

DOI: 10.5846/stxb202112173585

李代超, 卢嘉奇, 谢晓苇, 虞虎, 李元, 吴升. 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. 生态学报, 2022, 42(24): 10111-10126.

Li D C, Lu J Q, Xie X W, Yu H, Li Y, Wu S. 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. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10111-10126.

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

李代超^{1,3}, 卢嘉奇^{1,3}, 谢晓苇^{1,3}, 虞 虎^{2,*}, 李 元⁴, 吴 升^{1,3}

1 福州大学, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 福州大学, 数字中国研究院(福建), 福州 350002

4 福建省城乡规划设计研究院, 福州 350028

摘要:在推进新时代生态文明建设、确保区域社会经济绿色发展并如期实现碳达峰碳中和目标的发展导向下,基于主体功能区分类约束开展以低碳发展为牵引的多情景国土空间优化模拟研究具有重要意义。以国家生态文明试验区福建省为研究区,设定自然发展和低碳发展两种不同情景,针对不同类别主体功能区,设置差异化的碳排放量、经济效益和生态效益约束目标,在对用地需求进行预测的基础上,基于 PLUS 模型开展多情景下的国土空间分区优化模拟。结果表明:(1)从用地规模和数量结构来看,低碳发展情景下的功能区用地结构更加符合低碳经济发展的要求,该情景在减缓碳源地增加速度的同时,能够降低碳汇地的减少速度,在保障区域经济发展用地需求的同时减少碳排放并降低生态环境影响;(2)从用地布局来看,虽然不同情景下的用地结构存在一定差异,但从空间分布特征来看,各地类的变化规律基本与历史趋势基本相同,其中碳源地主要分布在临近海岸线处海拔较低、地势平缓易开发的一侧,碳汇地主要集中在内陆区域海拔相对较高且地况较复杂的区域;(3)从三类典型区域空间演变模式来看,农业生产区和生态保护区的变化较小,城镇建设区变化较为明显,城镇建设区和农业生产区主要功能用地分布较为集中且聚合度较高,生态保护区主要功能用地较为分散且一般呈破碎状。在不同发展情景下,国土空间格局中的碳源地不断扩张,碳汇地空间逐步受到挤压,应进一步发掘存量用地的潜力,推动土地资源的高效利用。

关键词:低碳发展;主体功能区;MOP 模型;PLUS 模型;多情景优化模拟

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

LI Daichao^{1,3}, LU Jiaqi^{1,3}, XIE Xiaowei^{1,3}, YU Hu^{2,*}, LI Yuan⁴, WU Sheng^{1,3}

1 Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

2 Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

4 Fujian Urban and Rural Planning Design Institute, Fuzhou 350028, China

Abstract: Under the context of promoting the ecological civilization construction in the new era, ensuring the green

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23100502);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0401)

收稿日期:2021-12-17; **网络出版日期:**2022-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuhu@igsrr.ac.cn

socioeconomic development of regions, and achieving the goal of “carbon peaking and carbon neutrality” as scheduled, it is of great significance to carry out multi-scenario territorial spatial optimization simulation research could be supported by low-carbon development based on the classification and restrict of main functional areas. Two different development scenarios for the natural development and low-carbon development were set by taking Fujian Province, the national pilot zone for ecological conservation, as the research area. Differentiated carbon emissions, economic benefits and ecological benefit constraint and targets were set for various types of main functional areas. Based on the prediction of land use demand, the multi-scenario territorial spatial division optimization simulation was carried out by taking advantage of PLUS model. The results show that: (1) From the perspective of land use scale and quantity structure, the land use structure of functional areas under low-carbon development could better cater the requirements of low-carbon economic development. The low-carbon development scenario can reduce the reduction rate of carbon sink while lowering the growth rate of carbon sources, and lower carbon emissions and the impact on the ecological environment besides meeting the land demand for regional economic development; (2) In terms of land use layout, certain differences do exist in land use structure under different scenarios. However, from the view of spatial distribution characteristics, the changing laws of various lands are basically the same as the previous trends. The carbon source is mainly distributed on the side near the coastline with low altitudes and gentle terrain, which is easy to be developed, and the carbon sink is mainly concentrated in the inland areas with relatively high altitudes and complex terrain; (3) From the perspective of three types of typical regional spatial evolution patterns, the changes in agricultural production areas and ecological protection areas are few, in comparison to the significant changes of urban construction areas. The main functional lands in urban construction areas and agricultural production areas are more concentrated, with a high degree of aggregation. The main functional lands in the ecological reserve scatter and are under fragmented status. Under different development scenarios, the carbon source in the spatial pattern expands continuously while carbon sink space decreases subtly. It is necessary to further explore the potential of stock land, with a view to promoting the efficiency of land resource use.

Key Words: low-carbon development; main functional areas; MOP model; PLUS model; multi-scenario optimization simulation

国土空间是自然资源和社会经济活动的基本载体^[1],国土空间规划是我国推动生态文明建设、引导区域低碳绿色发展的重要举措^[2]。在国土空间治理和保护体系中,主体功能区最直接全面地贯彻了人与自然和谐的生态文明思想^[3-4],被国家生态文明总体方案确定为基础性制度^[5]。随着国土空间规划工作的有序推进,用地结构改变致使国土空间的地域功能不断扩张,主体特性愈发凸显^[6]。为确保生态文明建设与社会经济可持续发展相协调,《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确提出“立足资源环境承载能力,发挥各地区比较优势,推动形成主体功能明显、优势互补、高质量发展的国土空间开发保护新格局”。因此,基于不同类型主体功能区开展符合区域管控要求和发展目标的国土空间结构优化和模拟研究,对国土空间规划进行先验评估和未来趋势预判,可为形成区域性、差异化的土地利用管控政策提供决策依据,推动实现“主体功能约束有效、国土开发有序”的空间发展新格局^[7]。

国土空间优化模拟是近年来的研究热点,现有研究多分析土地资源优化配置^[8-10],核心内容是土地利用结构优化和未来空间布局模拟,即按照一定的发展目标对不同区域的用地数量进行预测并进行结构调整,在该预测数量约束下,根据空间单元现状适宜度对未来布局进行优化模拟^[11]。研究目标上,现有研究多偏重于以土地利用的经济效益和生态效益最大化为目标^[12-14],而随着气候变化和生态文明建设的持续推进,土地资源低碳利用成为区域可持续发展的重要导向,而目前以低碳发展为导向的土地利用优化研究多偏重于对用地结构进行调整^[15-17],或是测度分析碳排放和碳补偿等^[18-19],对用地空间布局模拟优化的研究较少。在研究尺度和对象上,现有研究从省域^[20-21]、流域^[22-23]、市域^[24-25]、县域^[26-27]等不同行政层级和自然单元将研究

区作为整体开展国土空间全域分情景模拟,未考虑不同功能导向的空间载体对国土空间变化的引导和约束作用。主体功能区作为国土空间规划编制的宏观战略背景,承载国家战略意志^[28],是按照不同的开发方式对国土空间开发格局进行优化并实施分类管理的空间治理工具^[29],可有效指导不同区域未来的国土空间发展方向,在“碳达峰、碳中和”背景下,通过碳排放定量计算方法、多情景模拟等技术手段建立应对逻辑路径,并以此提出空间规划视角下不同主体功能区的差异化控碳思路,可在区域层面推动落实双碳目标^[30-31]。在研究方法上,CA-Markov^[32]、CLUE-S^[33-34]、SLEUTH^[35]、FLUS^[36-38]等各类土地利用变化模型广泛应用在国内外不同区域和尺度的国土空间变化模拟相关研究中,其中有学者最近研究的 PLUS(Patch-generating Land Use Simulation)模型是一种集成了土地扩张分析策略和基于多类型随机斑块种子生成机制的 CA 模型,与其他模型相比,拥有更高的模拟精度以及与真实景观更相似的景观模式^[39]。因此,面向不同主体功能区结合以低碳发展为导向的用地结构优化和国土空间布局模拟来开展土地资源优化配置,可为推动碳减排的预期目标提供新的理论依据^[40]。

本文以全国首个国家生态文明试验区福建省为研究区,系统分析其土地利用变化时空格局,通过设定自然和低碳两种发展情景,耦合“自顶向下”的多目标规划模型(Multi Objective Programming, MOP)和“自底向上”的 PLUS 模型,对 2030 年不同情景下国土空间布局进行优化模拟,研究结果将为福建省生态文明试验区建设、区域低碳经济转型发展以及实现以主体功能为导向的国土空间管控政策提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

