DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.013

黄韬,刘素红. 基于 PLUS-InVEST 模型的福建省土地利用变化与碳储量评估[J].水土保持学报,2024,38(2);246-257.

HUANG Tao, LIU Suhong. Evaluation of land use change and carbon storage in Fujian Province based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):246-257.

基于 PLUS-InVEST 模型的福建省土地利用变化与碳储量评估

黄韬1,刘素红2

(1,陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119; 2.北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

摘 要: [目的] 福建省森林覆盖率高达 66.8%,是我国森林覆盖率排名第 1 的省份。探讨福建省土地利用变化对碳储量时空变化的影响是探寻社会发展和生态保护平衡点的理论基础。[方法] 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型碳储量模块,揭示 2000—2020 年全省碳储量时空变化特征与土地利用类型之间的关系,并从自然发展、生态保护和城镇发展 3 种情景预测 2020—2030 年福建省碳储量时空变化。[结果] 2000 年、2010 年和 2020 年研究区的总碳储量分别为 214.77×10⁷,214.51×10⁷,212.93×10⁷ t,呈逐年下降趋势。人类活动对土地的开发和改造是导致碳储量变化的主导因素,大面积的耕地和林地转变为建设用地是导致碳储量降低的直接原因。预测结果认为,与 2020 年相比,2030 年自然发展、生态保护和城镇发展情景下碳储量分别减少 1.47×10⁷ t,增加 0.17×10⁷ t,减少 1.85×10⁷ t。生态保护情景是唯一逆转碳储量下降的发展情景,该情景与 2020 年相比,林地面积扩张 1 900.87 km²,林地碳储量增长 2.08×10⁷ t,在切实保护生态的同时也能够满足城镇发展的土地需求。[结论] 落实以林地保护为主,控制建设用地是福建省实现"双碳"目标的重要前提。

关键词:碳储量; PLUS 模型; InVEST 模型; 碳达峰; 福建省

中图分类号: K903: X144 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)02-0246-12

Evaluation of Land Use Change and Carbon Storage in Fujian Province Based on PLUS-InVEST Model

HUANG Tao1, LIU Suhong2

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The forest coverage rate of Fujian Province is as high as 66.8%, ranking first in China. To investigate the impact of land use changes on carbon storage in Fujian Province is the theoretical basis for exploring the balance between social development and ecological protection. [Methods] Based on the carbon storage module of PLUS model and InVEST model, relationship between the spatiotemporal change characteristics of carbon storage and land use types in Fujian province during 2000—2020 was revealed, and the spatial and temporal changes of carbon storage in Fujian Province during 2020—2030 were predicted from three scenarios: natural development, ecological protection and urban development. [Results] The total carbon reserves in the study area in 2000, 2010 and 2020 were 214.77×10^7 , 214.51×10^7 and 212.93×10^7 t, respectively, indicating a downward trend year by years. The development and transformation of land by human activities was the dominant factor leading to changes in carbon stocks, and the conversion of large areas of cultivated land and forest land into urban areas was the primary reason for the decline in carbon stocks. The prediction results showed that compared with 2020, carbon storage under natural development, ecological protection and urban development in 2030 would decrease by 1.47×10^7 t, increase by 0.17×10^7 t, and decrease by 1.85×10^7 t, respectively. The ecological protection scenario was the only development

收稿日期:2023-07-13 **修回日期:**2023-09-13

录用日期:2023-10-11

网络首发日期(www.cnki.net):2024-01-16

资助项目:国家重大基金项目(42293272)

第一作者:黄韬(1996—),男,硕士研究生,主要从事植被覆盖与生态系统服务相关研究。E-mail; albert@snnu.edu.cn通信作者:刘素红(1967—),女,教授,博士,主要从事植被覆盖遥感与遥感信息应用研究。E-mail; liush@bnu.edu.cn

scenario that reversed the decline in carbon stocks. Compared with 2020, the forest area had expanded by $1\,900.87~\mathrm{km^2}$ and the forest carbon storage had increased by $2.08\times10^7~\mathrm{t}$, which could effectively protect the ecology and meet the land requirements for urban development. [Conclusion] Prioritizing forest land protection and controlling the expansion of construction land are crucial prerequisites for Fujian Province to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals.

