

基于主体功能区划和 FLUS-Markov 模型的 区域国土空间格局模拟

——以福州都市圈为例

徐崇敏, 陈瑾, 张露丹, 林森, 邱荣祖, 胡喜生

(福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: [目的] 模拟 2030 年福州都市圈不同主体功能区各土地利用/覆盖类型空间分布, 预测研究区国土空间格局未来发展趋势。[方法] 基于 2010 和 2020 年土地利用/覆盖现状遥感监测, OpenStreetMap (OSM), digit elevation model (DEM), 夜间灯光及气象等多源数据, 利用 FLUS-Markov 模型基于分区模拟和整体模拟方式分别预测研究区 2030 年的土地利用/覆盖空间结构并进行对比, 探讨各主体功能区土地利用/覆盖时空变化强度差异特征。[结果] ①2020 年福州都市圈各主体功能区模拟精度 kappa 系数均在 0.85 以上, 说明该模型关键参数的组合设置可以有效地模拟不同功能区的土地利用/覆盖空间分布格局; ②与整体模拟相比, 分区模拟结果的单一土地利用动态度、综合土地利用动态度和土地利用程度等指标相对较优, 故分区模拟更适用于区域未来土地利用/覆盖规划。[结论] 基于分区模拟方式的福州都市圈 2030 年模拟结果与主体功能区划的发展目标更加吻合, 因此, 可以结合各功能区发展特点提出各区域经济发展和生态保护的重点方向。

关键词: 主体功能区; FLUS-Markov 模型; 国土空间; 福州都市圈

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)06-0155-12

中图分类号: X321

文献参数: 徐崇敏, 陈瑾, 张露丹, 等. 基于主体功能区划和 FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局模拟 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 155-166. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.020; Xu Chongmin, Chen Jin, Zhang Ludan, et al. Simulation of regional territorial spatial patterns based on major function-oriented zoning and FLUS-Markov model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 155-166.

Simulation of Regional Territorial Spatial Patterns Based on Major Function-Oriented Zoning and FLUS-Markov Model

—A Case Study at Fuzhou Metropolitan Area

Xu Chongmin, Chen Jin, Zhang Ludan, Lin Sen, Qiu Rongzu, Hu Xisheng

(School of Transportation and Civil Engineering, Fujian, Fujian

Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution of land use/cover types of different major function-oriented zoning (MFOZ) areas in the Fuzhou metropolitan area in 2030 was simulated, and the future development trend of the land spatial patterns was predicted. [Methods] Based on multi-source data such as DEM and land use/cover, road network, nighttime light images and meteorological data, the FLUS-Markov model was used to predict and compare the land use/cover structure of the metropolitan area in 2030 based on zoning simulation and overall simulation in order to explore differences in the spatial and temporal change intensity of land use/cover of MFOZ. [Results] ① In 2020, the kappa coefficients of the simulation results of MFOZ in the Fuzhou metropolitan area were all above 0.85, indicating that the combination of key parameters in the

收稿日期: 2022-06-27

修回日期: 2022-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“森林覆盖空间位移的格局、过程与机制”(31971639); 福建省自然科学基金项目(2019J01406); 科技基础资源调查专项(2019FY202108)

第一作者: 徐崇敏(1997—), 女(汉族), 江西省九江市人, 硕士研究生, 研究方向为道路交通环境工程。Email: 472036809@qq.com。

通讯作者: 胡喜生(1979—), 男(汉族), 福建省莆田市人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事道路生态、3S 技术及工程应用研究。Email: xshu@fafu.edu.cn。

model could effectively simulate the spatial distribution pattern of land use/cover in different functional areas; ② Compared with the overall simulation, the better indication of single land use dynamic degree, comprehensive land use dynamic degree and land use degree in zoning results showed that, the zoning simulation was more suitable for future regional land use/cover planning. [Conclusion] The zoning simulation results of the Fuzhou metropolitan area in 2030 were more consistent with the development goals of MFOZ. Therefore, the future regional land use planning could be worked out combined with the development characteristics of MFOZ to propose the key directions of economic development and ecological protection in each region.

Keywords: major function zoning; FLUS-Markov model; tertiary space; Fuzhou metropolitan area

为缓解城市群社会经济利益和生态环境保护的国土空间冲突,统筹国土空间经济高质量发展,实现区域协调发展,分区协调治理方式势在必行。2010年国务院发布了《全国主体功能区规划》,“十四五”期间将继续落实主体功能区制度,构建高质量国土空间格局^[1]。当前,建设主体功能区是生态文明理念下提出的国土开发和保护重大战略,各区域需持续推进主体功能区建设,按照不同主体功能区的任务和重点合理规划国土空间发展方向。

国土空间格局模拟研究已经成为热点,方法上主要分为数量变化和空间变化的模拟模型,数量预测模型常用系统动力学模型(SD)^[2]、马尔科夫链模型(Markov chain)^[3],空间拟模型常用 CLUE-S 模型^[4]、元胞自动机模型(CA)^[5]、SLEUTH^[6]、多智能体系统(MAS)^[7]、未来土地利用模拟模型(future land use simulation, FLUS)^[8]。不同的模型有其相应的功能机制,Markov 模型具有土地利用/覆盖数量预测功能^[3],但难以模拟空间格局演变,而 FLUS 模型具有空间演变分布预测功能且模拟精度高^[2],并运用在城市群^[9-10]、特殊地域^[11]、省^[12-13]、市^[14]、县域等^[15]多尺度区域研究中。本文将 FLUS 模型结合 Markov 模型数量预测优势展开研究。目前,国内对国土空间结构预测主要是从三生空间的角度,将整片区域根据不同规划目标或不同发展情景设置主导目标和约束条件进行研究^[16-18]。但是,实际上大尺度区域范围存在发展不均衡性和地理异质性问题,如不同主体功能区的发展目标并不相同,因此用地的需求也不同,若将研究区域作为整体进行空间预测,则忽略了各区域内部差异性,将导致预测结果的偏差。基于此,从不同主体功能区的角度出发,考虑不同区域的地理特点、发展现状和规划目标等因素设置不同约束条件,模拟结果将更贴合未来国土空间规划发展方向,可以为主体功能区有序发展提供科学依据。

福州都市圈作为福建高质量发展的重要增长极,为深化两岸交流、提升国际化水平提供有力支撑^[19]。

然而目前福州都市圈仍处于发育阶段,区域内深层次合作发展机制尚不成熟,生态环境和资源承载能力并不均衡^[20]。当前,对于福州都市圈国土空间格局模拟的相关研究相对缺乏。鉴于此,本研究以福州都市圈为研究范围,从不同主体功能区视角出发,分析区域土地利用/覆盖类型时空变化,提出基于历史情景和主体功能区规划相结合的邻域因子权重和转换成本矩阵参数设计方法,利用 FLUS-Markov 模型对比基于整体模拟和主体功能区划的分区模拟的 2030 年福州都市圈土地利用/覆盖空间分布差异,预测研究区国土空间格局未来发展趋势,促进区域协调发展。

1 研究方法

1.1 研究区概况

福州都市圈处于中国东南沿海、福建省东北部,面对台湾省,是一个具有山海生态的城市群,地理坐标介于东经 117°0′—120°0′,北纬 25°0′—28°0′。研究区域包括四市一区,陆域面积达 2.60×10^4 km²,约占福建省的 21.5%,2020 年常住人口约 1 300 万人,占福建省的 33.5%,地区生产总值约 1.5 万亿元,占福建省生产总值的 34.5%。