福建省多年来持之以恒推进生态文明建设,以实现绿色循环低碳发展为途径,着力构建节约资源和保护环境的空间格局,全省森林覆盖率常年居全国首位,是我国东南地区重要的碳汇空间。但随着城镇化进程的快速推进,对土地资源的大量需求加剧了区域土地利用变化的过程,部分林草地、湿地和水体被侵占,生态空间受到一定程度挤压,在影响生态环境的同时,也降低了碳汇效应(图 1)。2021 年 9 月 14 日研究出台《福建省加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系实施方案》,把碳达峰、碳中和纳入经济社会发展和生态文明建设总体布局,提出在国土空间规划中落实绿色低碳要求,积极推动 2030 年前碳达峰行动。福建省作为我南方地区重要的生态屏障,国土空间碳汇潜力巨大,为探索空间规划视角下低碳经济发展和生态文明建设新模式,保障区域绿色健康发展提供支撑。

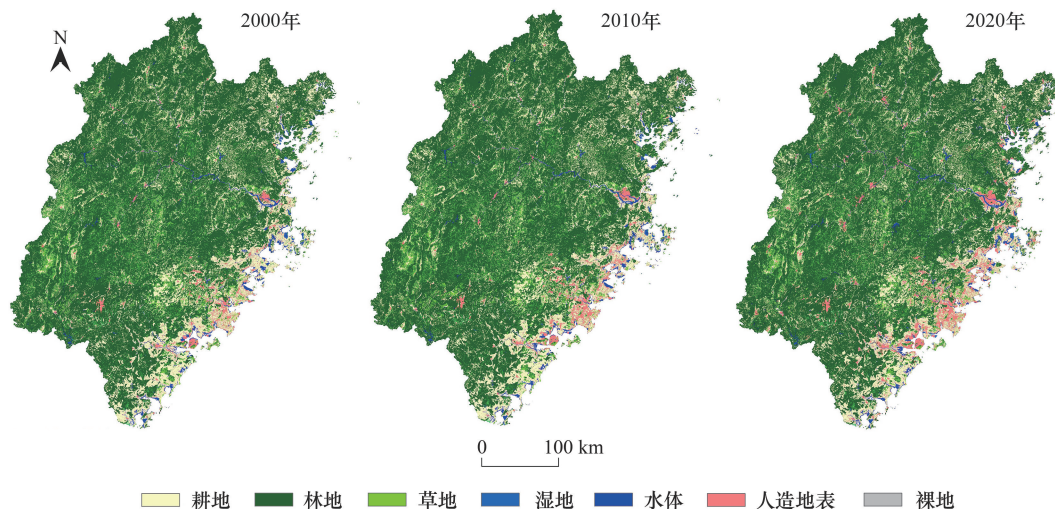


图 1 福建省 2000—2020 年国土空间格局分布图

Fig.1 The map of territorial spatial pattern in Fujian Province from 2000 to 2020

1.2 数据来源

本文涉及的数据包括空间分布数据和统计数据,数据来源说明见表 1。空间分布数据主要用来进行空间布局模拟,包括土地利用、自然环境、社会经济、基础地理等,经过投影变换、裁剪、重采样、归一化等处理,统一了空间范围和量纲,空间分辨率为 100m×100m。为对福建省 2030 年不同区域的用地需求进行预测并开展国土空间布局模拟,主要数据获取的时间节点统一为 2000—2020 年,但受数据可获得性的制约和限制,部分数据未更新到 2020 年,因此在保证数据质量和完整性的前提下,部分指标以最近年份的数据进行替换,经过验证后该部分数据对模拟结果无较大影响,所用数据在本研究区应用具有可行性。

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据类型 Data type	名称 Name	年份 Year	数据来源 Data source
空间分布数据 Spatial distribution data	土地利用	土地利用数据	2000、 2010、2020
			GlobeLand30 网站 (http://www.globallandcover.com/)
	自然环境	DEM	—
			地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
		降雨、温度、潜在蒸散发量	2010—2020
			国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)
	社会经济	人口分布情况	2010—2020
统计数据 Statistics data		夜间灯光亮度	2010—2018
			全球人口网站 (https://www.worldpop.org/)
	基础地理	行政边界、交通、水系	2015
			全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn/main.do?method=index)
		城市公园、森林公园、自然保护区等	2020
			开放 API
	经济	GDP、产业结构	2000—2020
	农业	粮食作物播种面积及产量	2000—2020
		粮食作物价格	2000—2020
			《全国农产品成本收益资料汇编》
	能源	化石能源消耗量	2000—2020
			《福建统计年鉴》
	环境	CO ₂ 排放量	2000—2017
			Chen 等 ^[42]

DEM:数字高程模型 Digital elevation model;GDP:国内生产总值 Gross domestic product; API:应用程序接口 Application programming interface

2 研究方法

2.1 研究思路

首先依据不同区域主体功能发展定位分类将福建省各市、县(区)划分为农业生产、城镇建设、生态保护三类国土空间功能分区,并根据主体功能区与新一轮国土空间规划区中三生空间的衔接关系,从耕地保护、经济建设和生态安全不同发展导向分别对其目标函数及约束条件进行设定及修正;然后,设定不同发展情景分别通过 Markov 模型和 MOP 模型对各分区 2030 年用地结构进行预测,针对其碳源碳汇地结构、碳排放总量、经济效益、生态效益等目标进行分析;再将不同发展情景下各分区用地结构作为数量约束,基于 PLUS 模型得到福建省 2030 年不同发展情景下的国土空间分布模拟结果;最后,针对不同情景下碳源碳汇地空间布局和典型区域变化细节等方面对结果进行定量与定性分析,从而对未来国土空间发展趋势进行预判,据此优化空间管制并提出相关政策建议。技术路线见图 2。

2.2 研究方法

2.2.1 用地需求预测

采用 Markov 模型和 MOP 模型分别对不同情景下各类功能区用地需求进行预测。其中 MOP 模型即多目标规划模型,包含决策变量、目标函数、约束条件三部分^[26]。

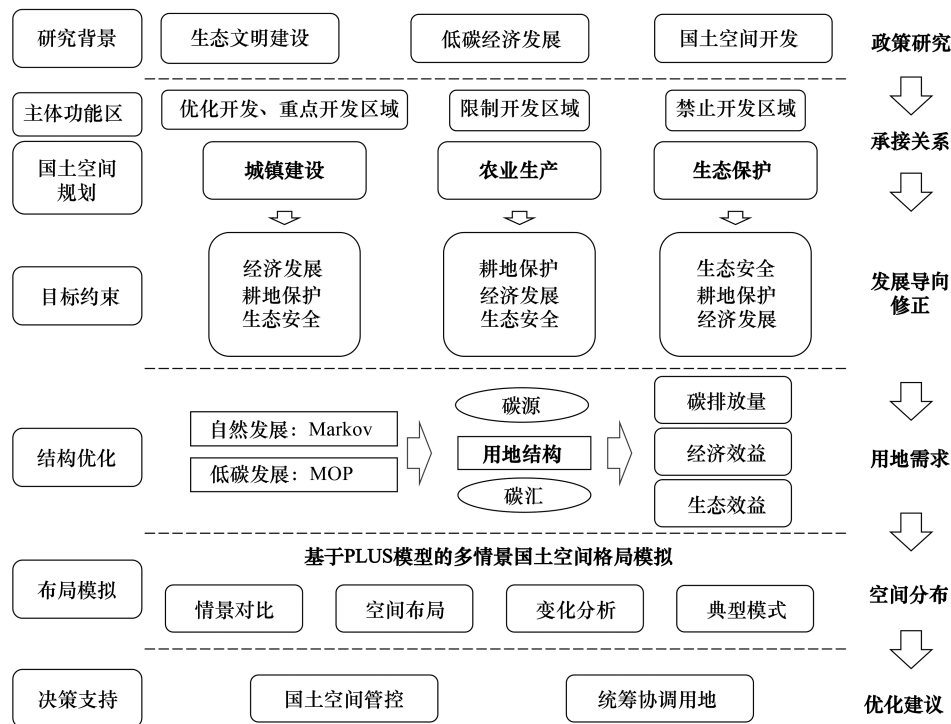


图2 技术路线

Fig.2 Technical route

MOP: 多目标规划模型 Multi objective programming

$$F_1(x) = \max \sum_{j=1}^n c_j x_j; \quad F_2(x) = \min \sum_{j=1}^n d_j x_j; \quad F_3(x) = \max \sum_{j=1}^n e_j x_j \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = (\geq, \leq) b_j, & (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_j \geq 0, & (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_j 为第 j 类决策变量 ($j = 1, 2, \dots, 7$), 其中: 耕地 x_1 、林地 x_2 、草地 x_3 、湿地 x_4 、水体 x_5 、人造地表 x_6 、裸地 x_7 ; $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 、 $F_3(x)$ 为目标函数, 分别表示经济效益、碳排放量和生态效益; c_j 、 d_j 和 e_j 分别为单位面积下各地类的经济效益系数、碳排放量系数和生态效益系数; 约束条件 $s.t.$ 中, a_{ij} 为第 i 个约束条件中第 j 个变量对应的系数; b_j 为约束值。