Keywords: carbon storage; PLUS model; InVEST model; carbon peak; Fujian Province

Received: 2023-07-13 **Revised**: 2023-09-13 **Accepted**: 2023-10-11 **Online**(www.cnki.net): 2024-01-16

土地是人类赖以生存的根基,而土地资源所具备 的系统性、结构性和复杂性正是探索全球环境变化过 程中不可忽略的重要因素。在这一背景下,寻求合理 的土地利用配置和有效优化土地资源有助于提高土 地利用的效率,从而实现人类社会的可持续发展[1]。 土地利用优化配置有助于了解土地利用变化起因、过 程和结果,既能满足当地经济社会发展和生态保护预 期目标的同时,也能增强土地利用的效率和效益,维 持土地生态系统的内部协调,实现人与自然和谐发 展[2]。国务院公布的《2030年前碳达峰行动方案》[3] 中指出,结合国土空间规划编制和实施,构建有利于 碳达峰、碳中和的国土空间开发保护格局,将宏观与 微观、战略与战术、当前与未来等一系列系统性思维 融入到国土空间布局体系之中,形成以高质量生态环 境的空间格局带动经济社会高质量发展的土地利用 空间格局。碳储量的评估与预测不仅能延伸国土空 间调查的深度,还能拓宽土地规划和资源有效利用的 广度,为后续碳政策的详细规划提供科学依据。

针对探索未来情景下土地利用空间格局在不同 发展模式对生态系统碳储量的影响,国内外学者都展 开相关性研究。NELSON等[4]利用 InVEST模型评 估全球在 2000-2010 年的碳储量变化,并模拟 2010—2015 年全球变化趋势; RONGFANGU 等[5] 研究表明,采用复合模型的方法可对区域碳储量时空 变化规律进行摸索,并对未来情景预测实现区域碳储 量的趋势变化进行准确估算;黄从红等[6]研究认为, InVEST 模型是目前诸多生态系统服务功能评估模 型中最成熟的模型,尤其是碳储量模块的估算相较于 其他模型更为准确。PLUS模型是当今热门的土地 利用模型之一,LI等[7]研究认为,该模型通过随机森 林算法计算不同地类的转移概率和 CA-Markov 预 测未来土地利用的变化的过程中,无论从模拟精度、 元胞尺度变化和景观格局的相似度都优于其他模型; LI等[8]认为,PLUS模型与 InVEST模型的耦合度 较高,是目前进行土地利用变化和碳储量评估与预测 的有效手段。

福建省作为我国森林覆盖率连续 42 年全国第 1

的省份,其高面积的林地覆盖代表该省拥有巨大的碳 储量,如何评估现有的碳储量和生境系统的变化是现 阶段国土空间调查的重点任务。国内众多学者,如肖 微[9]、黄康等[10]、刘智方等[11]都尝试过采用 InVEST 模型探索福建省局部区域的生态系统服务变化,一方 面从生境质量作为切入点,以水源模块、土壤模块和 生态功能模块评估为主,以土地利用变化分析为辅, 通过主成分分析法对 InVEST 模型结果以等级化形 式进行评估,虽然能具体落实到局部地区的细节变 化,但缺乏宏观上定量化认识,所参考的碳密度数据 与研究区的参数匹配性较低;另一方面,以 CA-Markov 模型模拟作为主线脉络,通过土地利用变化 来反映研究区生境质量的变化,实现对研究区生境质 量长时间尺度的综合性评估,但部分研究的时间尺度 较短,仅聚焦于过去未能将研究推向未来发展情景的 模拟,同时也缺乏对碳储量因素的研究。因此,总体 来看,如何利用地理空间数据和土地利用空间数据去 评估福建省全局性的碳储量研究相对不足。