福州都市圈作为中国批复的第 2 个国家级都市圈,在海峡西岸地区经济协调发展中承担着重要的战略作用。区域人口聚集,交通发达,生态良好,与台湾省联系密切,其作为 21 世纪海上丝绸之路的核心区与国际接轨,综合发展潜力大。但都市圈中城市快速扩张区域多分布于东部沿海,生态重点保护区域多分布于西部,存在发展不均衡问题。为保证该区域可持续发展,因地制宜地分区规划对福州都市圈的经济与生态并行发展具有重要现实意义。国家依据区域的环境承载能力、现有开发密度和未来发展潜力,将区域划分成不同主体功能区,进行统筹规划,形成生态与经济协调发展的空间格局。在《全国主体功能区规划》政策文件中,根据开发方式将中国国土空间分为以下主体功能区:优化开发区域、重点开发区域、限制

开发区域和禁止开发区域。

福建省主体功能区主要以县级行政区为划分单元,福州都市圈范围(图 1)内不同主体功能区的分类情况详见表 1。由于限制开发区域分为农产品

主产区和重点生态功能区,而重点生态功能区的功能定位以提供生态服务为主,这与禁止开发区域相似,故将重点生态功能区纳入禁止开发区域范围进行模拟。

表 1 福州都市圈不同主体功能区分类情况

主体功能区	区域特征	包含范围
重点开发区域	资源环境承载能力较强、经济和人口集聚条件较好的区域	福州市:罗源县、连江县、长乐区、福清市、闽侯县;平潭综合实验区;平潭县;莆田市:城厢区、涵江区、荔城区、秀屿区、仙游县;宁德市:蕉城区、福安市、霞浦县;南平市:延平区、建阳区
优化开发区域	国土开发密度已经较高、资源环境承载能力开始减弱的区域	福州市:台江区、马尾区、仓山区、鼓楼区、晋安区
限制开发区域	资源承载能力较弱、大规模集聚经济和人口条件不够好并关系到全国或较大区域范围生态安全的区域	福州市:闽清县;宁德市:古田县;南平市:建瓯市
禁止开发区域	含有依法设立各类自然保护区域	福州市永泰县

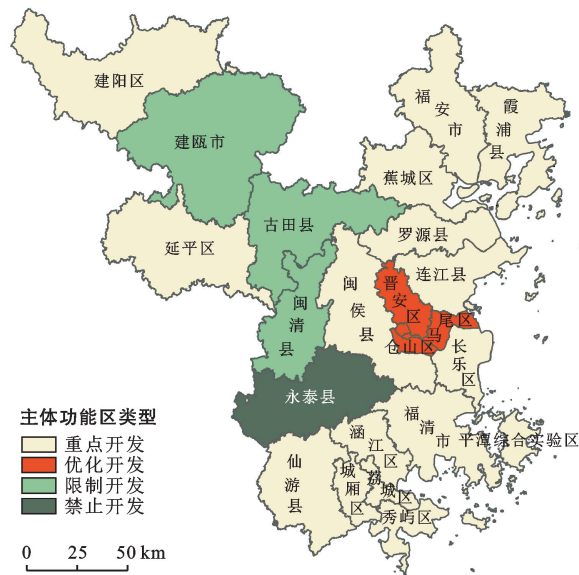


图 1 福州都市圈主体功能区分布

1.2 数据来源及预处理

数据主要包括福建省 30 m 分辨率土地利用/覆盖遥感监测数据(2000, 2010 和 2020 年),来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),土地利用/覆盖数据集已经过野外调查点随机抽样核查,总体精度达 88.95%^[21],并将区域内土地利用/覆盖遥感监测数据采用一级分类系统,根据土地资源及其利用属性,重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 类;福建省 30 m 分辨率数字高程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>);中国河流、铁路站点、高速公路、一级公路、二级公路、三级公路、主干道数据(2014 和 2020 年)来源于 Open StreetMap(www.openstreetmap.org),

经 ArcGIS 软件欧氏距离工具处理为距离栅格数据^[10],数据分辨率为 300 m;中国 1 km 分辨率月平均气温数据集(2010 和 2020 年)、中国 1 km 分辨率年降水量数据集(2010 和 2020 年)、全国 500 m 分辨率类 NPP-VIIRS 夜间灯光数据集(2010 和 2020 年)^[22]来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。将所有数据格式统一为 tif 格式,对数据进行重采样,分辨率为 30 m,均采用 krasovsky_1940_Albers 投影坐标系,然后将所有数据图层按掩膜提取至各主体功能区范围,并以 2020 年福建省土地利用/覆盖栅格数据为基准捕捉栅格,保证各主体功能区所有图层行列数一致。

1.3 研究方法

1.3.1 模拟流程及参数设置 FLUS 模型主要用于模拟大尺度范围各种土地利用/覆盖类型的未来空间分布情况,也是目前较为成熟且被广泛应用的土地利用预测模型^[10]。该模型由人工神经网络算法(artificial neural network, ANN)和元胞自动机(CA)模块两部分组成,ANN 模型可以协同整合自然环境、人类社会、经济发展等多种驱动因子的复杂影响,从而建立起不同土地利用/覆盖类型同驱动因子之间的关联,得到现状下各土地利用/覆盖类型的适宜性概率^[2]。CA 模型引进了基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,用于处理多种土地利用/覆盖类型在驱动因子下的复杂变化,从而实现较高精度的土地利用/覆盖空间分布模拟^[8]。从基于不同主体功能区的分区模拟和基于统一约束条件的整体模拟两种模拟方式出发,在关键参数设置的基础上,利用 FLUS-Markov 模型(图 2)分别对 2030 年国土空间分布格局进行模拟预测,通过单一土地利用动态度、综合土地