为使多目标方案具有实践性^[16], 将 3 个目标函数整理成一个组合函数 $F_4(x)$, 对 2030 年各目标函数进行求解后, 分别用目标函数除以求解后的值, 再进行组合求解。

$$F_4(x) = W_1 \frac{F_1(x)}{G_1} - W_2 \frac{F_2(x)}{G_2} + W_3 \frac{F_3(x)}{G_3} \quad (3)$$

式中, G_1 、 G_2 、 G_3 分别为经济效益、碳排放量、生态效益函数的目标值; W_1 、 W_2 、 W_3 分别为对应函数的权重系数。当 W_1 、 W_2 和 W_3 的取值分别为 0.7、0.2、0.1 时, 该方案以经济发展为侧重, 对碳排放量的增加约束较小, 并通过增加具有较高经济效益的地类来获取相应的经济总量的增长; 当 W_1 、 W_2 和 W_3 的取值分别为 0.5、0.3、0.2 时, 该方案对碳排放量的约束较为中等, 不同地类面积的优化调整主要通过经济效益、碳排放量和生态效益目标的共同作用; 当 W_1 、 W_2 和 W_3 的取值分别为 0.2、0.7、0.1 时, 该方案对碳排放量的约束最大, 优化结果具有更大的碳减排效果, 并增加碳汇地类面积。

(1) 碳排放量目标函数系数

根据现有研究,耕地、林地、草地、湿地、水体和裸地的碳排放量在长时期内变化不大^[43-44],碳排放量系数依次为 0.464、-5.052、-0.947、-0.41、-0.25、-0.005t hm⁻² a⁻¹^[19]。人造地表的碳排放量以福建省 2000—2020 年能源消耗量和土地利用数据为基础数据对其历年单位面积碳排放量进行计算,并运用灰色预测模型对目标年人造地表单位面积碳排放量进行预测。人造地表的碳排放量主要通过计算在利用过程中能源消耗产生的碳排放总量间接得到^[45],计算公式如下:

$$E_b = \sum_{i=1}^n m_i \times n_i \times \varphi_i \times 44/12 \tag{4}$$

式中, E_b 代表各类化石能源消耗产生的碳排放总量; n 代表能源种类; m_i 为能源 i 的消费量; n_i 为能源 i 的折标准煤系数; φ_i 为碳排放系数,等于各种能源的平均低位发热值、碳含量和氧化率 3 种指标的乘积;44/12 表示 CO₂ 与碳的分子量之比。各能源类型碳排放系数和折标准煤系数的计算参照《IPCC 国家温室气体列表指南》、《综合能耗计算通则》(GB/T2589—2020) 和《省级温室气体清单编制指南》中的计算方法及系数进行计算,经计算后的各能源碳排放系数及折标准煤系数值见表 2。

表 2 能源碳排放系数及折标准煤系数
Table 2 Energy carbon emission factor and conversion factor from physical unit to coal equivalent

能源名称 Energy	原煤 Raw coal	焦炭 Coke	原油 Crude oil	汽油 Gasoline	柴油 Diesel	燃料油 Fuel oil	液化石油气 Liquefied petroleum gas	天然气 Natural gas	电力 electric
碳排放系数/(t/t) Carbon emission coefficients	0.5183	0.7801	0.8237	0.7978	0.8443	0.8647	0.8458	0.5897	0.928
折标准煤系数/(kg 标准煤/kg) Conversion factor from physical units to coal equivalent	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4571	1.4286	1.7143	1.33	0.1229

(2) 经济效益目标函数系数

基于 2000—2020 年各地类单位面积的经济产出数据,利用灰色预测模型计算出目标年份的各用地经济效益系数,其中耕地、林地、草地、水域、人造地表分别以农业产值、林业产值、牧业产值、渔业产值、二三产业产值表示,湿地、未利用地不进行计算。

(3) 生态效益目标函数系数

与国土空间开发过程中所产生的经济效益不同,生态效益侧重于对不同生态系统直接或间接提供的能满足人类需求的产品和服务进行评估,其价值通常以它们在市场上的价格或以替代商品和服务的价格为基础通过经济术语的形式进行量化^[46-47],本研究基于谢高地等^[48]的研究以粮食作物单产和平均价格为参照对生态系统服务价值进行经济形式的量化,并结合戴文远等^[49]、王培俊等^[50]对福建省相关区域的研究建立福建省单位面积生态系统服务价值当量因子表(表 3),以 1hm² 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值为一个标准当量对各地类单位面积生态效益进行计算,并运用灰色预测模型以历年数据为基础得到目标年各用地生态效益系数。

表 3 福建省单位面积生态系统服务价值当量
Table 3 Ecosystem service equivalent value per unit area in Fujian Province

耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetland	水体 Water	人造地表 Artificial surfaces	裸地 Bare land
3.44	23.09	19.69	52.02	125.61	-14.27	0.11

1 个当量因子可定义为 1hm² 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值,利用主要粮食作物播种面积、产量和平均价格来计算:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \tag{5}$$

式中, E 为单位农田生态系统提供食物生产服务的经济价值(万元); m_i 表示 i 种粮食作物的播种面积(hm^2); p_i 表示 i 种粮食作物当年的全国平均价格(万元/t); q_i 表示 i 种粮食作物单产(t/hm^2); M 表示粮食作物播种的总面积(hm^2); n 表示粮食种类。

通过计算,2030 年福建省各地类单位面积碳排放、经济效益和生态效益系数见表 4。

表 4 各地类 2030 年单位面积碳排放、经济效益和生态效益系数

Table 4 Carbon emission, economic benefit and ecological benefit coefficient of each land use type per unit area in 2030

系数 Coefficient	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	湿地 Wetland	水体 Water	人造地表 Artificial surfaces	裸地 Bare land
碳排放 Carbon emission/($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	0.464	-5.052	-0.947	-0.41	-0.25	731.62	-0.005
经济效益 Economic benefit/(万元/ hm^2)	13.41	0.97	20.77	1.00	117.92	1196.84	1.00
生态效益 Ecological benefit/(万元/ hm^2)	1.55	10.40	8.88	23.45	56.62	-6.43	0.05

(4) 基于主体功能区发展导向约束的目标函数系数校正

考虑各类主体功能区的发展导向差异,为贯彻主体功能分类约束的思想,使模拟结果更符合各功能区发展重点,分别计算各类功能区不同地类的碳排放量、经济效益、生态效益与全省均值的比值,作为各类功能区各目标函数的修正系数。其中,经济效益系修正系数以各类功能区不同地类的地均经济效益与全省均值比进行计算;碳排放修正系数根据现有研究^[42]得出历年各类功能区碳排放总量,计算各类功能区人造地表单位面积排放量与全省均值之比即得到修正系数;生态效益目标函数修正系数为各功能区的粮食作物单产与全省均值之比。各类功能区修正系数及计算方法见表 5。

表 5 各主体功能区修正系数及计算方法

Table 5 Correction coefficient and calculation method of each main functional area

修正目标 Correction target	城镇建设区 Urban construction area	农业生产区 Agricultural production area	生态保护区 Ecological reserve area	计算方法 Calculation method
碳排放量 Carbon emission	1.06	0.71	1.12	各类功能区历年人造低地表单位面积碳排放量与全省均值之比
经济效益 Economic benefit	1.11	0.59	0.88	各类功能区历年地均二三产值与全省均值之比,用以修正人造地表单位面积经济产出
	1.50	0.69	0.67	各类功能区历年地均农林牧渔产值与全省均值之比,用以修正耕地、林地、草地、水体单位面积经济产出
生态效益 Ecological benefit	0.99	1.03	0.96	各类功能区历年粮食作物单产与全省均值之比

