

引用格式: 马永健, 谢红彬, 邓红芮, 蔡思琪, 刘强. 融入功能分区的土地利用变化多情景模拟——以福建南平市建阳区为例[J]. 山地学报, 2024, 42(2): 225-237.

MA Yongjian, XIE Hongbin, DENG Hongrui, CAI Siqi, LIU Qiang. Multi-scenario simulation of land use changes integrated with functional zoning: A case study of Jianyang district of Nanping, Fujian province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(2): 225-237.

## 融入功能分区的土地利用变化多情景模拟 ——以福建南平市建阳区为例

马永健, 谢红彬\*, 邓红芮, 蔡思琪, 刘强

(福建师范大学 a. 地理科学学院; b. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350117)

**摘要:** 土地利用变化多情景模拟是合理配置土地资源的重要依据。已有研究通常聚焦于省级、城市群等较大尺度区域, 较少关注南方山区城镇土地利用变化及其面临的生态安全约束。本文以福建省南平市建阳区为研究区, 应用 RSEI-MCR-PLUS 耦合模型, 将生态约束下的土地功能分区融入土地利用变化模拟, 分析惯性发展、经济发展优先、生态保护优先、可持续发展四种情景下 2030 年建阳区土地利用空间格局。结果表明: (1) 建阳区内适宜开发区、缓冲开发区、限制开发区、生态缓冲区和生态保护区面积占比分别为 3.17%、27.94%、26.73%、25.68% 和 16.48%, 各功能区以适宜开发区为中心空间上呈环状分布。(2) 惯性发展情景下, 建设用地呈现多点扩散, 土地资源利用效率相对低下; 经济发展优先情景下, 新增建设用地侵占林地和耕地, 加剧空间冲突; 生态保护优先情景下, 土地资源利用效率低下, 并限制经济快速发展; 可持续发展情景下, 建设用地呈组团式发展, 生态系统得到保护, 土地资源配置更为合理。本成果可为合理配置土地资源、优化山区国土空间开发保护格局提供科学参考。

**关键词:** 土地利用变化; 多情景模拟; 土地功能分区; RSEI-MCR-PLUS 模型; 建阳区

**中图分类号:** X321

**文献标志码:** A

土地利用/土地覆盖变化 (Land Use and Land Cover Change, LUCC) 不但影响地区生态系统结构与功能<sup>[1]</sup>, 也影响社会经济效益, 对地区繁荣稳定和可持续发展有重要作用<sup>[2]</sup>。山区城镇土地利用破碎化程度较高, 且土地利用变化受生态安全约束<sup>[3]</sup>。开展土地利用变化模拟研究, 可为优化山区中小城镇土地利用结构提供科学参考<sup>[4]</sup>, 为构建高质量的国土空间开发保护格局提供有效支持<sup>[5]</sup>, 对区域可持续发展具有重要意义<sup>[6]</sup>。

现有土地利用变化模拟研究主要在流域<sup>[7]</sup>、省域<sup>[8-9]</sup>、城市群<sup>[10-11]</sup>、市域<sup>[12]</sup> 等较大尺度范围, 重点探讨不同情景 (自然发展、经济建设、生态保护

等) 下未来土地利用格局的演变, 可以为各地区土地资源合理配置和生态环境保护提供重要理论依据<sup>[13]</sup>。然而, 不容忽视的是, 已有研究鲜有涉及中国东南地区的山区城镇, 这些区域在生态安全方面意义重大, 且土地利用破碎化程度较高。因此, 在追求高质量发展背景下, 深入研究和关注山区城镇生态安全保障功能尤为重要。当前土地利用变化模拟研究常用模型有 CA 模型 (Cellular Automaton Model)<sup>[14]</sup>、CLUE-S 模型 (Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent Model)<sup>[15]</sup>、FLUS 模型 (Future Land Use Simulation Model)<sup>[16]</sup> 等, 但上述模型难以准确模拟山区城镇土地利用的

收稿日期 (Received date): 2023-08-23; 改回日期 (Accepted date): 2024-04-18

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41871208)。[National Natural Science Foundation of China (41871208)]

作者简介 (Biography): 马永健 (1999-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要研究方向: 区域可持续发展。[MA Yongjian (1999-), male, born in Urumqi, Xinjiang, M. Sc. candidate, research on regional sustainable development] E-mail: qsx20221079@student.fjnu.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 谢红彬 (1966-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 资源环境与区域可持续发展。[XIE Hongbin (1966-), female, Ph. D., professor, research on resource environment and regional sustainable development] E-mail: xiehongbin933@sina.com

微观变化,且缺乏对土地利用变化驱动因素的深入挖掘能力。由中国地质大学(武汉)开发的斑块生成土地利用变化模拟模型(Patch-generating Land Use Simulation Model, PLUS)可以较好地解决这些问题<sup>[17]</sup>。该模型可以揭示多种景观类型变化的潜在驱动因素,并在斑块级别上模拟景观类型的演变,真实反映山区城镇复杂土地利用格局的实际情况<sup>[4]</sup>。

南平市建阳区位于福建省北部,武夷山脉南麓,以其独特的地理位置和丰富的生态资源荣获国家生态文明建设示范区殊荣,拥有与同纬度相比最为完整、典型且面积最大的原生性森林生态系统<sup>[18]</sup>。作为全国首个国家公园周边地区规划重点,建阳区在环武夷山国家公园保护发展带规划中具有重要地位<sup>[19]</sup>。随着城市化的推进,建阳区在追求生态保护与中心城区绿色发展的双重目标时,生态安全性愈发凸显。然而,受地形限制,建阳区城镇建设用地扩张受到较大阻碍,土地利用破碎化程度较高,对区域生态安全构成潜在威胁<sup>[20]</sup>。

本文以建阳区为研究区,构建基于生态安全的土地利用变化多情景模拟方法,即运用 RSEI-MCR-PLUS 耦合模型模拟分析惯性发展、经济发展优先、生态保护优先、可持续发展四种情景下 2030 年建阳区土地利用格局,定量刻画不同政策引导下土地利用空间格局分布,以期丰富南方山区城镇土地利用变化及生态安全约束等相关研究,为山区城镇探索高质量国土空间开发保护格局提供借鉴。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

建阳区地处闽江上游,属中亚热带季风气候,光热资源丰富,雨季集中,是闽北的重要生态屏障。2014 年建阳实现撤市设区,2020 年南平市行政中心正式搬迁至建阳区,城镇开发重心逐步向建阳区转移。2010—2020 年间建阳区建设用地面积增加 4890.69 hm<sup>2</sup>,占 2020 年建设用地总面积的 59.91%。城镇建设用地的迅速扩张侵占原有生态用地,城市空间与生态空间冲突明显,导致生态系统功能部分丧失,生态安全遭受威胁,生境破碎化、孤岛化等生态问题不断涌现<sup>[20]</sup>。

### 1.2 数据来源

以建阳区 2000 年、2010 年、2020 年土地利用数据为基础,分析不同年份间土地利用变化趋势,数据来源于 GlobeLand30,分辨率为 30 m。遥感数据来源于地理空间数据云,选取 Landsat-8 影像,云量为 0.13%,分辨率为 30 m,用以计算遥感生态指数。根据研究区实际情况及数据可获取性、可操作性和相关性原则,选取以下与土地利用变化密切相关的要素作为土地利用变化驱动因子:高程、坡度、土壤类型、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、年平均降水、年平均气温、距高速公路距离、距二级道路距离、距三级道路距离、距四级道路距离、距水源距离、GDP 空间分布、人口空间分布。统一重采样为 30 m × 30 m,其中地形数据来自地理空间数据云,各级道路网数据来自