利用动态度和土地利用程度综合指数等指标定量分析两种方式下模拟结果,以对比两种方式模拟结果与

区域政策规划中空间结构的贴合度,以验证分区模拟的科学性。

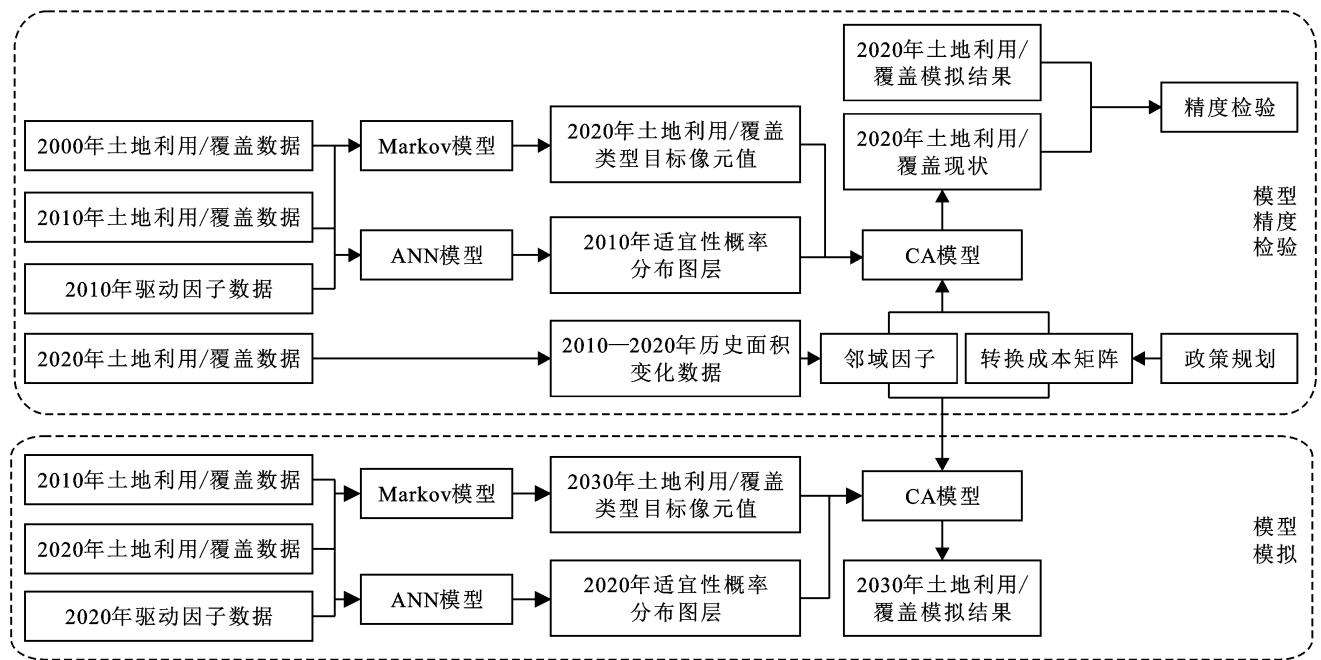


图 2 土地利用/覆盖空间分布格局模拟流程

采用 FLUS-Markov 模型对土地利用/覆盖空间分布模拟时,模型参数设置为关键环节。现土地利用/覆盖模拟研究中多采用统一参数通过整体模拟方式进行预测,缺乏考虑土地利用/覆盖类型和驱动因子在时间和空间上的差异。故针对关键参数的设置,考虑了以下因素并提出解决方案:①参考相关研究和研究区现状,考虑时空异质的驱动因子选择和分期适宜性概率分布图层计算;②结合区域内土地利用/覆盖空间分布特征,基于历史情景的土地利用/覆盖类型邻域因子权重计算;③依据政府规划文件和国土空间结构,针对政策导向的不同主体功能区内转换成本矩阵设置。

(1) 驱动因子选择。土地利用/覆盖变化是由自然环境和人类活动等多种因素共同影响的结果,除高程、降水和气温等自然因素对土地利用/覆盖变化有所影响,区域交通设施情况和经济发展状态会直接或间接影响周围土地利用/覆盖变化^[23]。综合对土地利用/覆盖变化驱动因子的分析及探究,最终选取自然(高程、坡向、坡度、气温、降水)、社会(河流、铁路、高速、一级、二级、三级、主干道)、经济(夜间灯光)等方面的 13 项驱动因子(表 2)。

(2) 适宜性概率分布计算。各土地利用/覆盖类型的适宜性概率分布图层由 ANN 模型计算得到,模型中包含输入层、隐藏层和输出层神经网络,每

一个神经元分别代表一个驱动因子,可拟合土地利用/覆盖类型分布概率与多项驱动因子的空间作用关系,用于模拟不同土地利用/覆盖类型发展概率和空间分布^[24]。

表 2 土地利用/覆盖变化驱动因子数据说明

数据类型	数据说明	年份
自然因子	福建省高程/m	2010,2020
	福建省坡向	
	福建省坡度/(°)	
	福建省月平均气温/°C	
社会因子	福建省月降水量/mm	2014,2020
	距河流距离/m	
	距铁路站点/m	
	距高速公路/m	
	距一级公路/m	
	距二级公路/m	
经济因子	距三级公路/m	2010,2020
	距主干道/m	
经济因子	夜间灯光	2010,2020

由于 10 a 间驱动因子存在时空差异性,导致 2010 年与 2020 年的驱动因子有不同作用强度和方式,所以各土地利用/覆盖类型适宜性概率分布可能存在差异。因此,为提高模型模拟精度,在 ANN 模

型中,分别以 2010 年和 2020 年土地利用/覆盖栅格数据为基础,输入两期相应驱动因子数据来计算 2010 年和 2020 年神经网络适宜性概率空间分布,分别用于 CA 模型预测 2020 年和 2030 年土地利用/覆盖结构。

(3) 邻域因子权重参数设置。邻域因子权重表示某种土地利用/覆盖类型的扩张强度,取值范围为 0~1,取值越靠近 1 表示该土地利用/覆盖类型扩张能力越强。针对邻域因子权重的设置,有学者使用各土地利用/覆盖类型历史面积变化量的绝对无量纲值来确定邻域权重参数^[10],但由于福州都市圈各土地利用/覆盖类型面积存在较大差异,本文提出一种相对无量纲值计算方式。

由于主体功能区战略是 2011 年开始实施,计划于 2020 年实现,规划任务至未来,故 2010—2020 年不同主体功能区内各土地利用/覆盖类型的面积变化量可以很好地表示分区规划政策下各土地利用/覆盖类型的扩张程度。因此利用 ArcGIS 软件统计 2010 年和 2020 年各土地利用/覆盖类型的面积,计算得到 10 a 间各土地利用/覆盖类型面积的变化量,将面积变化量的绝对无量纲值和相对无量纲值进行比较,得出更满足数据结构需求的邻域因子权重参数。

绝对无量纲值是将各土地利用/覆盖类型的面积变化量进行归一化处理,使其值处于 0~1 范围内,计算公式如下:

$$N = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: N 代表土地利用/覆盖类型历史面积变化量的绝对无量纲值; X 代表某土地利用/覆盖类型时间段内的变化量; X_{\min} 代表所有土地利用/覆盖类型面积变化量中最小值; X_{\max} 代表面积变化量中最大值。

相对无量纲值是将各土地利用/覆盖类型的面积变化量除以初始面积得到各土地利用/覆盖类型的面积变化率,再将其进行归一化处理,使其值处于 0~1 范围内,计算公式如下:

$$R = \frac{X}{X^*} \quad (2)$$

$$N^* = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}$$

式中: N^* 代表土地利用/覆盖类型历史面积变化量的相对无量纲值; R 代表某土地利用/覆盖类型时间段内面积变化率; X 代表某土地利用/覆盖类型时间段内的面积变化量; X^* 代表某土地利用/覆盖类型初始面积; R_{\min} 代表时间段内所有土地利用/覆盖类型面积变化率的最小值; R_{\max} 代表时间段内面积变化率的最大值。

2010 和 2020 年福州都市圈整体范围和各主体功能区范围各土地利用/覆盖类型面积及变化量详见表 3。2010—2020 年各区域范围主要以建设用地面积大幅增加和耕地林地草地面积减少为主要表现,各区域中面积减少占比最大都是耕地,其中重点、优化开发区域中建设用地的扩张还伴随着水域面积的减少,表明各主体功能区以发展为主要目的,经济发展期间建设用地的扩张多占用农业用地,同时伴随着林地和草地等生态用地的调整。与绝对无量纲值方法相比。根据各土地利用/覆盖类型历史面积计算得到的相对无量纲值可以避免由于各地类初始面积占比过大或过小的差异伴随着面积变化剧烈而导致绝对无量纲值极端的问题。因此采用相对无量纲值方法计算结果(表 4)作为邻域因子权重值,可以更好地表征区域内土地利用/覆盖类型的扩张强度规律。

表 3 福州都市圈 2010 和 2020 年各功能区土地利用/覆盖类型面积及变化量

km²

土地利用类型	分区模拟												整体模拟		
	重点开发区域			优化开发区域			限制开发区域			禁止开发区域			2010	2020	变化
	2010	2020	变化	2010	2020	变化	2010	2020	变化	2010	2020	变化			
耕地	4 571.84	4 403.23	-168.61	110.3	89.62	-20.68	1 408.61	1 382.64	-25.97	217.3	211.43	-5.87	6 307.45	6 087.24	-220.21
林地	12 269.77	12 180.57	-89.2	557.47	545.54	-11.94	5 305.77	5 297.9	-7.87	1 684.28	1 679.62	-4.66	19 823.13	19 707.82	-115.32
草地	3 181.53	3 164.19	-17.34	117.29	116.07	-1.22	1 156.35	1 154.8	-1.55	300.74	299.36	-1.38	4 756.84	4 735.46	-21.38
水域	958.47	799.31	-159.16	63.24	60.76	-2.48	120.96	124.23	3.26	12.71	16.39	3.68	1 155.02	1 000.76	-154.27
建设用地	709.25	1 143.04	433.79	159.1	195.42	36.31	63.57	95.69	32.12	13.8	22.03	8.23	945.53	1 456.18	510.65
未利用土地	15.11	15.63	0.52	—	—	—	10.61	10.63	0.01	0.21	0.21	0	—	25.95	26.47