其中,修正系数可量化体现各功能区发展定位的差异,城镇建设区经济效益系数较高,说明该区域经济基础较好。碳排放系数反映了该地区的低碳转型压力较大;农业生产区的碳排放系数较低,在土地在利用开发过程中进行碳减排的潜力较大;生态保护区作为重点生态功能区,由于限制进行大规模的工业化和城镇化开发,经济效益系数较低,发展压力较大。

(5) 目标函数及约束条件

不同情景下各分区用地需求的预测需要兼顾综合效益,本研究以碳排放量最小化、经济效益和生态效益最大化为目标,而约束条件则根据目标函数的反馈所实现的限制因素,因此在不同发展目标下,各功能区目标函数和约束条件的参数设置会有一定差异性。本研究中的目标函数包括经济效益、碳排放量、生态效益和总目标,约束条件包括的总面积约束、经济约束、碳排放约束以及地类面积约束,目标函数是以不同用地的各目标函数系数乘以用地面积来进行累加计算,约束条件的设置均基于对各功能区用地现状以及未来发展趋势的分析,其中总面积约束是以各分区国土空间现状面积进行约束;经济约束是以现状趋势下能达到的未来总量

作为最低值;碳排放量是以现状趋势下能达到的未来总量作为最高值;各地类面积约束则以现状值和未来预测值作为上下限,根据发展需求分别对不同地类做相应调整,如城镇建设区中的人造地表、农业生产区中的耕地、生态保护区中的林草湿地等。根据以上条件,对低碳情景下各分区用地需求进行预测的多目标函数及约束条件进行设定(表6)。

表6 各分区低碳情景下多目标函数及约束条件

Table 6 The multi objective functions and constraint conditions under low-carbon scenario in each area

分区 Area	表达式 Formula
城镇建设区 Urban construction area	经济效益: $F_1(x) = 20.07 \times x_1 + 1.45 \times x_2 + 31.09 \times x_3 + x_4 + 176.5 \times x_5 + 1324.24 \times x_6 + x_7$
	碳排放量: $F_2(x) = 0.464 \times x_1 - 5.052 \times x_2 - 0.947 \times x_3 - 0.41 \times x_4 - 0.25 \times x_5 + 773.22 \times x_6 - 0.005 \times x_7$
	生态效益: $F_3(x) = 1.52 \times x_1 + 10.26 \times x_2 + 8.75 \times x_3 + 23.12 \times x_4 + 55.83 \times x_5 - 6.34 \times x_6 + 0.04 \times x_7$
	总目标: $F_4(x) = 0.7 \frac{F_1(x)}{G_1} - 0.2 \frac{F_2(x)}{G_2} + 0.1 \frac{F_3(x)}{G_3}$
	总面积约束: $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 5012409$
	经济约束: $20.07 \times x_1 + 1.45 \times x_2 + 31.09 \times x_3 + x_4 + 176.5 \times x_5 + 1324.24 \times x_6 + x_7 > 749885003$
	碳排放量约束: $0.461 \times x_1 - 5.052 \times x_2 - 0.949 \times x_3 - 0.41 \times x_4 - 0.253 \times x_5 + 773.22 \times x_6 - 0.005 \times x_7 < 515273972$
	各地类面积约束: $1135029 < x_1 < 1207440$; $2847750 < x_2 < 2873477$; $288633 < x_3 < 306714$; $20895 < x_4 < 21218$; $142186 < x_5 < 149204$; $516011 < x_6 < 688015$; $x_7 < 4570$
农业生产区 Agricultural production area	经济效益: $F_1(x) = 9.2 \times x_1 + 0.67 \times x_2 + 14.25 \times x_3 + x_4 + 80.92 \times x_5 + 702.79 \times x_6 + x_7$
	碳排放量: $F_2(x) = 0.464 \times x_1 - 5.052 \times x_2 - 0.947 \times x_3 - 0.41 \times x_4 - 0.25 \times x_5 + 516.457 \times x_6 - 0.005 \times x_7$
	生态效益: $F_3(x) = 1.6 \times x_1 + 10.71 \times x_2 + 9.13 \times x_3 + 24.13 \times x_4 + 59.27 \times x_5 - 6.62 \times x_6 + 0.05 \times x_7$
	总目标: $F_4(x) = 0.5 \frac{F_1(x)}{G_1} - 0.3 \frac{F_2(x)}{G_2} + 0.2 \frac{F_3(x)}{G_3}$
	总面积约束: $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 5140898$;
	经济约束: $9.20 \times x_1 + 0.67 \times x_2 + 14.25 \times x_3 + x_4 + 80.92 \times x_5 + 702.79 \times x_6 + x_7 > 111945429$;
	碳排放量约束: $0.461 \times x_1 - 5.052 \times x_2 - 0.949 \times x_3 - 0.41 \times x_4 - 0.253 \times x_5 + 516.457 \times x_6 - 0.005 \times x_7 < 77274146$;
	各地类面积约束: $794606 < x_1$; $3776396 < x_2 < 3820875$; $363916 < x_3 < 394369$; $347 < x_4 < 354$; $43340 < x_5 < 56449$; $103760 < x_6 < 145596$; $x_7 < 4570$
生态保护区 Ecological reserve area	经济效益: $F_1(x) = 9 \times x_1 + 0.65 \times x_2 + 13.93 \times x_3 + x_4 + 79.1 \times x_5 + 1049.75 \times x_6 + x_7$
	碳排放量: $F_2(x) = 0.464 \times x_1 - 5.052 \times x_2 - 0.947 \times x_3 - 0.41 \times x_4 - 0.25 \times x_5 + 817.3405 \times x_6 - 0.005 \times x_7$
	生态效益: $F_3(x) = 1.48 \times x_1 + 9.96 \times x_2 + 8.49 \times x_3 + 22.44 \times x_4 + 54.18 \times x_5 - 6.16 \times x_6 + 0.05 \times x_7$
	总目标: $F_4(x) = 0.2 \frac{F_1(x)}{G_1} - 0.7 \frac{F_2(x)}{G_2} + 0.1 \frac{F_3(x)}{G_3}$
	总面积约束: $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 2131890$
	经济约束: $9 \times x_1 + 0.65 \times x_2 + 13.93 \times x_3 + x_4 + 80 \times x_5 + 1049.75 \times x_6 + x_7 > 62766210$
	碳排放量约束: $0.461 \times x_1 - 5.052 \times x_2 - 0.949 \times x_3 - 0.41 \times x_4 - 0.253 \times x_5 + 817.3405 \times x_6 - 0.005 \times x_7 < 51505237$
	各地类面积约束: $418640 < x_1 < 4186497$; $1469338 < x_2$; $160232 < x_3 < 164990$; $x_4 > 3322$; $15887 < x_5 < 22683$; $52629 < x_6 < 70172$; $x_7 < 1203$

2.2.2 国土空间格局优化模拟

完成用地需求预测之后,将求得的数值作为用地需求约束,通过 PLUS 模型对各功能区国土空间格局进行模拟。PLUS 模型主要包括以下 3 个部分:(1) 基于土地扩张分析策略的转化规则挖掘框架(LEAS),通过将各地类的扩张规则挖掘转化为二分类问题,然后基于随机森林算法从原始训练数据集中提取随机样本,获得不同用地类型扩张规律的潜在机制,输出不同地类的适宜性概率分布情况;(2) 基于多类型随机斑块种子机制的 CA 模型(CARS),采用了基于土地利用的多类型随机斑块种子生成机制和阈值递减规则下的 CA 模型,在模拟过程中,土地利用需求通过自适应系数影响局部的土地利用竞争,驱动土地利用总量达到未来需求;(3) 基于多目标规划模型下的分情景空间布局模拟,通过与多目标规划相结合,对不同发展情景下的用地布局进行预测。具体方法流程参见文献^[39]。

2.2.3 发展情景设定

综合考虑土地利用现状及区域发展需求,针对不同分区设定自然发展和低碳发展两种情景。

(1) 自然发展情景:遵循土地利用变化的历史过程,不考虑未来限制或促进土地利用变化的措施,以 2010—2020 年土地利用变化情况做为未来土地利用变化依据。

(2) 低碳发展情景:考虑低碳发展视角下经济和生态效益相协调的原则,通过调整土地利用结构实现经济发展和减少碳排放的双重效果。其中城镇建设区通过提供足够的人造地表以满足新时期经济社会发展的基本用地需求并减缓碳排放增速,同时保护现有耕地、保障当地食物需求;农业生产区以耕地保护为核心,通过控制耕地转出数量和方向提升耕地总体面积,并降低建设用地的扩张速度从而降低碳源效应;生态保护区通过严格保护林草湿地等主要生态用地提升区域碳汇效益,并限制人造地表的扩张。