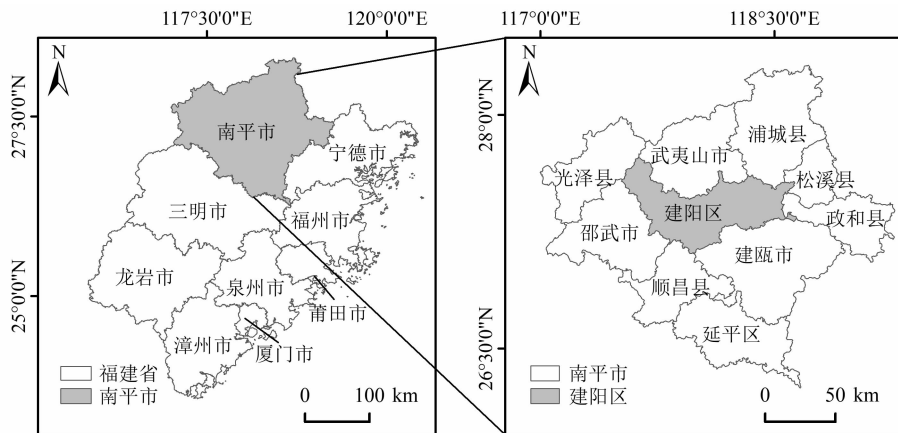


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of research area

Open Street Map, 社会经济与气象数据来自中国科学资源环境科学与数据中心。

### 1.3 研究方法

在构建 PLUS 模型的基础上,引入最小累计阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型作为土地功能分区约束导向,模拟生态安全约束下土地利用变化。生态安全的核心在于识别源地,使用遥感生态指数(Remote-Sensing Ecological Index, RSEI)进行生态源地识别,能有效提升识别准确性,减少人为因素干扰。基于上述方法耦合 RSEI-MCR-PLUS 模型,将功能分区与土地利用变化模拟相结合,研究结果可为山区城镇土地可持续开发利用提供依据。

#### 1.3.1 遥感生态指数

应用徐涵秋<sup>[21]</sup>等提出的遥感生态指数,以绿度、湿度、干度和热度为评价指标,对建阳区生态系统状况进行分析。四个指标分别采用 NDVI、缨帽变换后的湿度指数(Wetness Index, WET)、归一化建筑-裸土指数(Normalized Difference Building-Soil Index, NDBSI)以及地表温度(Land Surface Temperature, LST)进行计算,具体公式如表 1 所示。

表 1 遥感生态因子计算公式

Tab. 1 Calculation formula of remote sensing ecological factors

遥感生态因子	计算公式
NDVI	$NDVI = (B_4 - B_3) / (B_4 + B_3)$
WET	$WET = aB_1 + bB_2 + cB_3 + dB_4 + eB_5 + f_6$
NDBSI	$NDBSI = (IBI + SI) / 2$
LST	$LST = (c_2 / [\lambda \times \ln((c_1 / B(T) + 1)]) - 273.15$ $B(T) = [L_\lambda - L \uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L \downarrow] / \tau\varepsilon$

注:Landsat-8 的六个波段由  $B_1 \sim B_6$  分别对应; $a \sim f$  为传感器参数; $IBI$  为城市建筑指数; $SI$  为裸土指数; $B(T)$  为普朗克黑体辐射亮度值; $c_1$ 、 $c_2$  为常数; $\lambda$  为波长; $\varepsilon$  为地表比辐射率; $\tau$  为大气在热红外波段透过率; $L_\lambda$  为卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值; $L \uparrow$ 、 $L \downarrow$  分别为大气上行和下行辐射亮度值。

对标准化后的 4 个因子进行主成分分析,其结果中第一主成分(PC1)集成了大部分特征信息,即为初始生态指数(RSEI0),对其进行标准化可获得遥感生态指数。RSEI 值越接近 1,表示生态环境质量越好,反之较差。根据生态质量等级划分标准,以等间隔方式对 RSEI 进行分级,从高到低分别对应生态等级优、良、中、较差和差,以此对研究区生态现

状进行评价。

#### 1.3.2 基于 MCR 的土地功能分区

##### (1) 目标源地选取

选择合适的源地是识别土地功能区划的首要步骤,目标源地包含生态源地和生活源地。生态源地是维护生态平衡和生态服务的核心地区,而生活源地则是维持人类社会正常运作的自然基石。根据 RSEI 计算结果,选取生态等级为优的地区为备选生态源地;采用景观形态空间格局分析方法(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)将建设用地作为前景,其余地类作为背景,使用 Guidos 软件进行计算,将识别出的“核心区”作为备选生活源地。考虑到破碎化程度较高,且小面积斑块辐射功能较弱,参考以往文献<sup>[22-23]</sup>并调整不同阈值,最终确定以面积门槛  $5 \text{ km}^2$ 、 $3 \text{ km}^2$  剔除劣势斑块;dPC 常用来衡量斑块重要性,其值越大,斑块缺失对整体连通性影响越大,即该斑块更重要。使用 Conefor 软件计算各斑块重要性,并以  $dPC > 1$  进行二次筛选,最终筛选出 25 个生态源、7 个生活源。

##### (2) 阻力面构建

建立物种迁移阻力因子评价指标体系并构建阻力面,定量反映不同自然和社会经济条件对物种迁移所产生阻力的空间差异。将各因子阻力值划分为低、中、较高和高 4 个等级,并分别赋值 1、3、5、7。生态阻力等级越低,表明生态源地保护越容易实现,反之则说明生活源地有更大扩张潜力,生活阻力同理。各因子权重采用层次分析法确定。等级划分与因子重要性判断依据研究区现状与已有研究经验<sup>[24-27]</sup>确定,具体划分如表 2 所示。

##### (3) 最小累计阻力测算

最小累计阻力模型由 Knaapen<sup>[28]</sup>提出的费用距离模型改进而来,可以计算物种从源地到目的地迁移过程中的最小成本路径,反映物种运动潜在可能性及趋势。采用最小累计阻力模型分别计算生态源地与生活源地向外扩张的最小累计阻力,进而计算二者差值。具体公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} R_i \quad (1)$$

式中, $MCR$  为源地扩张至某一栅格像元的最小累积阻力; $f_{\min}$  为表示空间距离与阻力系数变量的正相关函数; $n$ 、 $m$  为生态源地与景观类型的数量; $D_{ij}$  为从栅格  $i$  到源地  $j$  的距离; $R_i$  为栅格  $i$  的阻力系数值。

表 2 阻力因子指标评价体系

Tab. 2 Evaluation system of the resistance factor index

	生态/生活 阻力等级	高程/m	坡度/(°)	土地利用 类型	NDVI	年平均 降水/mm	距水体 距离/m	距道路 距离/m	人口分布/ (人/km <sup>2</sup> )
	1/7	<150	<8	林地、水体	0.80~1.00	<2100	<100	>500	57~90
阻力因	3/5	150~250	8~15	草地	0.60~0.80	1950~2100	100~400	200~500	90~103
子分级	5/3	250~350	15~25	耕地	0.40~0.60	1800~1950	400~800	50~200	103~149
	7/1	>350	>25	建设用地	<0.40	<1800	>800	<50	149~238
权重		0.1021	0.0569	0.2846	0.1864	0.0950	0.0481	0.0800	0.1469

$$MCR_{\text{差值}} = MCR_{\text{生态}} - MCR_{\text{生活}} \quad (2)$$

式中, $MCR_{\text{生态}}$ 为生态源地向外扩张的最小累计阻力; $MCR_{\text{生活}}$ 为生活源地向外扩张的最小累计阻力; $MCR_{\text{差值}}$ 为两者之差。当 $MCR_{\text{差值}} < 0$ 时,表明生态源地越可能实现向外扩张,其生态保护的优先级越高;反之则表明生活源地越可能实现向外扩张,其开发建设的优先级越高<sup>[29]</sup>。