(4) 转换成本矩阵设置。转换成本矩阵是指各土地利用/覆盖类型间的转变规则,0 表示各土地利用/

覆盖类型间不可以转变,1 表示可以转变。理论上各种转变都是被允许的,但是针对不同主体功能区受规

划政策影响,在经济和生态等方面发展方向不同,故在不同主体功能区中各土地利用/覆盖类型间转换成本并不相同^[13]。

表 4 各功能区土地利用/覆盖类型历史变化量相对无量纲值

区域	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
重点	0.17	0.20	0.21	0.00	1.00	0.26
分区模拟	0.00	0.40	0.43	0.36	1.00	—
优化	0.00	0.03	0.03	0.09	1.00	0.04
限制	0.00	0.04	0.04	0.51	1.00	0.04
禁止	0.15	0.19	0.19	0.00	1.00	0.23
整体模拟						

分区模拟中,针对不同主体功能区的发展现状和政策规划,设置了 4 种不同的转换成本矩阵(表 5)。重点开发区域以经济发展为主,主要分布于东部沿海区域,地势相对平坦,适合人类生活和经济发展,区域内应加快推进城镇化,除建设用地不能转换成其他用地,其他土地利用/覆盖类型间可以相互转换;优化开

发区域以高质量发展为主,地跨闽江流域,城市发展规模已经较为完善,区域内应控制开发强度,对水域保护进一步加强;限制开发区域以保障农业发展为主,集中分布于研究区的中部且地势较高,区域内包含农产品主产区,应保证耕地发展,控制建设用地的侵占能力;禁止开发区域以保护生态安全为主,森林覆被率高,2020 年该主体功能区内林地面积占比达 75.35%,包含保障全省生态安全的重要区域,在该区域内各类用地保护等级由高到低排序为:林地、耕地、水域、草地、未利用土地、建设用地。整体模拟中,将区域整体设置统一转换成本矩阵和邻域因子权重,对土地利用/覆盖结构进行模拟预测。在区域中兼顾人地和谐及绿色发展理念,按照综合发展的需求,将各地类转换等级由高到低排序为:建设、林地、耕地、水域、草地及未利用土地,高等级不能向低等级转变,以此设置转换成本矩阵^[16]。

表 5 各功能区转换成本矩阵

项目	分区模拟																								整体模拟					
	重点开发区域						优化开发区域						限制开发区域						禁止开发区域											
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
d	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
e	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a,b,c,d,e,f 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地。

(5) 未来像元参数设置。Markov 模型基于初始年份各土地利用/覆盖类型的像元数来预测未来土地利用/覆盖类型目标像元数,具有无后效型。为提高模拟精度,本文以 2000,2010 和 2020 年土地利用/覆盖数据为基础,分别预测 2020 和 2030 年土地利用/覆盖类型目标像元数。计算公式为^[13]:

$$S_{t+1} = P_{ij} \cdot S_t \quad (3)$$

式中: S_t, S_{t+1} 分别表示 t 时刻和 $t+1$ 时刻的土地利用/覆盖状态; P_{ij} 表示在 t 时刻土地利用/覆盖类型 i 转变为 j 的概率。

(6) 土地利用/覆盖模拟模型。将适宜性概率分布图层、各地类邻域因子权重、转换成本矩阵和目标像元数等参数输入 CA 模型,通过不断地循环迭代使模拟不断逼近目标值,模拟预测目标年份的土地利用/覆盖空间分布^[8,24]。

$$TP'_{p,k} = P_{p,k} \times \Omega'_{p,k} \times Inertia'_k \times (1 - sc_{c \rightarrow k})$$

$$\Omega'_{p,k} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c'_p{}^{-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k$$

$$Inertia'_k = \begin{cases} Inertia_k{}^{t-1} & (|D_k^{t-1}| \leq |D_k^{t-2}|) \\ Inertia_k{}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & (D_k^{t-1} < D_k^{t-2} < 0) \\ Inertia_k{}^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & (0 < D_k^{t-2} < D_k^{t-1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $TP'_{p,k}$ 表示 t 时刻栅格 p 的初始土地利用/覆盖类型转变为 k 的组合概率; $P_{p,k}$ 表示土地利用/覆盖类型 k 在栅格 p 上的适宜性概率; $\Omega'_{p,k}$ 表示栅格 p 上土地利用/覆盖类型 k 在 t 时刻的领域影响因子; $Inertia'_k$ 表示 t 时刻土地利用/覆盖类型 k 的惯性系数; $sc_{c \rightarrow k}$ 表示土地利用/覆盖类型 c 转变为 k 的转换成本; $\sum_{N \times N} \text{con}(c'_p{}^{-1} = k)$ 表示在 $N \times N$ 邻域大小下 $t-1$ 时土地利用/覆盖类型 k 所占据栅格总数; ω_k 为土地利用/覆盖类型 k 的邻域因子权重值; D_k^{t-1} 表示土

地利用/覆盖类型 k 在 $t-1$ 时刻,需求量与分配量之间的差异。模型中设置迭代次数为 300 次,邻域大小为 3×3 ,加速因子为 0.1,威胁为 1。

1.3.2 土地利用强度计算

(1) 单一土地利用类型动态度。单一土地利用类型动态度是衡量单一种土地利用/覆盖类型动态变化指标,体现研究区域在一定时间范围内某种土地利用/覆盖类型的数量变化情况^[25],表达式为:

$$V = \frac{A_b - A_a}{A_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: V 为研究时段内单一土地利用类型动态度; A_a 为研究初期某种土地利用/覆盖类型的面积; A_b 为研究末期某种土地利用/覆盖类型的面积; T 为研究时期时段长。

(2) 综合土地利用类型动态度。综合土地利用类型动态度是反映研究区域中时间段内综合土地利用/覆盖类型数量变化程度指标^[26],其表达式为:

$$R = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_{ij}}{2 \times \sum_{i=1}^n A_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R 表示研究区域土地利用类型综合动态度; ΔA_{ij} 为研究时段内第 i 类土地利用/覆盖类型转化为第 j 类土地利用/覆盖类型面积的绝对值; A_i 为研究时段初期第 i 类土地利用/覆盖类型的面积。

(3) 土地利用程度综合指数。反映了人类对土地资源开发利用的广度和深度。根据庄大方^[27]所提出的综合分析法,可以计算土地利用程度,掌握区域土地开发利用的综合水平。其计算公式为:

$$L_a = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \cdot C_i) \quad (7)$$

式中: L_a 为土地利用程度综合指数; n 为土地利用程度分级数; A_i 指第 i 级土地利用程度分级指数,参照前人研究得到土地利用程度分级赋值^[26],耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地的分级指数分别为 3, 2, 2, 2, 4, 1; C_i 是第 i 级土地利用程度面积比例。

2 结果与分析

2.1 土地利用/覆盖适宜性概率空间分布

利用 ANN 模型生成 2010 和 2020 年福州都市圈各土地利用/覆盖类型的适宜性概率分布图层(图 3—4),从而获得各地类的空间分布格局,适宜性高的区域多分布于该土地利用/覆盖类型空间周围,耕地的适宜性区域主要分布在地势平缓和沿海人口聚集区