转换成本可用来表征从当前用地类型转换为需求类型的困难度,本研究针对不同功能分区设置了不同情景用于土地利用空间模拟,因此需要设计不同的转换成本矩阵(表 7),其中 0 表示不能转化、1 代表允许转化。

表 7 情景模拟转换成本矩阵

Table 7 Scenario simulation conversion cost matrix

	自然发展情景							低碳发展情景 Low-carbon development scenario																					
	Natural development scenario							城镇建设区							农业生产区							生态保护区							
								c	f	g	we	wa	a	b	c	f	g	we	wa	a	b	c	f	g	we	wa	a	b	c
c	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	
g	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	
we	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	
wa	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
a	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
b	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

c:耕地 Cultivated;f:林地 Forest;g:草地 Grass;we:湿地 Wetland;wa:水体 Water;a:人造地表 Artificial;b:裸地 Bareland

3 结果与分析

3.1 宏观用地结构分析

不同发展情景下,基于设定的目标函数和约束条件,将各功能区进行多目标求解后的结果与自然发展情景下各用地面积进行对比,并结合碳排放量 and 经济生态效益进行分析。

从用地总体结构看(表 8),与 2020 年相比,2030 年自然发展和低碳发展情景下,土地利用结构总体变化趋势相同,生态用地(林地、草地、湿地、水体)和耕地虽然有所减少,但其作为主要组成地类的地位没有改变,人造地表的面积变化幅度相对较为明显,呈增加趋势。低碳发展情景下各功能区中生态用地和耕地的减少速度较之自然发展情景都有一定程度的减缓,其中生态用地保证了土地利用的碳汇效益,可有效促进区域碳吸收,而耕地面积的稳定可在一定程度上保障区域粮食生产的用地需求。人造地表作为主要的碳源地,低碳发展情景下的面积相较自然发展情景,增加幅度较小,表明可在保障区域经济发展用地需求的同时减少碳排放,从而降低对生态环境的影响。

3.2 碳排放量、经济效益、生态效益分析

不同情景下各功能区用地碳排放量、经济效益和生态效益及对比见表 9。可以看出,较之自然发展情景,低碳发展情景下各功能区用地结构更加符合低碳经济发展的要求,不仅可以减少因土地利用所带来的碳排放量,还保障了社会经济活动的用地需要,与福建省低碳绿色发展的要求相一致。

碳排放量方面,在低碳情景下,城镇建设区、农业生产区、生态保护区的碳排放量分别比自然发展情景下低 9.91%、11.14%、9.54%,说明通过总体用地结构的优化调整,可以有效的减少碳排放,减少经济活动中所带

来的资源损耗,降低土地利用开发过程中对环境的负面效应,推动土地利用方式从高碳粗放式向低碳集约式转变。在经济效益方面,低碳发展情景中的经济效益要略低于自然发展情景,这是由于该情景为了实现碳减排,限制了作为主要碳源的人造地表面积,对土地利用的经济效益产生了影响。但从差异幅度来看,低碳发展情景下城镇建设区、农业生产区和生态保护区的经济效益比自然发展情景分别低 8.58%、7.65%、7.37%,但均低于碳排放量的差值比,且经调整后的经济效益全省年均增长率仍达到 7.3%,高于福建省提出的到 2030 年地区生产总值年均增长 6.3%的目标值。生态效益方面,农业生产区和生态保护区在低碳发展情景下较之自然发展情景分别低了 0.87%和 0.28%,但差值总量较小,且城镇建设区的生态效益较在低碳发展情景下较自然发展情景高了 2.48%,整体来看低碳发展情景下的生态效益要高于自然发展情景。

表 8 不同情景下各分区 2030 年用地类型对比

Table 8 Comparison of land use types in each area under different scenarios in 2030

分区 Area	年份/情景 Year/Scenarios	碳源地/km ² Carbon source				碳汇地/km ² Carbon sink		
		耕地	人造地表	林地	草地	湿地	水体	裸地
城镇建设区	2020	12074.4	4487.74	28734.77	3067.14	212.18	1492.04	55.82
Urban construction area	2030 自然发展	11350.29	5733.46	28477.5	2886.33	208.95	1421.86	45.7
	2030 低碳发展	11695.71	5183.29	28477.5	3067.14	208.95	1491.44	0.06
农业生产区	2020	7740.4	1037.6	38208.75	3943.69	3.54	433.4	41.6
Agricultural production area	2030 自然发展	7946.06	1455.96	37763.96	3639.16	3.47	564.49	35.89
	2030 低碳发展	7991.4	1336.9	37979.47	3659.92	3.48	435.87	1.95
生态保护区	2020	4186.4	426.09	14863.21	1649.9	20.18	158.87	14.25
Ecological reserve area	2030 自然发展	4186.97	584.77	14693.38	1602.32	33.22	206.21	12.03
	2030 低碳发展	4186.4	538.14	14776.27	1602.32	43.31	172.46	0

表 9 不同发展情景下各分区目标值对比

Table 9 Comparison of target values in each area under different development scenarios

分区 Area	目标值 Target value	发展情景 Development scenarios		情景对比 Scenarios comparison	
		自然发展	低碳发展	差值	差值比/%
城镇建设区	碳排放量/万吨	42914.47	38660.11	-4254.36	-9.91
Urban construction area	经济效益/亿元	82025.11	74987.87	-7037.24	-8.58
	生态效益/亿元	3827.33	3922.16	94.83	2.48
农业生产区	碳排放量/万吨	5612.22	4986.82	-625.40	-11.14
Agricultural production area	经济效益/亿元	12190.69	11258.52	-932.18	-7.65
	生态效益/亿元	4737.61	4696.24	-41.37	-0.87
生态保护区	碳排放量/万吨	4040.69	3655.35	-385.34	-9.54
Ecological reserve area	经济效益/亿元	6997.44	6481.65	-515.79	-7.37
	生态效益/亿元	1744.75	1739.84	-4.91	-0.28

差值=低碳发展目标值-自然发展目标值;差值比=(低碳发展目标值-自然发展目标值)/自然发展目标值

3.3 城镇、农业、生态典型区变化模式分析

3.3.1 模型精度验证

根据往期土地利用数据和选取的自然环境、社会经济、交通区位等多种驱动因素,按照 1%的比例进行随机均匀采样获取样本集,使用随机森林算法进行训练,获得不同地类的扩张规律。根据得到的各地类总体扩张概率,结合邻域影响因子、转移矩阵等,设定未来土地利用需求数量,将主要水系、保护区、公园等区域作为限制区域,通过 PLUS 模型得到各分区 2020 年的土地利用空间分布。根据 2020 年的土地利用现状和模拟图计算得到 Kappa 系数和总体分类精度(Overall Accuracy, OA)(表 10),结果表明 PLUS 模型的模拟精度较高,符合区域土地利用发展情况,可用于预测未来土地利用的发展趋势。

表 10 PLUS 模型精度评价
Table 10 Accuracy evaluation of PLUS model

系数 Coefficient	城镇建设区 Urban construction area	农业生产区 Agricultural production area	生态保护区 Ecological reserve area	全省 Whole province
Kappa 系数 Kappa coefficient	0.84	0.83	0.86	0.84
总体精度 Overall accuracy	0.91	0.92	0.93	0.92

PLUS:斑块生成土地利用模拟模型 Patch-generating Land Use Simulation

3.3.2 国土空间布局模拟结果

对模型进行验证后,通过 PLUS 模型开展福建省 2030 年用地空间布局模拟,低碳发展情景下国土空间格局模拟结果如图 3 所示。可以看出,虽然不同时期的用地结构存在一定差异,但从空间分布特征来看,各地类的分布规律与历史趋势基本相同,其中作为主要碳源的人造地表和耕地主要分布在临近海岸线处海拔较低、地势平缓易开发的一侧,碳汇空间如林地、草地、湿地和 水体地主要集中在内陆区域海拔相对较高且地况较复杂的区域。

3.3.3 典型区变化模式

(1) 城镇建设区

城镇建设区是海峡西岸经济区发展的主体区域,也是主要的碳源空间,在土地利用过程中贡献了全省 80%左右的碳排放量^[42]。选取城镇建设区典型区域用地现状(图 4)可以看出,人造地表呈集聚式分布,碳源集聚效应明显,城市周边被林、草地包围,具有一定的碳汇效益,其余地区主要为耕地。