对不同最小累计阻力差值所对应的栅格数量进行突变检验,发现当最小累计阻力差值为-161 548.81、-87 359.46、-36 805.65 和 1930.38 时,栅格数量发生突变。以突变点为依据,聚类划分出建阳区生态安全格局下的各土地功能区<sup>[30]</sup>,依次为生态保护区、生态缓冲区、限制开发区、缓冲开发区和适宜开发区。

### 1.3.3 多情景设置

设置惯性发展、经济发展优先、生态保护优先与可持续发展四个情景:

(1)惯性发展情景中,以 2010—2020 年土地利用时空变化规律为基础,假设规律保持不变,且不考虑任何新增政策因素,仅使用马尔科夫模型对建阳区 2030 年各土地利用类型规模进行预测。

(2)经济发展优先情景中,分析 2010—2020 年土地利用转移弦图(图 2)发现,建设用地主要来自耕地和林地的转换。参考前人研究经验<sup>[31-32]</sup>,将耕地和林地转向建设用地的转换概率提高 30%,建设用地向除耕地以外的其他用地类型转换概率降低 20%。

(3)生态保护优先情景中,参照福建省重要生态系统保护和修复重大工程实施方案<sup>[33]</sup>,将林地、草地向建设用地的转换概率降低 40%,耕地向建设

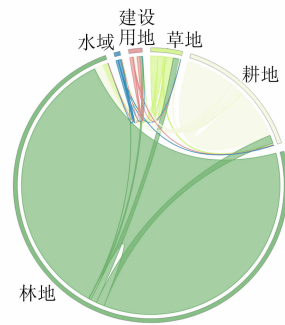


图 2 2010—2020 年土地利用转移弦图

Fig. 2 Chord diagram of land use transfer from 2010 to 2020

用地转换概率降低 20%,将耕地和草地向林地转换概率提高 30%,并严格限制林地转换。

(4)可持续发展情景中,使用多目标规划模型进行用地需求预测,包含决策变量、目标函数、约束条件三部分,权衡经济与生态双重目标,设置两个目标函数,分别为经济效益和生态效益最大化,公式如下:

$$E_1 = \max \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (3)$$

$$E_2 = \max \sum_{i=1}^n b_i x_i \quad (4)$$

式中, $E_1$ 为经济效益(万元/hm<sup>2</sup>); $a_i$ 为经济效益系数; $x_i$ 为第*i*类决策变量( $i = 1 \sim 5$ ),分别为耕地、林地、草地、水体和建设用地; $E_2$ 为生态效益(万元/hm<sup>2</sup>); $b_i$ 为生态效益系数。参照已有研究<sup>[9]</sup>,确定 2030 年福建省各地类经济效益系数和生态效益系数,目标函数公式如下:

$$E_1 = 13.41x_1 + 0.97x_2 + 20.77x_3 + 117.92x_4 + 1196.84x_5 \quad (5)$$

$$E_2 = 1.55x_1 + 10.40x_2 + 8.88x_3 + 56.62x_4 - 6.43x_5 \quad (6)$$

约束条件设置如表 3 所示。

表 3 多目标规划约束条件  
Tab. 3 Constraint conditions of the multi-objective programming

约束类型	约束条件
总面积约束	模拟前后各用地类型总面积不变,各用地类型面积和为 338 540.67 hm <sup>2</sup> 。
耕地约束	根据福建省人民政府制定的远景目标 <sup>[34]</sup> ,到 2030 年全省粮食综合生产能力稳定在 5 × 10 <sup>6</sup> t 以上,通过现有粮食综合生产能力与各区耕地面积占比计算,耕地面积不应少于 50 549.78 hm <sup>2</sup> 。
林地约束	根据南平市人民政府制定的远景目标与武夷新区城市总体规划 <sup>[35-36]</sup> ,南平市森林覆盖率保持全省前列,因此森林覆盖率不低于 76.5%,林地面积不应少于 258 983.61 hm <sup>2</sup> 。
草地、水体约束	适量草地和水体具有涵养水源、减少水土流失等重要作用,同时参考南平市远景目标 <sup>[35]</sup> ,到 2030 年草地、水体面积不应低于 2020 年的 95%,因此草地面积不应少于 12 263.86 hm <sup>2</sup> ,水体面积不应少于 2830.22 hm <sup>2</sup> 。
建设用地约束	根据已有地区生产总值与建设用地面积关系的研究 <sup>[37]</sup> 与南平市远景目标 <sup>[35]</sup> 中 GDP 年均增长目标测算,建设用地面积不应少于 12 729.07 hm <sup>2</sup> 。

1.3.4 土地利用变化模拟

(1) PLUS 模型

PLUS 模型是一种基于元胞自动机的土地利用变化模拟模型,以土地利用变化数据及其驱动因子数据,以及不同情景下土地利用预测规模与约束条件为输入,可以在斑块尺度上反映土地利用扩张的驱动机理和景观演化过程,结合考虑未来规划政策对土地利用变化的影响,最终模拟输出未来多情景土地利用空间格局。该模型在用地扩张分析策略模块(Land Expansion Analysis Strategy, LEAS)基础上,融合随机种子生成机制与阈值递减机制模块

(Cellular Automata with Random Seeds, CARS)进行用地类型模拟。LEAS 模块可以计算各驱动因子贡献度,其综合了转换分析策略和格局分析策略的优势,且弥补了两者在转换规则挖掘方面的不足;CARS 模块在发展概率的约束控制下,可以动态生成斑块,模拟未来土地利用变化。该模型不仅能够模拟城市土地利用类型的斑块演变,还能模拟多种自然土地利用类型的斑块扩张,并保持其形态特征。

(2) 精度验证

选取总体分类精度和 Kappa 系数作为评估土地利用变化模拟精度的指标。总体分类精度整体反映正确分类的像元数与总类别数的比例,Kappa 系数反映评估的分类模型相对于完全随机分类的错误减少比例,接近 1 表示模拟效果更为准确。

2 结果分析

2.1 基于 MCR 的土地功能分区

2.1.1 RSEI 识别结果与阻力面构建

采用主成分分析法提取最能表征生态环境质量的综合因子。绿度、湿度、干度和热度四个指标第一主成分贡献率为 85.48%,可用于表示研究区域的整体生态现状。建阳区 2020 年 RSEI 均值为 0.75,整体生态较优。5 个生态等级从优到差分别占比 49.16%、35.65%、11.65%、3.49% 和 0.05%。较差和差等级主要分布在研究区中部的中心城区,而优、良等级主要分布于研究区东西两翼地区的山区(图 3a)。由生态等级识别的生态源地与 MSPA 识别的生活源地呈现明显空间分异(图 3b),其中生态源地分布于研究区两翼,且主要集中于右翼,而生活源地则集中于中心城区。