域;林地和草地的适宜性区域大面积重合,连片分布于非沿海区域;水域主要分布在闽江流域以及现有水系和沿海的周边区域;建设用地的高适宜性区域主要以福州和沿海城市群为中心,向周围逐步递减,海岸线城市呈现出联合发展的可能。

2.2 模拟精度检验

为检验 FLUS-Markov 模型分区模拟精度,对 2020 年各主体功能区土地利用/覆盖空间分布进行模拟,将模拟结果与实际情况进行对比(图 5),并用 kappa 系数进行检验。重点、优化、限制和禁止开发区域在 20% 随机采样时的 kappa 系数分别为 0.94, 0.91, 0.85, 0.98, 均大于 0.75, 总体精度分别为 96.27%, 94.04%, 92.45% 和 99.30%, 均大于 90%, 表明在以上参数设置的基础上该模型具有较高的可信度, FLUS-Markov 模型能反映区域土地利用/覆盖空间变化规律,可以对 2030 年主体功能区土地利用/覆盖空间分布进行模拟。

2.3 分区模拟与整体模拟土地利用/覆盖结构对比

将分区模拟和整体模拟两种模拟方式下模拟得到 2030 年土地利用/覆盖空间分布结果裁剪至不同主体功能区范围,从土地利用动态度和土地利用程度等指标来量化对比(表 6),探究两种方式模拟所得土地利用/覆盖空间结构与都市圈各功能区发展目标贴合度。对比单一土地利用动态度指数发现,整体模拟结果中限制开发区域耕地的扩张趋势符合区域规划要求,动态度为 0.14%, 但所有区域林地都在缩减,重点和优化开发区域的建设用地发展强度不够,比分区模拟结果低 0.31% 和 0.02%, 限制和禁止区域的建设用地分别有 0.71% 和 0.78% 的扩张。而分区模拟结果中随着区域生态保护力度逐渐加大,水域的单一动态度有递增的梯度变化,随着区域经济发展力度的减弱,建设用地的单一动态度逐渐减小,这与区域发展目标更贴合。对比综合土地利用动态度和土地利用程度指数发现,整体模拟的重点和优化开发区域土地利用/覆盖变化相对更平缓,土地利用程度相对较低,低效闲置土地相对更多,而限制和禁止开发区域土地利用动态度高,土地利用程度相对更高,更容易导致生态脆弱。综上所述,与整体模拟相比,分区模拟的未来土地利用/覆盖模拟结果与主体功能区未来发展目标更贴合,可以根据福州都市圈各主体功能区的发展目标提供土地利用/覆盖发展方向的科学预测。