根据现有土地资源状况,城市中心区域的空间已无法继续满足社会经济高速发展下的用地需求,因此从变化趋势来看,到 2030 年,作为主要碳源地的人造地表出现了向外扩张的态势,如图 4 中区域 A、B。不同发展情景下,人造地表的扩张呈现出了不同的特征,在自然发展情景下,区域 A 中新增人造地表通过转化周边的耕地完成了从分散到连片的过程,而区域 B 中的新增人造地表在原有范围边缘处通过转化林草地等生态用地完成了向外扩张,这势必会影响该区域的碳汇效益和生态功能;低碳发展情景下,区域 A 中的人造地表由成片蔓延式转为边缘小范围扩张,这说明该情景可在一定程度上减缓碳源地人造地表的扩张速度,从而降低土地利用过程中所带来的碳排放,但可以看出该新增用地的集中连片程度较低,因此需要加强土地资源的节约集约利用,与此同时城市用地方式也要逐步从增量发展为主转向存量挖潜为主,盘活存量土地,有效调控城市空间有序扩张,建设绿色低碳城市。

(2) 农业生产区

农业生产区以提供农产品为主体功能,主要集中在福建省西南部和北部,为保证区域粮食生产安全提供了重要保障。选取农业生产区典型区进行分析(图 5),从各地类空间布局来看,由于区域发展和城市化的持续推进,到 2030 年该分区人造地表呈现出一定的扩张态势,致使碳源效应增强,如图 5 区域 A;耕地在原有分布范围附近呈点状扩张,如图 5 区域 B;此外,水域面积也有一定的增加,这增强了碳汇效益并保障了耕地的灌溉条件。

不同发展情景下,各地类的扩张细节不尽相同,在自然发展情景下,区域 A 中游离在县城周边的人造地

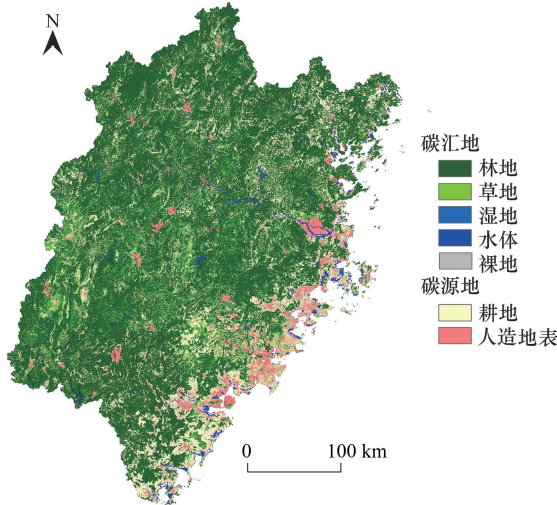


图 3 福建省 2030 年低碳发展情景下国土空间布局模拟图
Fig. 3 Simulation map of territorial spatial layout of Fujian Province under low carbon development scenario in 2030

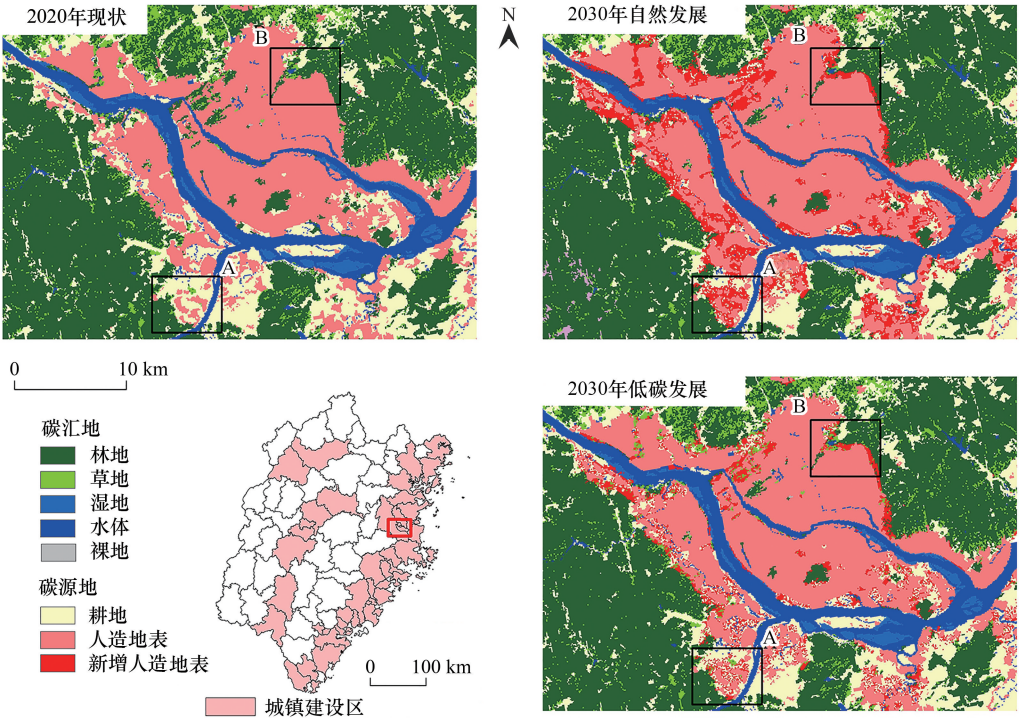


图 4 不同情景下城镇建设区典型区域 2020—2030 国土空间布局图

Fig.4 Territorial spatial layout of typical urban construction areas under different scenarios, 2020—2030

表出现了向行政中心方向延伸的情况,并出现了较大面积的扩张,使得部分林草地消失,而在区域 B 中通过转换部分林地又增加了一定面积的耕地;在低碳发展情景下,区域 A 中的人造地表不再出现大范围的无序扩张,从而避免部分生态用地被占用并降低由于城镇扩张带来的碳排放,同时区域 B 中的耕地也增加了更多的面积,进一步增强了区域农业生产主体功能,届时可以在保护现有耕地的同时,通过控制非农建设的项目开展,严格执行耕地占补平衡制度,并可将有条件的较小块耕地并入相邻大块的耕地中,促进耕地的集中连片开发。

(3) 生态保护区

生态保护区由森林覆盖率较高、生物多样性较丰富的区域组成,主要分布在福建省中部和北部,区域内山高坡陡、地形起伏度较大,2020 年生态用地占该分区总面积的 78%左右,具有重要的碳汇效益和生态产品供给能力。选取生态保护区典型区进行分析(图 6),从用地现状可以看出,该功能区破碎化程度较高,主要由碳汇地林草地组成;碳源空间人造地表沿现有水系和地势平坦处成片分布,空间布局较为分散;耕地的空间聚合度较低,多数围绕在人造地表周边呈分散式分布,不适合进行规模化开发。

通过比较不同发展情景发现,若不实施相应的管控政策,自然发展情景下的人造地表将在 2030 年呈现出逐渐向外膨胀的趋势,如图 6 区域 A 县镇周边的林草地和部分耕地被转换为人造地表,区域 B 中通过转化周边的林草地使得原有的人造地表完成了从分散到连片的过程,而这也让生态空间受到一定挤压,并降低了区域碳汇效应;而在低碳情景下,区域 A 中人造地表的成片蔓延式无序扩张得到了遏制,这对降低碳源效应、减少碳排放有一定效果。因此下一步需要通过协调土地利用和低碳生态的关系,实施更加严格的生态管控政策,同时保护周边的现有林草地和水资源,增强区域碳汇效应,从而实现土地资源低碳利用与生态保护均衡发展。