基于 8 种阻力因子及权重值,计算得出建阳区

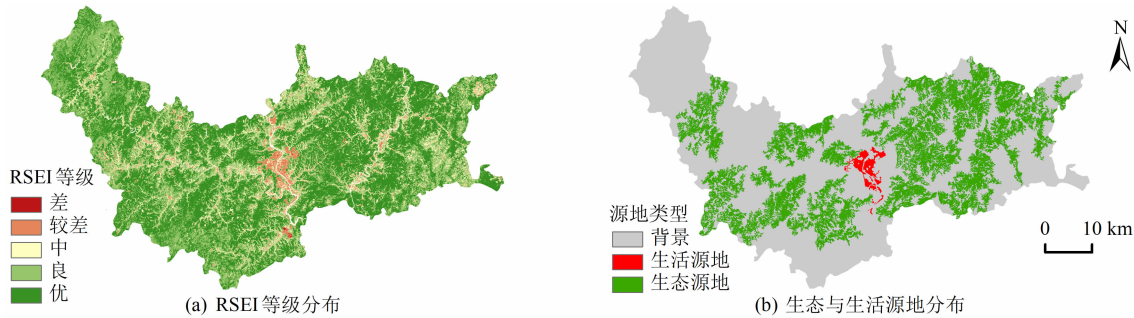


图 3 RSEI 等级分布与源地识别结果  
Fig. 3 Distribution of RSEI level and source identification



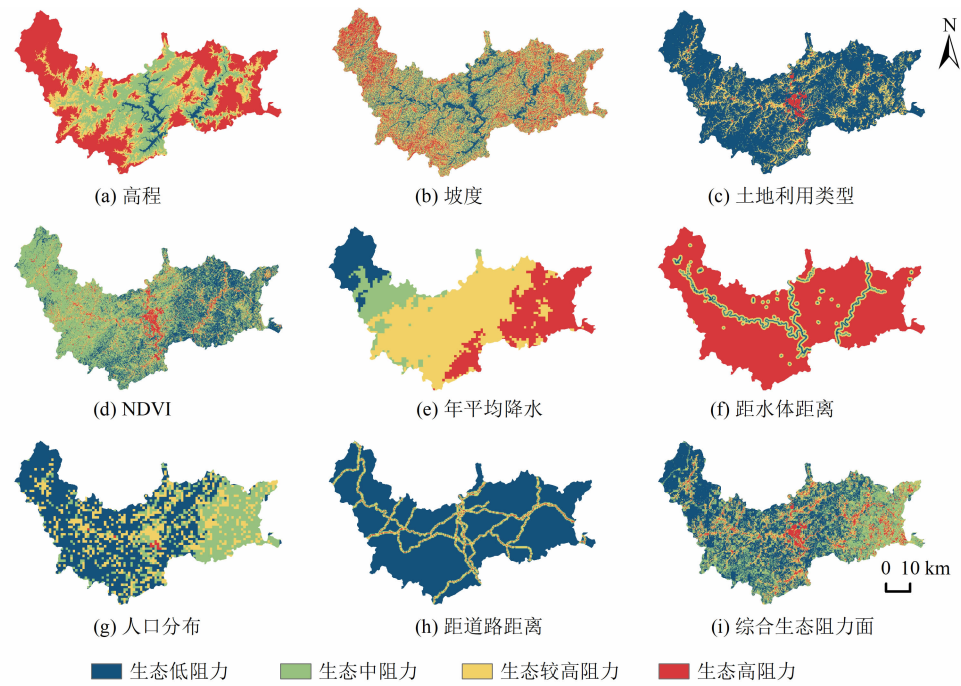


图 4 各阻力因子与综合生态阻力面

Fig. 4 Distribution of resistance factors and comprehensive ecological resistance

各因子阻力值(图 4a ~ 4h)与综合生态阻力(图 4i),综合生态阻力从低到高等级的面积占比分别为 44.80%、34.14%、13.93% 和 7.13%。高阻力值地区主要集中在中心城区附近,阻力值从中心到东西两翼逐渐降低,较低阻力值主要集中在西部的大竹岚、坑上等地。生活源阻力面与生态阻力面等级相反。

### 2.1.2 土地功能分区结果

建阳区内 5 种功能分区呈环状分布(图 5),中心为适宜开发区,面积占比为 3.17%,多分布在中部较平缓地区,已具备一定开发基础,是未来建设用地发展的主要区域。

缓冲开发区面积占比为 27.94%,作为未来城

镇发展或其他生产用地的弹性发展区域,应控制城乡建设用地规模,适度保留耕地作为后备资源,并推进基本农田建设。

限制开发区面积占比为 26.73%,位于缓冲开发区外围,分布于建阳区东西两翼,作为主要农业生产基地,具有重要的粮食生产功能,应实行最严格的耕地和基本农田保护制度,缓解粮食生产与城镇建设之间的矛盾,保持耕地数量,调整耕地结构,提高耕地产出效益。

生态缓冲区面积占比为 25.68%,位于限制开发区外围,对保护生态系统的稳定性、维持生态安全格局、提高生态环境质量具有重要作用。

最外围为生态保护区,面积占比为 16.48%,其地势较高、水系发达,人口稀少,是天然生态屏障,有大竹岚自然保护区、白塔山森林公园等各类保护区,应禁止或严格限制开发建设活动,并实施有效监督和保护,恢复和提升生态系统服务功能。

### 2.2 多情景模拟结果

基于 2000—2010 年土地利用变化,对建阳区 2020 年土地利用变化进行模拟,并与 2020 年真实土地利用数据进行对比验证,总体精度为 0.9291, Kappa 系数为 0.8097,表明 PLUS 模型可较好地模拟建阳区土地利用变化空间格局(图 6)。

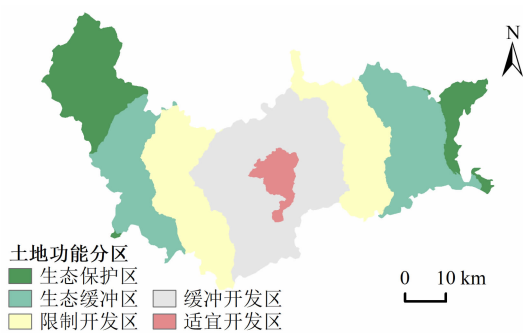


图 5 土地功能分区

Fig. 5 Land function zoning of the research area

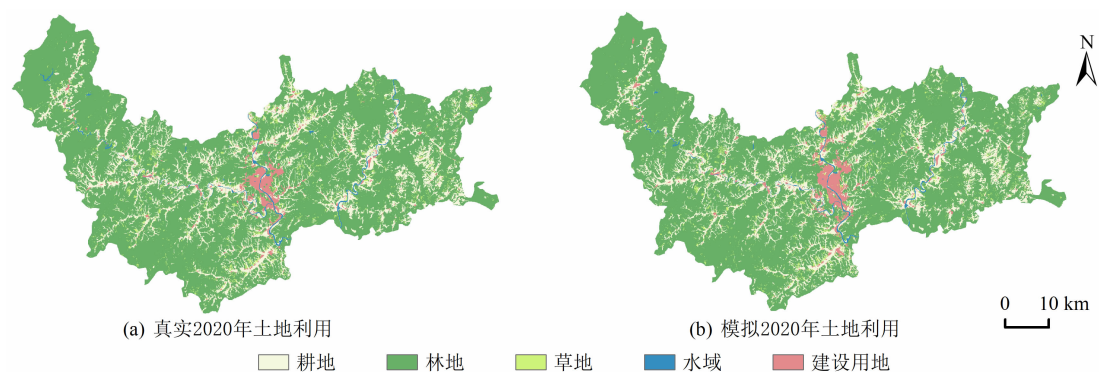


图6 模拟结果验证对比

Fig. 6 Comparison of simulation validation

以建阳区 2020 年实际土地利用数据为基础,应用通过验证的模型对建阳区 2030 年 4 种情景下土地利用空间格局进行模拟,得到各情景下不同用地类型面积变化(图 7)与空间分布格局(图 8)。