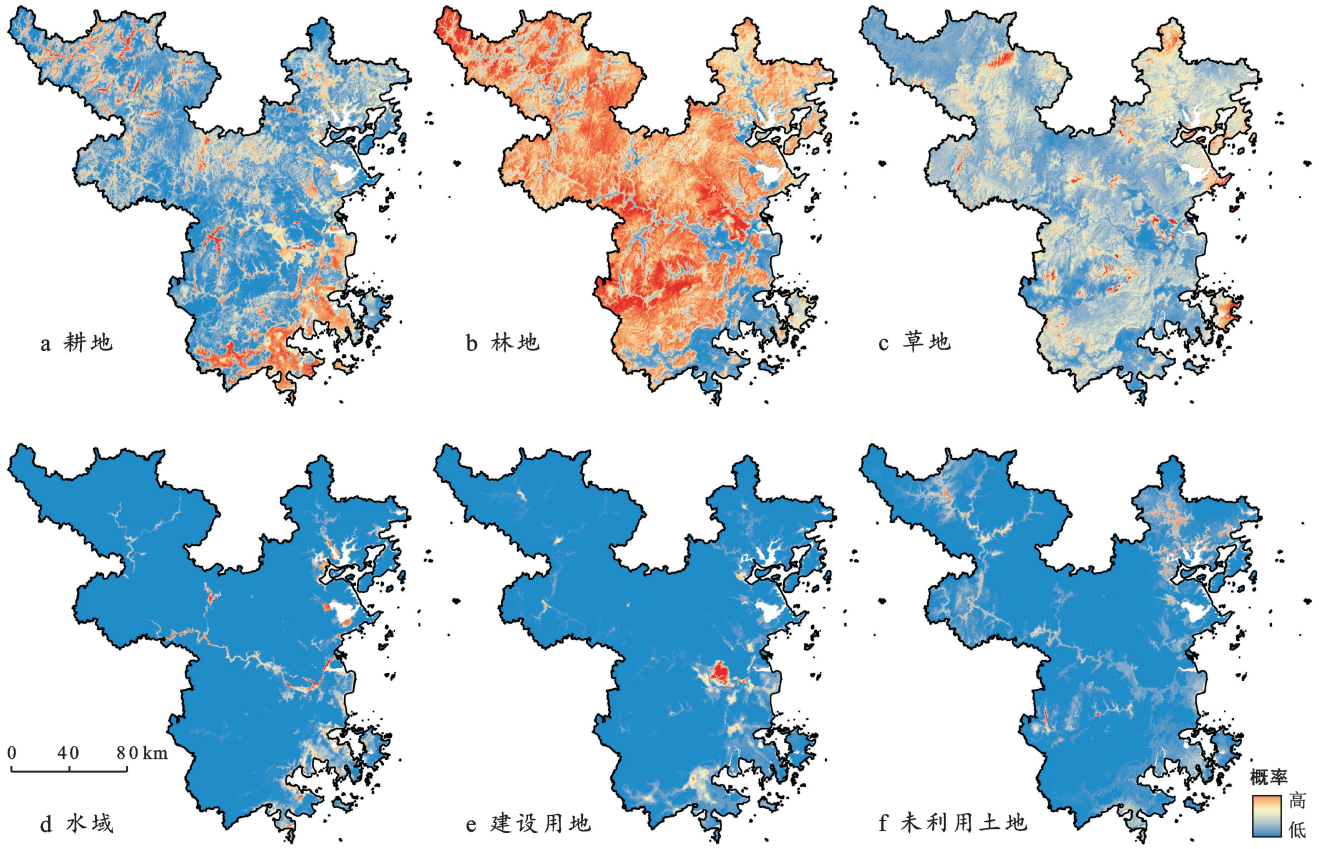


图 3 福州都市圈 2010 年各土地利用/覆盖类型适宜性概率分布

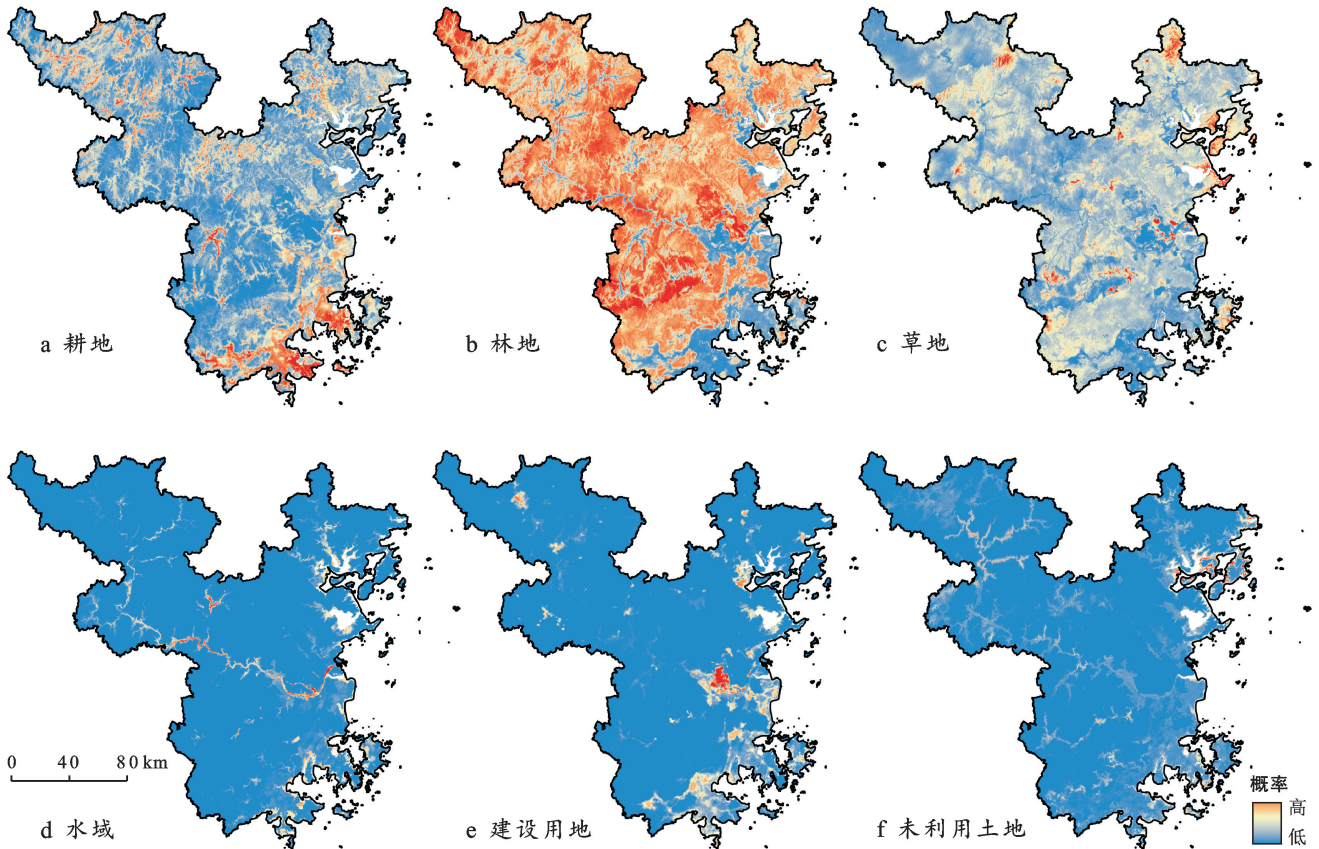


图 4 福州都市圈 2020 年各土地利用/覆盖类型适宜性概率分布

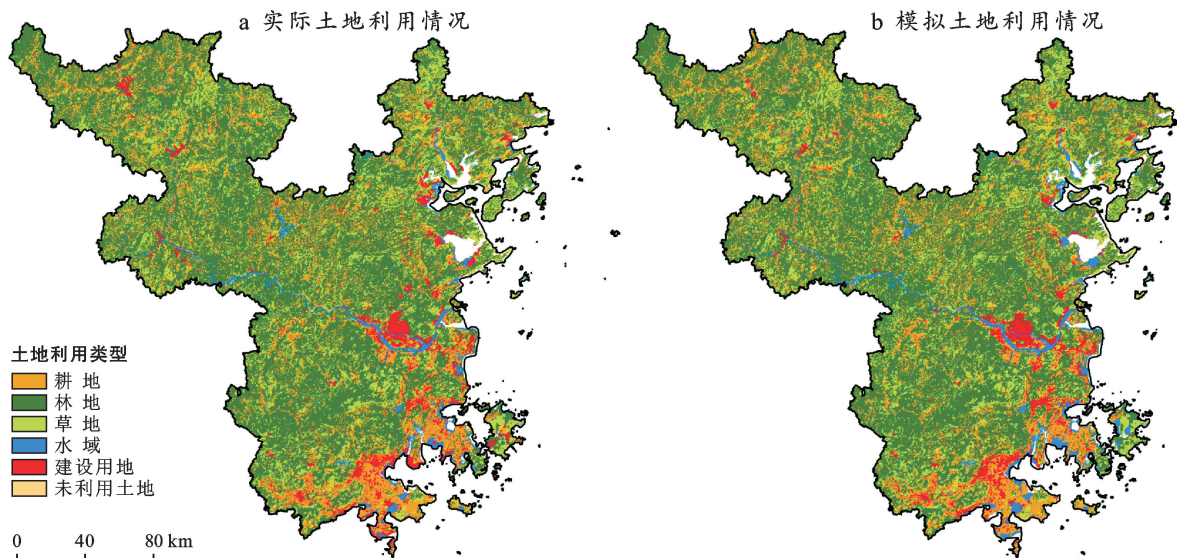


图 5 福州都市圈 2020 年土地利用/覆盖现状及模拟结果

表 6 福州都市圈 2020—2030 年分区模拟和整体模拟各功能区土地利用动态度对比

分区	模拟	单一土地利用动态度/%						综合土地利用动态度/%	土地利用程度综合指数
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地		
重点	分区模拟	-0.35	-0.05	-0.05	-1.11	2.80	0.28	0.11	232.99
	整体模拟	-0.47	-0.05	-0.04	-0.01	2.49	0.37	0.09	232.41
优化	分区模拟	-1.86	0.05	-0.10	-0.39	0.91	—	0.10	249.56
	整体模拟	-1.81	-0.03	-0.01	0.04	0.89	—	0.09	249.55
限制	分区模拟	-0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	219.36
	整体模拟	0.14	-0.03	-0.07	0.00	0.71	-0.10	0.03	219.80
禁止	分区模拟	-0.02	0.01	-0.05	0.68	-0.19	0.00	0.01	211.40
	整体模拟	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.78	-0.17	0.01	211.63

2.4 2030 年土地利用/覆盖分区模拟结果与分析

绘制福州都市圈各主体功能区 2030 年土地利用/覆盖分区模拟结果(如图 6 所示),并统计 2020—2030 年各主体功能区内土地利用/覆盖类型面积及比例变化量(表 8)。重点开发区域中,建设用地作为面积变化量最大的土地利用/覆盖类型,增加了 320.24 km²,比例增长 1.48%。其中 233.69 km² 主要来源于耕地,67.20 km² 来源于水域。利用桑基图对区域土地利用/覆盖转移方向进行可视化处理(图 7)。同时,计算各县区内建设用地单一动态度表示建设用地扩张强度(表 7),发现 2030 年用地空间增长多分布于沿海城市^[27],以莆田市、福州市(长乐区、闽侯县、福清市)和平潭综合实验区等城市为中心向外扩张的形势(图 8),建设用地联合发展态势进一步加强;该区域内耕地面积减少幅度最大(达 153.23 km²),比例减少 0.71%,有 78.48 km² 林地和 20.59 km² 水域转入,但仍小于耕地转出面积;而林地和水域面积

减少 62.63 和 88.79 km²,大部分转入到了耕地和建设用地。从空间变化来看,沿海区域与山区发展不平衡问题较为突出,随着沿海城市建设速度的加快,城市扩张和工业发展会占用大量的耕地等生产用地,并割裂生态用地,该模拟结果符合区域对土地利用/覆盖发展方向的基本判断。

表 7 福州都市圈各县区建设用地扩张强度

地区	扩张强度/%	地区	扩张强度/%	地区	扩张强度/%
荔城区	5.43	连江县	1.96	晋安区	0.24
闽侯县	4.12	仓山区	1.95	鼓楼区	0.17
长乐区	3.81	福安市	1.88	台江区	0.02
秀屿区	3.33	建阳区	1.80	建瓯市	0.01
城厢区	3.02	延平区	1.61	古田县	0.00
福清市	3.00	霞浦县	1.59	闽清县	-0.01
涵江区	2.78	罗源县	1.53	永泰县	-0.19
蕉城区	2.37	平潭综合实验区	1.32		
仙游县	2.35	马尾区	1.00		