(4) 综合分析

为研究不同情景下区域尺度的各用地变化空间细节,在对各分区的总体空间分布特征进行分析后,选取

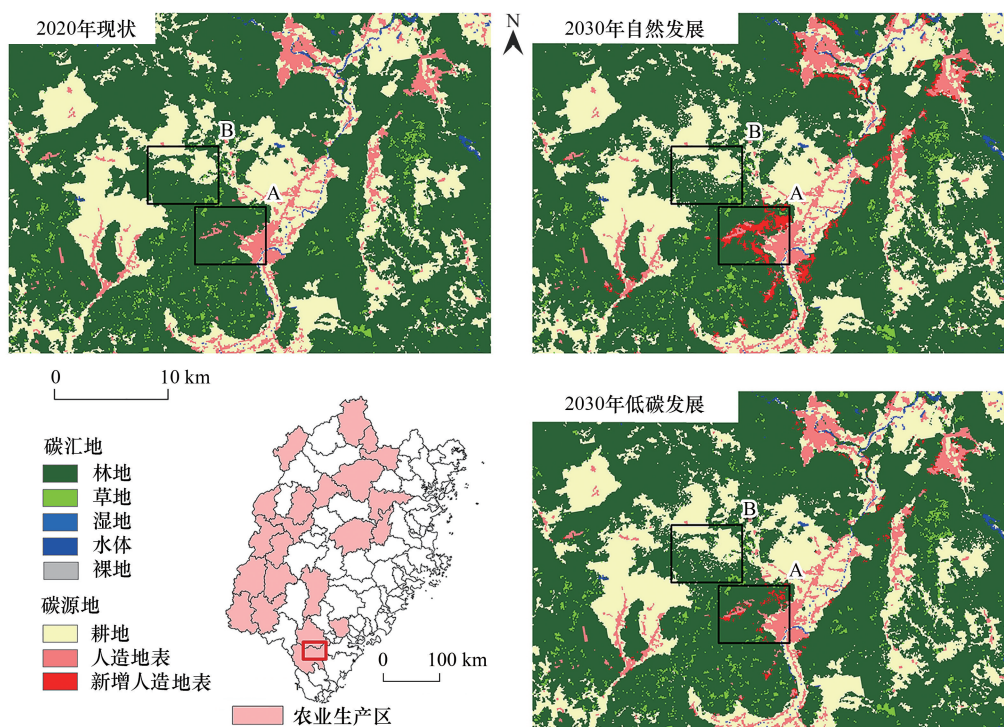


图 5 不同情景下农业生产区典型区域 2020—2030 国土空间布局图

Fig.5 Territorial spatial layout of typical agricultural production area under different scenarios, 2020—2030

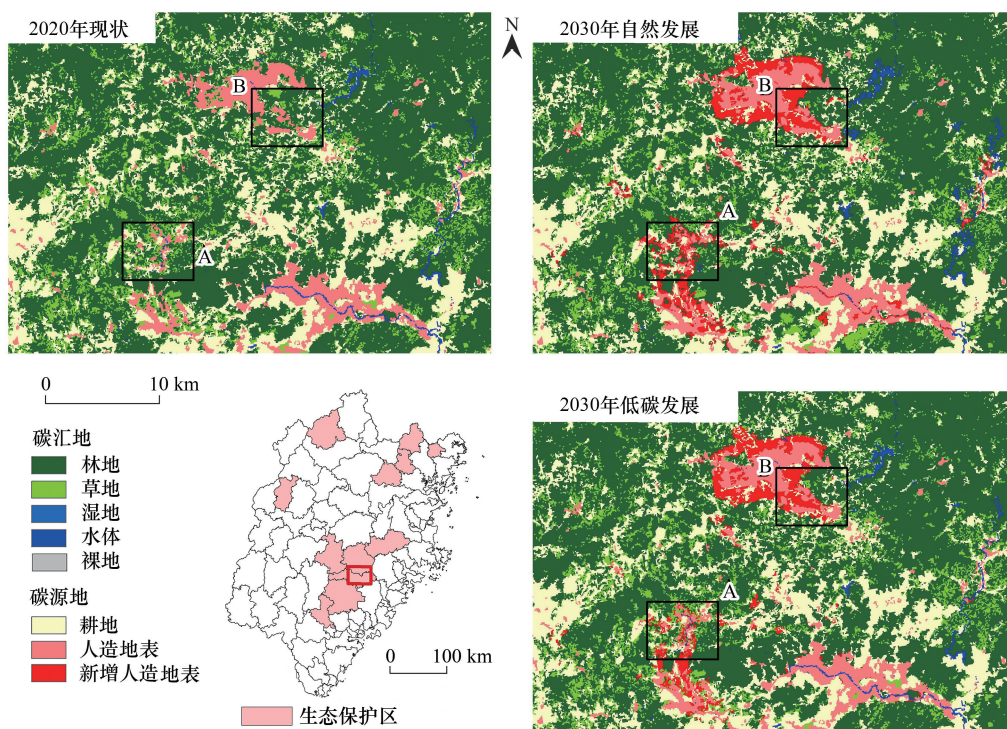


图 6 不同情景下生态保护区典型区域 2020—2030 国土空间布局图

Fig.6 Territorial spatial layout of typical ecological reserve area under different scenarios, 2020—2030

了其中的典型区域并围绕其功能用地包括耕地、生态用地和人造地表的分布特征和变化趋势进行分析,总体来看,各分区并未因人造地表的扩张而破坏原有整体格局。各分区典型区域地类空间布局 and 不同情景下变化趋势可归纳如下(表 11):

表 11 各分区典型区域用地分布特征

Table 11 Distribution characteristics of typical area land use in each area

地类 Land use types		城镇建设区 Urban construction area	农业生产区 Agricultural production area	生态保护区 Ecological reserve area
碳源地 Carbon source	耕地	呈集中连片式分布在城市外围,是 人造地表扩张的主要方向,自然 发展情景下受到的挤压程度更 高。	集中分布在地势平坦、水资源充 足、较为集中连片的区域;低碳 发展情景下增加了更多的耕地 供应。	空间聚合度较低,分散式分布。 不同发展情景下分布格局基本 保持不变。
	人造地表	集聚式分布,形状较为规则。自然 发展下由分散到连片型扩张; 低碳发展下由边缘向外小范围 扩张。	沿低地势、低坡度呈条带状分散 分布;自然发展下由外围向中心 延伸型扩张;低碳发展下小范围 扩张。	沿现有水系成片分散式分布;自然 发展下膨胀型无序扩张;低碳发 展下区域蔓延式有序扩张。
碳汇地 Carbon sink	生态用地	大范围分布在城市外围,聚合度 较高。 不同发展情景下均受到一定 挤压。	大范围集聚式分布;不同发展情 景下空间格局基本保持不变。	破碎化程度较高,主要由林草地组 成;不同发展情景下均受到一定 程度挤压。

从不同发展情景的用地变化情况来看,各地类中人造地表的变化最为显著,而由于城镇建设区受人类活动影响更大,因此该功能区的变化也最为明显。受城市化扩张影响,在自然发展情景下,城镇周边的生态空间受到不同程度的挤压,将会降低区域内生态环境质量和碳汇效益,对区域低碳绿色发展提出了新的挑战。在低碳发展情景下,通过挖掘存量用地潜力,提高土地资源的节约集约利用,可在一定程度上减缓城镇扩张的趋势,降低在土地利用过程中所造成的碳排放和环境破坏;变化过程较为平缓的为农业生产区典型区。在自然发展情景下,人造地表出现了小幅扩张并呈现出由外围向县镇中心延伸的趋势,侵占了部分生态用地;低碳发展情景下,该功能区遏制了城镇扩张的速度,保证耕地面积的小幅增加并使其更为集中,降低碳源效应并进一步保障区域的主体功能和粮食生产能力。

4 讨论与结论

(1)通过耦合“自顶向下”的 MOP 模型和“自底向上”的 PLUS 模型,从用地需求和空间布局两方面对福建省国土空间进行分情景分区域优化模拟,其中低碳发展情景考虑碳减排与经济生态效益相协调的原则,基本满足各分区不同发展导向的需求,可为形成区域性、差异化的低碳用地管控政策提供参考,推动实现区域土地资源绿色高效利用。

(2)在用地需求预测方面,以主体功能区分区定位为指导,衔接国土空间规划实施背景,构建以碳排放、经济效益和生态效益为导向的多目标函数及约束条件,同时考虑各分区发展水平及侧重对其目标系数进行修正,推动实现主体功能约束有效的区域性用地总体结构。求解后的用地方案中各分区生态用地的收缩速度都有一定程度的减缓,保证了土地利用的碳汇效益,可有效促进区域碳吸;人造地表的面积较之自然发展情景下有所减少,可在保障区域经济发展用地需求的同时降低碳排放。各分区用地结构比较符合低碳经济发展的要求,在减少了碳排放量的同时,保障了社会经济发展的需要,并满足福建省低碳绿色发展的要求,从而为区域国土空间有序开发、生态文明建设提供战略支撑。