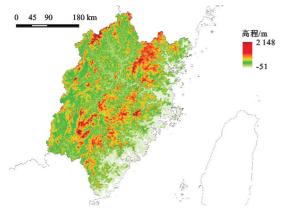
本文运用 PLUS 模型关注福建省土地利用优化配置、转型及未来潜在的土地利用趋势变化,从特定的情景出发,充分考虑全省社会经济发展、生态环境保护和政策规范约束等多个方面,制定相对应的优化目标与约束条件,从而为实现区域经济发展、环境保护最大化建言献策,并对未来土地利用类型进行优化配置和碳政策的实施方案与行动规划提供切实可行的思路。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

福建省地处我国东南沿海地区(115°50′51″—120°43′23″E,23°33′39″—28°19′14″N),属亚热带季风气候,全省陆地面积约 12.4×10⁴ km²,海域面积约 13.6×10⁴ km²,包括福州、厦门、泉州、莆田、宁德、漳州、南平、三明和龙岩 9 个地级市。福建省自然资源丰富,生物种类繁多,地貌及土壤类型多样[12],地势由东南到西北逐渐升高,年均气温 20 ℃,年均降水量 1 400 mm 以上(图 1)。因此福建省水土条件极其优越,耕地中固碳能力较强的水稻土含量极高,天然林

面积达到 413.8 hm²。由于福建省坚持对现有的耕地和林地资源进行经营、管理和保护[13-14],因此其耕地和林地的碳固存能力不断增强。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2019)3266 的标准地图绘制。

图 1 研究区位置与范围

Fig. 1 Location of the study area and range

1.2 数据与来源

土地利用数据和模型驱动因子数据是本研究所需要的核心数据(表 1)。二者分别应用于 PLUS 模型中的土地扩张分析策略(LEAS)和随机森林回归概率计算模块(RFC)。土地利用数据来源于 GlobeLand30(http://www.globallandcover.com),是中国全球地表覆盖遥感制图与关键技术研究项目的重要成果[15]。

表 1 模型驱动数据来源与说明

Table 1 Source information of the data and descriptions

数据名称	数据分辨率/m	表述	数据来源
数字高程	30	Topography	NASA SRTM1 v3.0
坡度	30	(地形)	经计算生成
生产总值	1 000	Humanity	中国科学院资源环境数据中心
全省人口分布	1 000	(人文)	中国科学院资源环境数据中心
全省年平均温度	1 000	Climate	中国科学院资源环境数据中心
全省年平均降水	1 000	(气候)	中国科学院资源环境数据中心
归一化植被指数	1 000	Ecology	中国科学院资源环境数据中心
土壤类型	1 000	(生态)	HWSD v1.2
夜间灯光指数	1 000		中国科学院资源环境数据中心
距河流的距离	30	Society	OpenStreetMap
距铁路的距离	30	(社会)	OpenStreetMap
距高速公路的距离	£ 30	(江云)	OpenStreetMap
距一级道路的距离	£ 30		OpenStreetMap

通过裁剪、镶嵌和重采样处理后得到福建省2000年、2010年和2020年3期土地利用数据,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地为一级地类的6种类型,空间分辨率为30m;国内生产总值、人口密度、年平均降水量、年平均气温、归一化植被指数和夜间灯光指数来源于中国科学院资源环境数据中心(http://www.resdc.cn/);土壤类型数据来自联合国粮农组织发布的世界土壤数据库HWSDv1.2(https://www.fao.org/);高程数据来自NASA