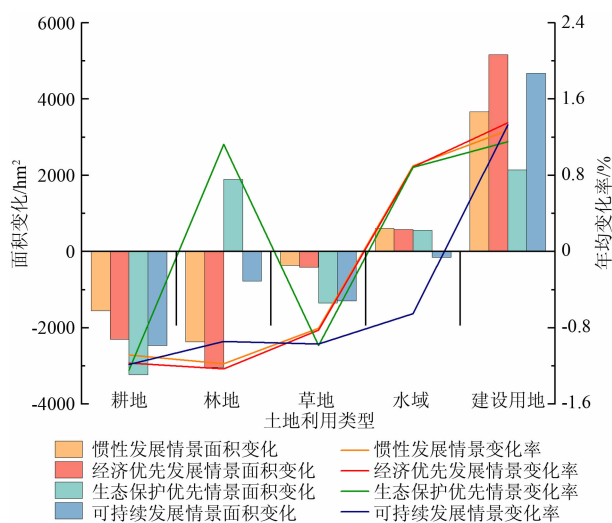


图7 各情景下不同用地类型面积变化及年均变化率

Fig. 7 Area changes and annual average change rates of different scenarios

惯性发展情景下,林地、耕地主要转为建设用地,具体表现为建设用地新增 3665.25  $\text{hm}^2$ ,林地减少 2361.15  $\text{hm}^2$ ,耕地减少 1548.18  $\text{hm}^2$ 。从空间格局上看,在限制开发区内的后山村、上布村等地出现建设用地较大幅度扩张,在生态保护区内的九峰山等地区出现新增耕地。

经济发展优先情景下,建设用地加速扩张,新增 5165.19  $\text{hm}^2$ 。在生态保护区内的眠林坑、中蕉溪等生态较优地区同样出现大面积建设用地,林地共减

少 3038  $\text{hm}^2$ 。该情景下,建设用地大幅增长,导致林地、耕地减少加剧,严重影响研究区的生态建设。

生态保护优先情景下,林地得到最大程度保护,相对其他情景实现唯一正增长,新增林地 1887.12  $\text{hm}^2$ ,而建设用地增加 2140.11  $\text{hm}^2$ 。该情景下,耕地由于退耕还林政策的实施以及建设用地占用,减少了 3230.37  $\text{hm}^2$ 。在倡导生态优先背景下,建设用地随意扩张虽然在一定程度上得到抑制,但对耕地的保护仍然有限。

可持续发展情景下,顺应国土空间开发适宜性评价,将土地功能分区中的生态保护区与限制开发区作为禁止转换区,严格保护地区基本农田与各类保护区。建设用地新增 4673.03  $\text{hm}^2$ ,主要集中在已建城区北部,与武夷新区规划的重点建设区相符,大都集中于适宜开发区,因此可以高效合理利用土地资源,有助于城市基础设施的建设和完善,同时生产和生态空间也得到一定保护,将使耕地减少 2463.7  $\text{hm}^2$ 、林地减少 769.45  $\text{hm}^2$ 。

可持续发展是一种在经济发展的同时保护生态环境,实现协调发展的路径。将可持续发展情景与其他 3 种情景分别展开比较(图 9)。经济发展优先情景下,生态保护区内建设用地迅速扩张,侵占较多林地、耕地,加剧空间冲突;惯性发展情景和生态保护优先情景下,适宜开发区和缓冲开发区的中心区域内各种用地交错分布,缺乏合理规划与协调,影响空间功能有效发挥和优化,导致土地利用效率低下,城市功能分区模糊;可持续发展情景下的土地利用能有效避免上述问题,使城镇建设更加紧凑并呈组团式发展,建设用地在中心城区的兴田、将口、南林等地集中连片扩张,更加切合武夷新区与福州都市

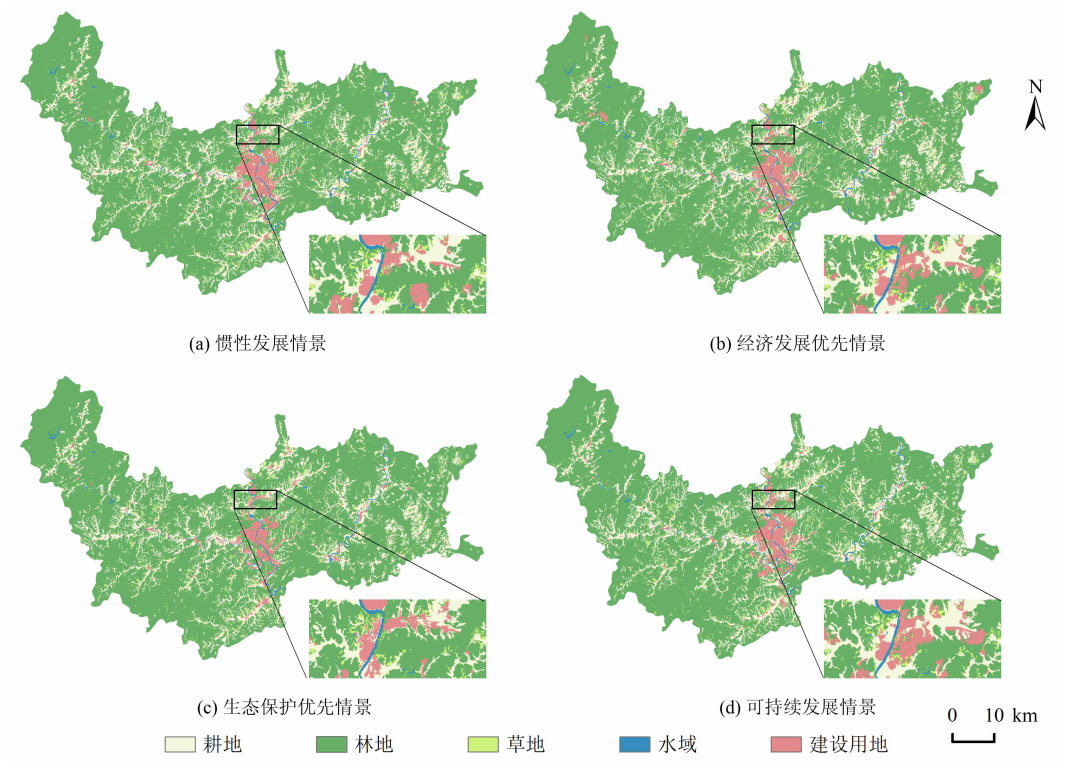


图 8 多情景模拟结果

Fig. 8 Simulation results of multiple scenarios

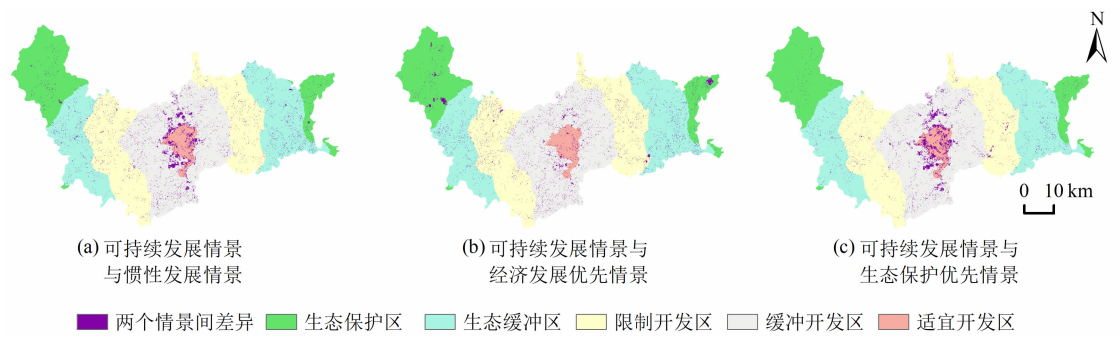


图 9 可持续发展情景与其他各情景比较

Fig. 9 Comparison of the sustainable development scenario with various other scenarios

