基于多源数据的茂县“三生”空间识别与评价研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2018.
- [29] 袁钟, 赵牡丹, 刘蕊娟. 基于最小成本距离与改进引力模型的城市绿地网络构建与优化. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(02): 104-109.
- [30] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型. 生态学报, 2022, 42(5): 1968-1980.
- [31] 孙丽蓉, 马静, 周冬梅, 张军. 石羊河流域景观生态风险时空分布特征. 生态科学, 2022, 41(2): 194-203.
- [32] 刘迪, 陈海, 张敏, 商舒涵, 梁小英. 生态脆弱区景观生态风险时空分异及其地形梯度分析——以陕西省米脂县为例. 水土保持研究, 2019, 26(4): 239-244, 251.
- [33] 王军, 杨崇曜. 关于基于自然解决方案的争议与思考. 中国土地, 2022(2): 21-23.
- [34] 陈艳梅, 高吉喜, 年蔚, 张璐, 冯朝阳. 风域视角京津冀生态廊道空间格局识别. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3418-3426.
- [35] 王佳楠, 张志. 基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析. 西北林学院学报, 2022, 37(03): 139-148+179.