SRTM1 v3.0(https://search.earthdata.nasa.gov/); 坡度数据在 ArcGIS 10.2 经高程数据中提取得到;河流、铁路、高速公路和一级道路数据来源于 Open-StreetMap(https://www.openstreetmap.org),通过计算欧氏距离得到相关因子数据。将各类数据栅格化后统一整合为 30×30 像元的 TIF 类型数据,并设置与土地利用数据相同的投影坐标系(WGS_1984_UTM_Zone_50N)。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 InVEST 模型对不同土地利用类型的碳储量评估 全球气候系统的调节动力来自于地表生态系统吸收大气中二氧化碳所形成的碳循环过程。碳储量是指生物通过一系列生物化学反应将吸收的碳储能以碳化合物的形式保留在土地中形成碳储的数量。土地碳密度是指单位面积范围内土壤吸收与存储碳化合物的能力,是衡量碳储量的最重要指标[16]。

InVEST 模型中的 Carbon Storage and Sequestration 模块可以通过设置研究区土地利用类型的碳密度值,从而计算地区范围内的碳储量[17],见公式(1)和公式(2)。

$$C_i = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}$$
 (1)

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} A_i C_i$$
 (2)

式中: C_i 为各土地利用类型的碳密度(t/hm^2); C_{above} 为地上碳密度(t/hm^2); C_{below} 为地下碳密度(t/hm^2); C_{soil} 为土壤碳密度(t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机碳密度(t/hm^2)。

根据 ALAM 等^[18]研究认为,若从土地类型宏观角度去衡量该地区的碳密度阈值,需要综合考虑气候、温度、水文、生态等地理因素。本研究的土壤碳密度数据库的构建原则应为:(1)收集来自福建省实地调查试验获得的碳密度值和碳储量数据作为参考数据;(2)若缺少地类数据,且由于不同研究角度得到的碳密度数据存在较大差异,则以邻近省份和东南部沿海地区的文献数据作为参考^[19-23];(3)根据学者们提出的碳密度修正公式^[24-27][公式(3)~公式(9)],计算得到修正福建省地上碳密度、地下碳密度和土壤碳密度数据。碳密度修正公式为:

$$C_{\rm SP} = 3.396 \ 8 \times {\rm MAP} + 3 \ 996.1$$
 (3)

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{(0.005 \text{ 4} \times MAP)}$$
 (4)

$$C_{\rm BT} = 28 \times {\rm MAT} + 398$$
 (5)

$$K_{\rm BP} = \frac{C_{\rm BP}^1}{C_{\rm BP}^2} \tag{6}$$

$$K_{\rm BT} = \frac{C_{\rm BT}^1}{C_{\rm BT}^2} \tag{7}$$

$$K_{\rm B} = K_{\rm BP} K_{\rm BT} \tag{8}$$

$$K_{\rm S} = \frac{C_{\rm SP}^{1}}{C_{\rm SP}^{2}} \tag{9}$$

式中: MAP 为年平均降水量(mm); MAT 为年平均气温($^{\circ}$ C); C_{SP} 为修正土壤碳密度(t/hm²); C_{BP} 为修正生物量碳密度(t/hm²); C_{BT} 为参考年平均气温修正的生物量碳密度(t/hm²); K_{BP} 为参考年平均降雨量的生物量修正系数; K_{BT} 为参考年平均气温的生物量修正系数; C^1 为根据 2000—2020 年全国 MAP和 MAT 数据计算得到的系数; C^2 为根据 2000—2020年福建省 MAP和 MAT 数据计算得到的系数; K_B 为地上生物修正系数; K_S 为土壤碳密度修正系数。死亡有机物碳密度参考丁岳等[$^{\circ}$ Z]的研究数据,最终得到福建省不同土地利用类型的碳密度值(表 2)。

表 2 福建省各土地利用类型碳密度

Table 2 Carbon densities of different land use types in Fujian

Province t/hm²

土地利用类型	$C_{ m above}$	$C_{ m below}$	$C_{ m soil}$	$C_{ m dead}$
耕地	21.347 97	11.692 05	96.474 49	2.4
林地	40.985 05	6.820 65	141.955 80	3.4
草地	19.655 12	19.467 56	126.607 20	2.9
水体	0	0	91.508 79	0
建筑用地	0	0	82.800 00	0
未利用地	27.442 23	4.572 32	84.173 10	2.4