圈发展规划,实现土地资源高效利用。

3 讨论

建阳区正面临生态文明建设与经济社会协调发展的双重挑战。应用 RSEI-MCR-PLUS 耦合模型对建阳区 2030 年多种情景土地利用进行模拟。RSEI 综合绿度、湿度、干度和热度四个指标能够克服人为因素干扰,较全面地反映区域生态环境质量,精确客观地以遥感数据确定生态源地,且在此基础上使用 MCR 划定在生态约束条件下的禁止转换区,与前人

研究<sup>[38]</sup>得出的高森林单位蓄积量分布地区基本一致,表明基于 RSEI-MCR 模型的土地功能分区方法能够为构建国土空间开发保护格局提供一定借鉴。基于此,采用“现状评价+功能区划+目标约束”研究模式,耦合 RSEI-MCR-PLUS 模型,模拟多情景下土地利用变化,能够克服土地利用现状静态分析缺陷,准确分析土地扩张策略,并根据不同发展导向模拟相应土地利用空间格局,为国土空间规划和土地资源高质量利用提供可靠方案和有效依据。

通过对比多种情景下的土地利用空间格局可以发现,可持续发展情景是城市未来较为理想的健康



发展状态。为实现区域可持续发展,需建立清晰的国土空间规划,明确定义各土地用途,包括生态保护用地和城市发展用地,以保证资源合理配置。南方山区生态多样性丰富,应积极保护自然资源和生态系统,维护生物多样性,减少土地开发对环境造成的负面影响。在山区小尺度区域,由于地形复杂和土地资源有限,应鼓励城市紧凑发展,逐步整合小型斑块,城市由分散型向聚集型转变,以减缓景观破碎化趋势,并严格控制城市用地盲目扩张,降低资源消耗,从而实现资源、生态和城市发展的可持续协调发展。

研究结果较为准确地预测了在不同情景下 2030 年建阳区土地利用空间格局,但仍存在以下问题:一是个别土地利用驱动因子因为数据获取困难而未采用,可能导致土地利用变化模拟结果存在一定偏颇;二是 PLUS 模型中的参数如随机森林参数、领域权重等是根据已有经验及多次测试而确定,存在一定主观性,有待提升完善。

## 4 结论

构建阻力面并使用最小累计阻力模型进行土地功能分区,基于 2010—2020 年建阳区土地利用变化,采用 RSEI-MCR-PLUS 耦合模型对 2030 年四种情景下土地利用进行模拟预测,得出以下结论。

(1) 计算最小累计阻力差值,将建阳区划分为适宜开发区、缓冲开发区、限制开发区、生态缓冲区和生态保护区。缓冲开发区面积占比最高,说明建阳区具有一定土地开发基础与潜力。土地功能分区总体呈现以适宜开发区为中心的环状分布,位于两翼的限制开发区作为耕地保护重点区,应保障粮食生产。同时最外围的生态保护区应严格控制开发建设,以保护其生态屏障功能。

(2) 通过精度验证,Kappa 系数达到 0.8097,总体精度达到 0.9291,证实 PLUS 模型对建阳区土地利用变化有较高的模拟能力,适用于本区域未来其他相关研究。现有研究常利用 PLUS 模型研究大尺度区域,经此验证,说明该模型同样适用于土地利用破碎化程度较高的小尺度区域。

(3) 从模拟结果看,不同情景下各用地类型空间格局均未发生较大改变,但土地功能区内部差异明显。惯性发展情景下,土地利用布局不合理,在优

质耕地被侵占的同时,部分生态保护区土地又被转换为耕地;经济发展优先情景下,建设用地侵占林地和耕地,造成生态系统功能破坏;生态保护优先情景下,原有林地得到最大程度保护,但生态用地增加造成耕地流失或城市扩张受阻。相较于上述三种情景,可持续发展情景具有更高的土地利用弹性,可以较好地协调经济与生态效益,减小各用地间的冲突。加强对建设用地格局的优化,使其组团式发展,实现规模效益,更加符合研究区的现实基础与政策导向,更有利于构建高质量的国土空间格局。

## 致谢

衷心感谢福建师范大学文化旅游与公共管理学院包战雄副教授和地理科学学院秦素珍同学对本研究给予的支持和帮助。

## 参考文献 (References)

- [1] 魏明欢, 胡波洋, 杨鸿雁, 等. 山区县域土地利用变化对生态脆弱性的影响——以青龙满族自治县为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 322 - 328. [WEI Minghuan, HU Boyang, YANG Hongyan, et al. Effects of land use transformation on ecological vulnerability in mountainous counties: Taking Qinglong Manchu autonomous county as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 322 - 328] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.046
- [2] 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 模型研究进展[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 456 - 468. [TANG Huajun, WU Wenbin, YANG Peng, et al. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(4): 456 - 468] DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.04.008
- [3] 郭敏, 王士君, 余娜. 长白山区生态用地破碎化演变及土地利用变化研究[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(1): 14 - 22. [GUO Min, WANG Shijun, YU Na. Ecological land fragmentation evaluation and dynamic changes in Changbai Mountain areas [J]. Resource Development and Market, 2020, 36(1): 14 - 22] DOI: 10.3969/j.issn.1005-8141.2020.01.003
- [4] 李琛, 高彬媛, 吴映梅, 等. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 84 - 94. [LI Chen, GAO Binpin, WU Yingmei, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model [J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2022, 39(1): 84 - 94] DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210237
- [5] 杨建新. 国土空间开发布局优化方法研究——以武汉市为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019: 3 - 11. [Research on methods