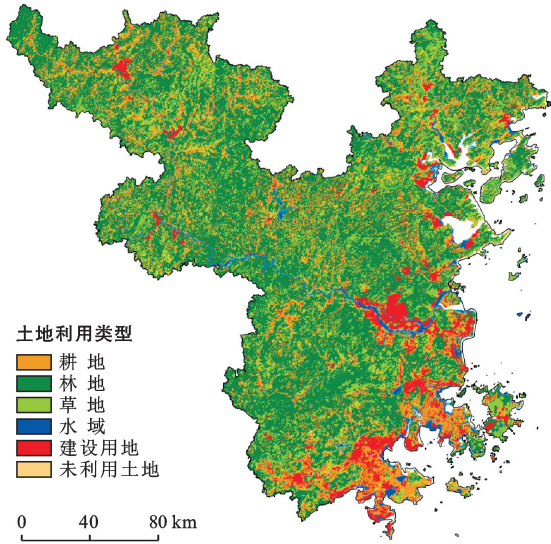


图 6 福州都市圈 2030 年土地利用/覆盖模拟结果

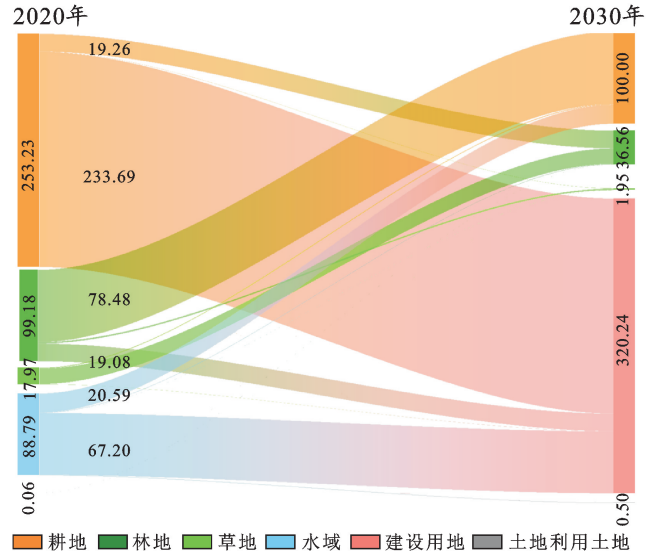


图 7 福州都市圈重点开发区域 2020—2030 年土地利用/覆盖转移情况 (km²)

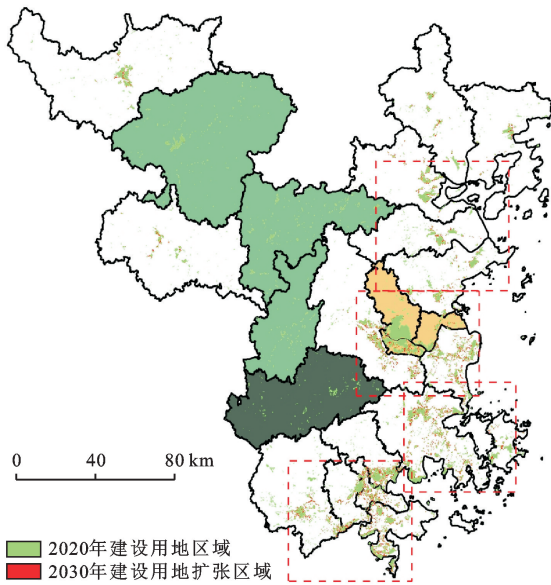


图 8 福州都市圈 2020—2030 年建设用地扩张空间分布

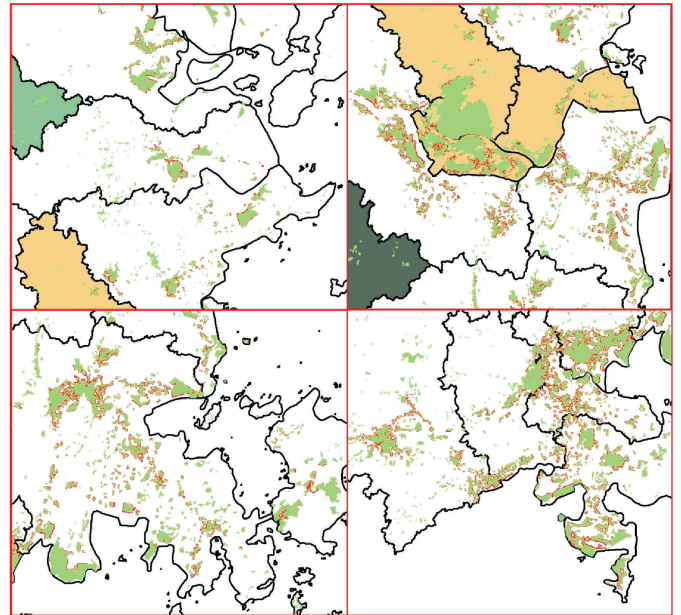


表 8 福州都市圈 2020—2030 年各主体功能区土地利用/覆盖类型面积及比例变化量

土地利用/覆盖类型	重点开发区域				优化开发区域				限制开发区域				禁止开发区域			
	2030 年		变化量		2030 年		变化量		2030 年		变化量		2030 年		变化量	
	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %
耕地	4 249.99	19.58	-153.23	-0.71	72.91	7.24	-16.71	-1.66	1 381.14	17.12	-1.49	-0.02	211.06	9.47	-0.37	-0.02
林地	12 117.95	55.83	-62.63	-0.29	548.1	54.41	2.56	0.25	5 300.88	65.72	2.98	0.04	1 680.66	75.4	1.04	0.05
草地	3 148.17	14.5	-16.02	-0.07	114.86	11.4	-1.21	-0.12	1 153.32	14.3	-1.48	-0.02	297.98	13.37	-1.37	-0.06
水域	710.52	3.27	-88.79	-0.41	58.37	5.79	-2.39	-0.24	124.21	1.54	-0.02	0	17.51	0.79	1.12	0.05
建设用地	1 463.27	6.74	320.24	1.48	213.16	21.16	17.75	1.76	95.68	1.19	0	0	21.62	0.97	-0.41	-0.02
未利用土地	16.07	0.07	0.44	0	—	—	—	—	10.64	0.13	0.01	0	0.21	0.01	0	0

优化开发区域中建设用地扩张面积最大,达 17.75 km²,所占比例增长 1.76%,多集中于福州市仓

山区周围;耕地约有 16.71 km² 减少,所占比例减少 1.66%,其中 15.60 km² 转入建设用地;林地有耕地和

草地的转入,面积增加 2.56 km²;而草地和水域有不大于 3 km² 的小幅减少。限制开发区域中各地类面积变化都小于 3 km²,且变化分布范围较为零散。建设用地的的发展速度有所控制,耕地和草地仍有小面积的减少,且多转向林地,林地增长 2.98 km²。禁止开发区域中各地类面积变化幅度较小,均小于 1.5 km²。其中建设用地向草地、水域等其他地类转化,面积有小幅缩减;林地和水域有草地的转入,各自有 1 km² 左右的面积增加,资源承载能力增强。

3 讨论与结论

3.1 讨论

FLUS-Markov 模型中参数设置是提高模型模拟精度的关键。本文考虑区域发展差异性,提出一种基于不同主体功能区的分区模拟预测方案,从而实现研究区未来国土空间格局模拟,增加了模型对大尺度区域模拟的适用性,但在模拟过程中仍然存在一些不足。