结合肖微^[9]在福建省云霄县和漳浦县实测计算的 2005 年、2010 年、2015 年碳储量数据与修正碳密度数据计算得到的同时期碳储量数据进行 Mann-Kendall 趋势检验,其 p 值通过 0.05 显著性检验。再结合巩晟萱等^[28] 和李俊等^[29] 将碳密度修正公式分别应用在京津冀地区和云南昆明均得到较为理想的成果,因此认为利用该方法构建的碳密度数据库可以满足本研究的需求。

1.3.2 基于 PLUS 模型的未来土地利用模拟 PLUS 模型是由中国地质大学(武汉)高性能空间计算智能实验室团队研发的,通过输入土地利用类型数据并结合用地扩张分析策略 LEAS,在多类型随机斑块种子的CA模型推动下来模拟未来土地利用变化的模型[30]。

该模型需要输入 2 个不同时期的土地利用数据,通过叠加分析获取演化过程中土地利用变化的动态元素,以栅格数据的形式来表示对应像元的变化,利用随机森林算法求解土地利用类型与潜在的驱动因子之间的相关性,建立可靠的数学模型来揭示变化规律,从而得到地类转换的潜在转移概率与发展趋势,根据参数生成对应的像元斑块[31]。

已有的研究^[32-33]表明,PLUS模型的演算结果能够合理地将各种地理空间要素与景观格局因素结合, 其演算结果具有高精度性、高准确性和高时效性的特 征,更好地符合预期结果和未来变化的趋势。

按照马尔科夫链(Markov Chain)预测未来土地 需求模块的年份界限的规则要求,3期土地利用数据 的年份均以10年为间隔。为评估模型模拟精度是否 满足本次研究需求,以福建省2010年和2020年土地 利用数据作为基础性研究,通过驱动因子数据作为变 量计算出 2010-2020 年期间研究区各土地利用类型 的转移概率,再以2010年的土地利用数据为基准图, 将前面计算的转移概率匹配到模型运算中得到 2020 年土地利用模拟数据。将模拟数据与现实同期的研究 区实际土地利用数据进行验证分析,总体精度为 0.909 2, Kappa 系数为 0.804, 表明模型预测的土地利 用变化情况有较高的可信度,能满足后续研究的需要。 1.3.3 土地利用情景模拟与阈值设置 基于福建省 未来规划纲要,打造武夷山生态屏障并加强生态廊道 的建设和推动产业升级对土地的需求,本研究设置3 种不同的情景发展模式。

(1)自然发展情景:该情景是其他情景模拟的基础,将水源作为研究区内的限制发展区域,延续2010—2020年土地利用变化规律,保持各土地利用类型之间的转换概率不变,以10年为间隔,运用马尔科夫链预测2030年福建省自然增长情景下的土地利用需求(图2)。该情景下耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的邻域因子分别为0.1929,0.6580,0.0680,0.0172,0.0612,0.0023。

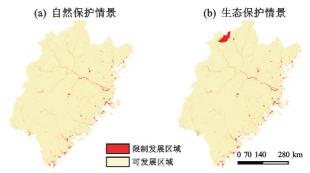


图 2 自然发展和生态保护情景下限制发展区域

2 Restricted development areas under natura

Fig. 2 Restricted development areas under natural development and ecological protection scenarios

(2)生态保护情景:该情景下,将水源和武夷山国家级自然保护区作为研究区内的限制发展区域,除建设用地外,其他地类均可转换为林地和草地,将林地、草地向建设用地的转移概率降低50%,耕地向建设用地的转移概率降低30%,同时将耕地、草地向林地的转移概率提高30%。以10年为间隔,在自然发展情景预测的基础上调整转移概率和各地类需求像元数据。该情景下耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的邻域因子分别为0.1920,0.6750,0.0619,0.0171,0.0516和0.0023。