- for spatial optimization of territory development – take Wuhan as an example [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019: 3 – 11] DOI: 10.27492/d.cnki.gzdu.2019.000254
- [6] YAO Fengmei, HAO Cui, ZHANG Jiahua. Simulating urban growth processes by integrating cellular automata model and artificial optimization in Binhai New Area of Tianjin, China [J]. *Geocarto International*, 2016, **31** (6): 612 – 627. DOI: 10.1080/10106049.2015.1073365
- [7] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. *干旱区地理*, 2022, **45**(4): 1125 – 1136. [HU Feng, ZHANG Yan, GUO Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45** (4): 1125 – 1136] DOI: 10.12118/j.issn.1000 – 6060.2021.510
- [8] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测——以广东省为例[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4827 – 4839. [LIN Tong, YANG Muzhuang, WU Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study in Guangdong province [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42** (10): 4827 – 4839] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000 – 6923.2022.0172
- [9] 李代超, 卢嘉奇, 谢晓苇, 等. 碳中和视角下基于主体功能区分类约束的国土空间分区优化模拟——以福建省为例[J]. *生态学报*, 2022, **42**(24): 10111 – 10126. [LI Daichao, LU Jiaqi, XIE Xiaowei, et al. Optimization simulation of land space zoning based on the classification constraints of main functional zones from the perspective of carbon neutrality: A case study of Fujian province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42** (24): 10111 – 10126] DOI: 10.5846/stxb202112173585
- [10] 巩晟萱, 张玉虎, 李宇航. 基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, **37**(6): 20 – 28. [GONG Shengxuan, ZHANG Yuhu, LI Yuhang. Spatio-temporal variation and prediction of carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei region: A PLUS-InVEST model approach [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, **37** (6): 20 – 28] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2023.133
- [11] 如克亚·热合曼, 阿里木江·卡斯木, 希丽娜依·多来提, 等. 天山北坡城市群碳储量时空变化及预测研究[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(12): 5905 – 5917. [REHEMAN · Rukeya, KASIMU · Alimujiang, DUOLAT · Xilinayi, et al. Temporal and spatial variation and prediction of carbon storage in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42** (12): 5905 – 5917] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000 – 6923.20220914.030
- [12] 王子尧, 孟露, 李惊, 等. 低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究[J]. *生态学报*, 2023, **43**(9): 3571 – 3581. [WANG Ziyao, MENG Lu, LI Jiang, et al. Multi-scenario simulation of land use and ecosystem services in Beijing under the background of low-carbon development [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43** (9): 3571 – 3581] DOI: 10.5846/stxb202202050296
- [13] 李世锋, 洪增林, 薛旭平, 等. 基于 Logistic-CA-Markov 耦合模型的彬州市 LUCC 多情景模拟[J]. *水土保持研究*, 2022, **29** (4): 292 – 299. [LI Shifeng, HONG Zenglin, XUE Xuping, et al. Multi-scenario simulation of LUCC in Binzhou city based on Logistic-CA-Markov coupling model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29** (4): 292 – 299] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.04.030
- [14] 张大川, 刘小平, 姚尧, 等. 基于随机森林 CA 的东莞市多类土地利用变化模拟[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, **32**(5): 29 – 36 + 127. [ZHANG Dachuan, LIU Xiaoping, YAO Yao, et al. Simulating spatiotemporal change of multiple land use types in Dongguan by using random forest based on cellular automata [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, **32** (5): 29 – 36 + 127] DOI: 10.3969/j.issn.1672 – 0504.2016.05.005
- [15] 林丽, 樊辉, 金缘. 山区县域土地利用/覆被变化多尺度多模型模拟对比——以云南省勐腊县为例[J]. *山地学报*, 2020, **38**(4): 630 – 642. [LIN Li, FAN Hui, JIN Yuan. Multi-scale and multi-model simulation of land use/land cover change in the mountainous county: A case study of Mengla county in Yunnan province, China [J]. *Mountain Research*, 2020, **38** (4): 630 – 642] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000540
- [16] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB 多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. *地球信息科学学报*, 2018, **20** (4): 532 – 542. [WU Xinxin, LIU Xiaoping, LIANG Xun, et al. Multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, **20** (4): 532 – 542] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180052
- [17] LIANG Xun, GUAN Qingfeng, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, **85**: 101569. DOI: 10.1016/j.compenurbsys.2020.101569
- [18] 许杰玉, 毛磊, 郑婷婷, 等. 环国家公园地区生态保护规划研究——以环武夷山国家公园保护发展带为例[J]. *环境生态学*, 2022, **4**(12): 31 – 36. [XU Jieyu, MAO Lei, ZHENG Tingting, et al. Research on ecological protection planning of surrounding area of national park: A case study of the protection and development belt of Wuyishan National Park [J]. *Environmental Ecology*, 2022, **4** (12): 31 – 36] DOI: 10.1016/j.enveco.2022.12.0031 – 06
- [19] 南平市自然资源局. 环武夷山国家公园保护发展带总体规划 (2021—2035 年) [EB/OL]. (2023-04-22) [2023-08-22]. <https://www.np.gov.cn/cms/html/npszf/2023-04-22/1545206867>.

- html [Nanping Natural Resources Burea. Master plan of the protection and development area around Wuyi Mountain National Park (2021 – 2035) [EB/OL] (2023-04-22) [2023-08-22]. <https://www.np.gov.cn/cms/html/npszf/2023-04-22/1545206867.html>]
- [20] 钟奕纯, 李丽国, 扈茗, 等. 生态文明背景下省际交界碳汇地区的绿色高质量发展路径探索——以闽浙赣交界地区南平市为例[C]//中国城市规划学会, 成都市人民政府. 面向高质量发展的空间治理——2021中国城市规划年会论文集(20总体规划). 北京:《城市规划》杂志社, 2021: 471 – 480. [ZHONG Yichun, LI Ligu, HU Ming, et al. Exploring the green and high-quality development path of carbon sink areas at provincial borders under the background of ecological civilization; Taking Nanping city at the junction of Fujian, Zhejiang and Jiangxi as an example [C]//China Urban Planning Association, Chengdu Municipal People's Government. Spatial governance for high-quality development – 2021 China Urban Planning Annual Conference Proceedings (20 Master Plan). Beijing: 'Urban Planning' Magazine, 2021: 471 – 480] DOI: 10.26914/c.cnkihy.2021.024493
- [21] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, **33**(24): 7853 – 7862. [XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(24): 7853 – 7862] DOI: 10.5846/stxb201208301223
- [22] 蒋若琳, 龚本海, 王艺锦, 等. 基于 MSPA 与 MCR 的崇左市生态网络构建与优化[J]. 江西农业学报, 2022, **34**(7): 122 – 129. [JIANG Ruolin, GONG Benhai, WANG Yijin, et al. Construction and optimization of ecological network in Chongzuo city based on MSPA and MCR model [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, **34**(7): 122 – 129] DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2022.07.021
- [23] 刘一丁, 何政伟, 陈俊华, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的生态网络构建方法研究——以南充市为例[J]. 西南农业学报, 2021, **34**(2): 354 – 363. [LIU Yiding, HE Zhengwei, CHEN Junhua, et al. Ecological network construction method based on MSPA and MCR model; Taking Nanchong as example [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, **34**(2): 354 – 363] DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2021.2.019
- [24] 姚采云, 安睿, 窦超, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的三峡库区林地生态网络构建与评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(9): 1953 – 1962. [YAO Caiyun, AN Rui, DOU Chao, et al. Research on construction and evaluation of forest land ecological network in Three Gorges Reservoir Area based on MSPA and MCR model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(9): 1953 – 1962] DOI: 10.11870/cjlyzyhj202209008
- [25] 付梦娣, 罗建武, 田瑜, 等. 基于最小累积阻力模型的自然保护区网络构建与优化——以秦岭地区为例[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(4): 1135 – 1143. [FU Mengdi, LUO Jianwu, TIAN Yu, et al. Establishment and fine-tuning of nature reserve networks based on minimum cumulative resistance model; A case study of Mountain Qinling region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(4): 1135 – 1143] DOI: 10.13292/j.1000 – 4890.201804.020
- [26] 蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2012, **32**(21): 6755 – 6766. [MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qian, et al. Building ecological security pattern based on land use; A case study of Ordos, northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(21): 6755 – 6766] DOI: 10.5846/stxb201109201384
- [27] 李健飞, 李林, 郭砾, 等. 基于最小累积阻力模型的珠海市生态适宜性评价[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(1): 225 – 232. [LI Jianfei, LI Lin, GUO Luo, et al. Assessment on the ecological suitability in Zhuhai city, Guangdong, China, based on minimum cumulative resistance model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(1): 225 – 232] DOI: 10.13287/j.1001 – 9332.201601.008
- [28] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992, **23**(1): 1 – 16. DOI: 10.1016/0169 – 2046(92)90060 – d
- [29] 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. [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, 2022, **38**(10): 267 – 276] DOI: 10.11975/j.issn.1002 – 6819.2022.10.032
- [30] 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] DOI: 10.6041/j.issn.1000 – 1298.2021.04.017
- [31] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2023, **43**(1): 378 – 387. [LI Jun, YANG Dehong, WU Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, **43**(1): 378 – 387] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.009
- [32] 张瀚宇, 史名杰, 曹月娥, 等. 基于 MOP-PLUS 模型的新疆阿克苏地区土地利用景观格局优化及多情景模拟[J]. 西南农业学报, 2022, **35**(10): 2256 – 2264. [ZHANG Haoyu, SHI Mingjie, CAO Yue'e, et al. Optimization of land use landscape pattern and multi scenario simulation in Aksu region of Xinjiang based on MOP-PLUS model [J]. Southwest China Journal of