(3)在空间布局优化模拟方面,PLUS 模型模拟出来的 2020 年福建省各功能分区的总体精度和 Kappa 系数数值符合要求,说明该模型适用于对未来国土空间的模拟。从空间分布来看,福建省 2030 年国土空间格局基本保持不变,其中作为主要碳源的人造地表和耕地主要分布在临近海岸线处海拔较低、地势平缓易开发的一侧,林地、草地、湿地和水体等主要碳汇区集中在内陆区域海拔相对较高且地况较复杂的区域。此外,还选取

了各功能分区的典型区域进行分析,研究了在不同情景下区域尺度的各地类变化空间细节,可为福建省下一步区域发展规划提供一定依据。

本研究能够科学的进行多情景下的分区域国土空间模拟,可为今后开展相关低碳研究提供参考。本研究在对碳排放量的计算中,是采用折标准煤系数进行估算并以此为基础进行各用地类型的碳排放系数,由于受数据所限,得到的碳排放总量与实际碳排放值之间可能具有一定误差,后续研究中将进一步丰富数据来源,消除计算过程中的误差。在空间模拟方面,目前仅考虑了各地类的适宜性概率,未考虑区域资源环境承载能力和国土空间开发适宜性,后期研究中,将继续构建基于“双评价”的优化方法和国土空间功能分区优化模式,以“双评价”结果作为国土空间优化模拟的空间约束,进一步保障模拟结果的科学性和有效性,同时通过系统分析其国土空间格局演变效应来研究不同情景下各区域间的国土空间功能特点,发掘出具有相同发展模式的区域,为区域国土空间有序开发和碳减排协同治理提供参考。

参考文献(References):

- [1] 岳文泽,钟鹏宇,王田雨,夏皓轩. 国土空间规划视域下土地发展权配置的理论思考. 中国土地科学, 2021, 35(4): 1-8.
- [2] 张京祥,夏天慈. 治理现代化目标下国家空间规划体系的变迁与重构. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2040-2050.
- [3] 樊杰,赵艳楠. 面向现代化的中国区域发展格局:科学内涵与战略重点. 经济地理, 2021, 41(1): 1-9.
- [4] 樊杰,郭锐. “十四五”时期国土空间治理的科学基础与战略举措. 城市规划学刊, 2021(3): 15-20.
- [5] 樊杰,周侃. 以“三区三线”深化落实主体功能区战略的理论思考与路径探索. 中国土地科学, 2021, 35(9): 1-9.
- [6] 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(4): 159-170, 207.
- [7] 自然资源部办公厅. 省级国土空间规划编制指南(试行), (2020-1-17) [2021-12-12]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200120_2498397.html
- [8] 陈影,张利,何玲,门明新. 基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟. 生态学报, 2016, 36(17): 5391-5400.
- [9] Zhao X Q, Li S N, Pu J W, Miao P P, Wang Q, Tan K. Optimization of the national land space based on the coordination of urban-agricultural-ecological functions in the Karst areas of southwest China. Sustainability, 2019, 11(23): 6752.
- [10] 周鹏. 太行山区国土空间格局优化与功能提升路径研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.
- [11] 李鑫,李宁,欧名豪. 土地利用结构与布局优化研究述评. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 103-110.
- [12] 马冰滢,黄姣,李双成. 基于生态-经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置. 地理科学进展, 2019, 38(1): 26-37.
- [13] 杨露,颜耀文,宗丽丽,邱天,焦继宗. 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. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568-579.
- [14] 陈红,史云扬,柯新利,郝晋珉,陈爱琪. 生态与经济协调目标下的郑州市土地利用空间优化配置. 资源科学, 2019, 41(4): 717-728.
- [15] 苑韶峰,唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异. 经济地理, 2019, 39(2): 190-198.
- [16] 刘慧灵,伍世代,韦素琼,林蕙灵,王强. 基于低碳经济导向的土地利用结构优化研究——以福建省福州市为例. 水土保持通报, 2017, 37(6): 202-208.
- [17] 曾永年,王慧敏. 以低碳为目标的海东市土地利用结构优化方案. 资源科学, 2015, 37(10): 2010-2017.
- [18] 郑永超,文琦. 宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应. 水土保持研究, 2020, 27(1): 207-212.
- [19] 魏燕茹,陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [20] 王旭,马博文,李丹,陈昆仑,姚华松. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
- [21] 薛峰,李苗裔,马妍,徐辉. 基于 FLUS 模型的江西省国土空间开发模拟与评估. 规划师, 2020, 36(8): 12-19, 32.
- [22] 卞子浩,马小雪,龚来存,赵静,曾春芬,王腊春. 不同非空间模拟方法下 CLUE-S 模型土地利用预测——以秦淮河流域为例. 地理科学, 2017, 37(2): 252-258.
- [23] 王祺,蒙古军,毛熙彦. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化. 地理研究, 2014, 33(6): 1073-1084.
- [24] 许小亮,李鑫,肖长江,欧名豪. 基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化. 生态学报, 2016, 36(17): 5401-5410.
- [25] 韩会然,杨成凤,宋金平. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测. 地理科学进展, 2015, 34(8): 976-986.
- [26] 曹帅,金晓斌,杨绪红,孙瑞,刘晶,韩博,徐伟义,周寅康. 耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1171-1185.
- [27] Li S N, Zhao X Q, Pu J W, Miao P P, Wang Q, Tan K. Optimize and control territorial spatial functional areas to improve the ecological stability and total environment in Karst areas of Southwest China. Land Use Policy, 2021, 100: 104940.
- [28] 魏伟,张睿. 基于主体功能区、国土空间规划、三生空间的国土空间优化路径探索. 城市建筑, 2019, 16(15): 45-51.

- [29] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201.
- [30] 张赫, 王睿, 于丁一, 蹇庆鸣, 彭竞仪, 张建勋. 基于差异化控碳思路的县级国土空间低碳规划方法探索. 城市规划学刊, 2021(5): 58-65.
- [31] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 张翀, 傅庆玲, 金昱. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考. 城市规划学刊, 2021(4): 74-80.
- [32] Zhou L, Dang X W, Sun Q K, Wang S H. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102045.
- [33] 李思楠, 赵筱青, 普军伟, 王茜, 苗培培, 谭琨. 西南喀斯特典型区国土空间地域功能优化分区. 农业工程学报, 2020, 36(17): 242-253, 314.
- [34] Peng K F, Jiang W G, Deng Y, Liu Y H, Wu Z F, Chen Z. Simulating wetland changes under different scenarios based on integrating the random forest and CLUE-S models: a case study of Wuhan Urban Agglomeration. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106671.
- [35] Li F X, Wang L Y, Chen Z J, Clarke K C, Li M C, Jiang P H. Extending the SLEUTH model to integrate habitat quality into urban growth simulation. *Journal of Environmental Management*, 2018, 217: 486-498.
- [36] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [37] 赵林峰, 刘小平, 刘鹏华, 陈广照, 何家律. 基于地理分区与 FLUS 模型的城市扩张模拟与预警. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 517-530.
- [38] Lai Y, Huang G Q, Chen S Z, Lin S T, Lin W J, Lyu J X. Land use dynamics and optimization from 2000 to 2020 in east Guangdong Province, China. *Sustainability*, 2021, 13(6): 3473.
- [39] 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.
- [40] 赵荣钦, 黄贤金, 揣小伟. 中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向. 中国土地科学, 2016, 30(12): 83-92.
- [41] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, Zhou Y Y, Yao S J, Qian X J, Wang C X, Wu B, Wu J P. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889-906.
- [42] Chen J D, Gao M, Cheng S L, Hou W X, Song M L, Liu X, Liu Y, Shan Y L. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017. *Scientific Data*, 2020, 7: 391.
- [43] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京大学, 2010.
- [44] 王方怡, 洪志猛, 康智明, 兰思仁, 陈世品, 叶玉珍. 福建省农业碳排放时空变化及其驱动因素. 福建农业学报, 2019, 34(1): 124-134.
- [45] 苏凯, 陈毅辉, 范水生, 张明如. 市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例. 中国环境科学, 2019, 39(2): 859-867.
- [46] Hasan S S, Zhen L, Miah M G, Ahamed T, Samie A. Impact of land use change on ecosystem services: a review. *Environmental Development*, 2020, 34: 100527.
- [47] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [48] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [49] 戴文远, 江方奇, 黄万里, 廖李红, 姜坤. 基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究——以福州新区为例. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2098-2109.
- [50] 王培俊, 孙煌, 华宝龙, 范胜龙. 福州市滨海地区生态系统服务价值评估与动态模拟. 农业机械学报, 2020, 51(3): 249-257.