(1) 在邻域因子权重的确定方面,有学者采用经验赋值法或基于历史面积变化量确定模型参数等方法^[10]。本文考虑研究区域各地类初始面积差异性的影响,提出一种客观判断的参数设置方法,将各土地利用/覆盖类型历史面积变化量的相对无量纲值表示地类的扩张强度,并运用于 FLUS-Markov 模型中模拟 2020 年土地利用/覆盖空间分布,模拟精度 kappa 系数均在 0.85 以上,说明该方法适用于该研究区域未来土地利用/覆盖模拟,但是否具有普适性仍需要更多区域的实践证明。

(2) 在驱动因子的设置方面,土地利用/覆盖变化受自然环境、人类社会、政策规划、地域文化等多种驱动因子的复杂影响。但由于部分数据难以量化获取,导致驱动因子的设置并不全面。因此,在未来研究中应全面、综合考虑驱动因子复杂性和代表性,可以更精准地预测土地利用/覆盖空间分布格局。

(3) 在限制区域的设置方面,区域内包含大面积耕地保护区和自然保护区等关系到区域粮食安全、生态安全等区域。若以永久基本农田和各级自然保护区为刚性底线融入国土空间模拟预测中,可以得到更切合的模拟结果。

3.2 结论

(1) 在研究区域内基于历史情景的各土地利用/覆盖类型历史面积变化量的相对无量纲值能很好代表各地类的扩张强度,可以作为邻域因子权重参数设置。因此,将该参数结合考虑空间异质性特征的适宜性概率分布计算和转换成本矩阵等参数的设置,经精度检验,各主体功能区模拟结果总体精度均在 90%以

上。这表明在这种参数组合下,FLUS-Markov 模型适用于对未来土地利用/覆盖进行模拟。

(2) 利用土地利用动态度和土地利用程度等指标对分区和整体模拟结果进行量化对比,发现分区模拟结果与主体功能区划的发展目标更加吻合。分区模拟结果表示,2030 年各主体功能区均有耕地、草地的减少;重点、优化发展区域面积变化量最大的为建设用地,分别增加了 320.24 和 17.75 km²,多分布于沿海城市,且大部分来源于耕地转入;限制、禁止开发区域各土地利用/覆盖类型面积变化幅度不大,均小于 3 km²。

(3) 福州都市圈内分区模拟结果基本符合主体功能区划土地利用/覆盖未来发展方向,模拟结果可为研究区未来国土空间规划及生态空间管控提供决策参考。

[参 考 文 献]

- [1] 吴桐,岳文泽,夏皓轩,等.国土空间规划视域下主体功能区战略优化[J].经济地理,2022,42(2):11-17.
- [2] 罗紫元,曾坚.资源环境保护下天津市用地空间增长模拟[J].地理研究,2022,41(2):341-357.
- [3] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947-3958.
- [4] Peng Kaifeng, Jiang Weiguo, Deng Yue, et al. Simulating wetland changes under different scenarios based on integrating the random forest and CLUE-S models: A case study of Wuhan urban agglomeration [J]. Ecological Indicators, 2020,117: 106671.
- [5] Yang Xin, Zheng Xinqi, Chen Rui. A land use change model: Integrating landscape pattern indexes and Markov-CA [J]. Ecological Modelling, 2014,283: 1-7.
- [6] Jawarneh R N. Modeling past, present, and future urban growth impacts on primary agricultural land in Greater Irbid Municipality, Jordan using SLEUTH (1972—2050) [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(4): 212-222.
- [7] 刘小平,黎夏,艾彬,等.基于多智能体的土地利用模拟与规划模型[J].地理学报,2006,61(10):1101-1112.
- [8] 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, 2017,168:94-116.
- [9] 林媚珍,刘汉仪,周汝波,等.多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J].地理研究,2021,40(9):2657-2669.
- [10] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.

- 风险区和风险路径识别[J].地理学报,2018,73(9):157-169.
- [26] 熊星,唐晓岚,叶海跃,等.基于“源汇”格局的传统乡村景观保护与管控策略[J].地域研究与开发,2019,38(6):120-125.
- [27] Huang Ning, Lin Tao, Guan Junjie, et al. Identification and regulation of critical source areas of non-point source pollution in medium and small watersheds based on source-sink theory [J]. *Land*, 2021,10(7):668-668.
- [28] Li Feng, Ye Yaping, Song Bowen, et al. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: A case study from Changzhou, China [J]. *Ecological Modelling*, 2015,318(1):194-203.
- [29] 汉瑞英,赵志平,肖能文,等.基于“源—汇”理论和生态阻力面(U-EER)模型的新疆和田地区沙源扩散路径[J].地球科学与环境学报,2020,42(5):701-710.
- [30] Wang Jinliang, Ni Jiupai, Chen Chenglong, et al. Source-sink landscape spatial characteristics and effect on non-point source pollution in a small catchment of the Three Gorge Reservoir Region [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018,15(2):327-339.
- [31] Razavi Termeh Seyed Vahid, Sadeghi Niaraki Abolghasem, Choi Soo Mi. Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models [J]. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 821-844.
- [32] 杨子生.云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J].山地学报,2002,20(S1):1-9.
- [33] Jiang Luguang, Liu Ye, Wu Si, et al. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data [J]. *Ecological Indicators*, 2021,129:107933.
- [34] Song Ge, Zhang Hongmei. Cultivated land use layout adjustment based on crop planting suitability: A case study of typical counties in Northeast China [J]. *Land*, 2021,10(2):107-125.
- [35] 王琦,魏来,韩煜,等.查干湖汇水区面源污染风险识别及管控[J].环境科学研究,2020,33(9):2074-2083.
- [36] 徐建锋,贾海燕,辛小康.基于最小累积阻力模型的丹江口水源地面源污染风险识别[C]//中国水利学会2020学术年会论文集(第一分册),2020:335-340. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.069744.
- [37] 孔佩儒,陈利顶,孙然好,等.海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化[J].生态学报,2018,38(12):4445-4453.

(上接第165页)

- [11] 侯建坤,陈建军,张凯琪,等.基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J].环境科学,2022,43(11):5253-5263.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张凯琪,陈建军,侯建坤,等.耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J].中国环境科学,2022,42(06):2799-2809.
- [15] 林彤,冯兆华,吴大放,等.基于 FLUS 模型的喀斯特地区生态用地时空变化及多情景预测:以湖南省宁远县为例[J].水土保持通报,2022,42(2):219-227.
- [16] 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.
- [17] 赵瑞,刘学敏.京津冀都市圈“三生”空间时空格局演变及其驱动力研究[J].生态经济,2021,37(4):201-208.
- [18] 黎夏,李丹,刘小平.地理模拟优化系统(GeoSOS)及其在地理国情分析中的应用[J].测绘学报,2017,46(10):1598-1608.
- [19] 方创琳.新发展格局下的中国城市群与都市圈建设[J].经济地理,2021,41(4):1-7.
- [20] 刘希宇,高浩歌,扈茗.培育型都市圈发展规划编制方法探索:以福州都市圈为例[J].规划师,2020,36(4):13-20.
- [21] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[M].北京:中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统,2018.
- [22] Chen Zuoqi, Yu Bailang, Yang Chengshu, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-Like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(3):889-906.
- [23] 王旭东,姚尧,任书良,等.耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法[J].地球信息科学学报,2022,24(1):100-113.
- [24] Liang Xun, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018,177:47-63.
- [25] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):83-89.
- [26] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
- [27] Aneesa S B, Shashi M, Deva P. Future land use land cover scenario simulation using open source GIS for the city of Warangal, Telangana, India [J]. *Applied geomatics*, 2020,12(3):281-290.