- Agricultural Sciences, 2022, **35** (10): 2256 – 2264 ] DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2022.10.004
- [33] 福建省发展和改革委员会, 福建省自然资源厅. 福建省重要生态系统保护和修复重大工程实施方案 (2021—2035 年) [EB/OL]. (2021-01-27) [2023-08-22]. [http://fgw.fujian.gov.cn/zfxgkzl/zfxgkml/yzdgdqtxx/202104/t20210402\\_5562196.htm](http://fgw.fujian.gov.cn/zfxgkzl/zfxgkml/yzdgdqtxx/202104/t20210402_5562196.htm) [Fujian Provincial Development and Reform Commission, Fujian Provincial Department of Natural Resources. Implementation plan of major projects for the protection and restoration of important ecosystems in Fujian province (2021 – 2035) [EB/OL] (2021-01-27) [2023-08-22]. [http://fgw.fujian.gov.cn/zfxgkzl/zfxgkml/yzdgdqtxx/202104/t20210402\\_5562196.htm](http://fgw.fujian.gov.cn/zfxgkzl/zfxgkml/yzdgdqtxx/202104/t20210402_5562196.htm)]
- [34] 福建省人民政府. 福建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 [EB/OL]. (2021-01-27) [2023-08-22]. <https://www.fujian.gov.cn/zwgk/ghjh/zcqlfzgh/202103/P020210319672291272649.pdf> [The People's Government of Fujian Province. Fourteenth five-year plan for national economic and social development of Fujian Province and the long-range objectives through the year 2035 [EB/OL] (2021-01-27) [2023-08-22]. <https://www.fujian.gov.cn/zwgk/ghjh/zcqlfzgh/202103/P020210319672291272649.pdf>]
- [35] 南平市人民政府. 南平市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 [EB/OL]. (2021-01-18) [2023-08-22]. [https://www.wuyiu.edu.cn/\\_upload/article/files/99/b5/e16000274a8c92a9924952ecc75e/87a656ae-df56-49cd-82a1-fed3c5bb473f.pdf](https://www.wuyiu.edu.cn/_upload/article/files/99/b5/e16000274a8c92a9924952ecc75e/87a656ae-df56-49cd-82a1-fed3c5bb473f.pdf) [The People's Government of Nanping City. Fourteenth five-year plan for national economic and social development of Nanping city and the long-range objectives through the year 2035 [EB/OL] (2021-01-18) [2023-08-22]. [https://www.wuyiu.edu.cn/\\_upload/article/files/99/b5/e16000274a8c92a9924952ecc75e/87a656ae-df56-49cd-82a1-fed3c5bb473f.pdf](https://www.wuyiu.edu.cn/_upload/article/files/99/b5/e16000274a8c92a9924952ecc75e/87a656ae-df56-49cd-82a1-fed3c5bb473f.pdf)]
- [36] 南平市人民政府. 武夷新区城市总体规划 [EB/OL]. (2012-03-30) [2023-08-22]. <https://www.np.gov.cn/cms/html/npszf/2012-03-30/1235960004.html> [The People's Government of Nanping City. Overall urban planning of Wuyi new district [EB/OL] (2012-03-30) [2023-08-22]. <https://www.np.gov.cn/cms/html/npszf/2012-03-30/1235960004.html>]
- [37] 王志伟, 魏宇, 李灵敏, 等. 建设用地需求预测方法的比较研究——以山东省为例 [J]. 绿色科技, 2022, **24** (13): 170 – 177. [WANG Zhiwei, WEI Yu, LI Min, et al. Comparison of construction land demand forecasting methods: A case study of Shandong province [J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, **24** (13): 170 – 177 ] DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2022.13.062
- [38] 严绍裕. 县域森林蓄积量的空间自相关分析 [J]. 武夷学院学报, 2021, **40** (12): 24 – 29. [YAN Shaoyu. Spatial autocorrelation analysis of forest volume in county [J]. Journal of Wuyi University, 2021, **40** (12): 24 – 29 ] DOI: 10.14155/j.cnki.35-1293/g4.2021.12.020

## Multi-Scenario Simulation of Land Use Changes Integrated with Functional Zoning: A Case Study of Jianyang District of Nanping, Fujian Province, China

MA Yongjian, XIE Hongbin<sup>\*</sup>, DENG Hongrui, CAI Siqi, LIU Qiang

(*a.* College of Geographic Sciences;

*b.* Cultivation Base of State Key Laboratory of Moist Subtropical Mountain Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

**Abstract:** Multi-scenario simulation of land use change is a prerequisite for rational allocation of land resources. Previous research focused on larger-scale regions, such as provinces and urban clusters. Little attention was paid to the land use changes and the associated ecological security constraints of southern small mountainous towns.

In this study, it utilized the RSEI-MCR-PLUS model to delineate the land functions in Jianyang district, Nanping city, Fujian province, China, integrating land functional zoning under ecological constraints into land-use change simulations. Simulations and comparative analyses of the spatial patterns of land-use in 2030 were conducted under four distinct scenarios: inertia development, economic development priority, ecological protection priority, and sustainable development.



It found that (1) in the Jianyang district, it could divide into four zones: suitable development zones, buffer development zones, restricted development zones, ecological buffer zones and ecological protection zones, accounting for 3.17% , 27.94% , 26.73% , 25.68% , and 16.48% of whole area, respectively. Each functional zone spatially arranged in a ring around the suitable development zone.

(2) In the inertia development scenario, construction land expanded in a multi-point diffusion pattern, poor utilization of land resources. In contrast, under the economic development priority scenario, new construction land encroached forest land and arable land, exacerbating spatial conflicts. In the context of the ecological protection priority scenario, it resulted in low efficiency in the use of land resources, thereby curtailing economic development. As for the sustainable development scenario, construction land developed in clusters, ensuring ecosystem protection and proper land resources disposition.

Our findings provide a scientific reference for optimizing regional land space development and conservation pattern and sustainable use of land resources.

**Key words:** land-use change; multi-scenario simulation; functional zoning of land; RSEI-MCR-PLUS model; Jianyang district

(责任编辑 李嵘)