(3)城镇发展情景:该情景下不设置任何限制发展

区,建设用地向林地、草地、水体和未利用地的土地利用转移概率降低 20%,耕地、林地、草地向建设用地转移概率提高 20%,以 10 年为间隔,在自然发展情景预测的基础上调整转移概率和各地类需求像元数据。

该情景下耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利 用地的邻域因子分别为 0.190 5,0.656 6,0.067 6, 0.017 1,0.065 6和 0.002 3。

土地利用类型转换弹性系数表示一种土地利用 类型转变为另一类型的困难程度,其范围为 0~1,值 越接近1代表转换成该类土地利用类型最困难,0则代 表转换成该类土地利用类型最容易[34]。针对 3 种不 同发展情景,模型中 LEAS 的转移矩阵系数见表 3。

表 3 不同情景下土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transfer matrix under different scenarios

项目	自然发展情景							生态保护情景					城镇发展情景					
	Α	В	С	D	Е	F	Α	В	С	D	Е	F	A	В	С	D	Е	F
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
В	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
C	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
D	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
E	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
F	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

注: A 为耕地; B 为林地; C 为草地; D 为水体; E 为建设用地; F 为未利用地。

2 结果与分析

2.1 福建省土地利用时空变化

根据福建省 2000—2020 年和通过 PLUS 模型模拟得到 2030 年自然变化情景、生态保护情景和城镇发展情景的土地利用分布图(图 3、图 4)及土地利用类型面积与占比表(表 4)。福建省土地利用类型按面积从大到小依次为林地、耕地、草地、建设用地、水体和未利用地;2000—2020 年福建省主要土地类型为林地,集中分布于丘陵地带,经过多年发展虽然面

积持续减少,但仍能保持 66.82%以上占比;耕地和草地占总面积的 19.61%和 6.91%,2 种土地利用类型总体上均以斑块状零散分布,斑块之间连通性较好,破碎化程度低,其中耕地呈现出沿海岸带平原地区和中西部山地低海拔地区的聚集性特征;建设用地在2010—2020 年期间快速扩张,增幅达 1.70%,其扩张集中于福州、厦门、泉州和漳州;水体占比约 1.50%,主要集中于闽江、九龙江、汀江、晋江和沿海地区,该结果与前人[35]对福建省土地利用时空变化的研究结论相似。

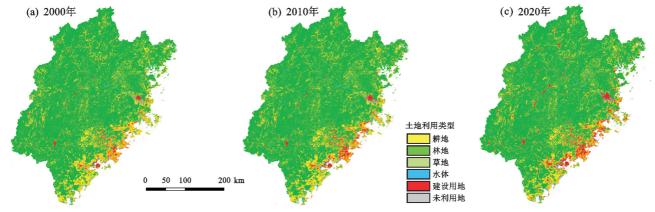


图 3 2000-2020 年研究区土地利用变化

Fig. 3 Land use map of the study area from 2000 to 2020

由于 2030 年自然变化情景下的各土地利用类型 变化趋势与 2010—2020 年一致,耕地减少 444.03 km²,林地减少 822.55 km²,草地减少 377.77 km²,建设用地增加 1 575.93 km²,建筑用地的扩张因地区差异出现不同,东南部沿海城市的建筑用地扩张主要来源于耕地和草地,而中部、西部、东北部地区的建筑用地扩张主要来源于林地;2030 年生态保护情景下,耕地减少 569.06 km²,林地增加 1 078.32 km²,草地减

少841.23 km²,建设用地增加349.72 km²,该情景下大量的耕地和草地转化为林地,其中草地的减少面积是自然发展情景下的1.90 倍。2030 年城镇发展情景下,耕地减少737.73 km²,林地减少992.94 km²,草地减少438.17 km²,建设用地增加2115.37 km²,与自然变化情景相比,福建省西部的南平市、三明市和龙岩市的林地向建设用地转化率大大提高,其建设用地扩张程度是自然变化情景下的1.30 倍。

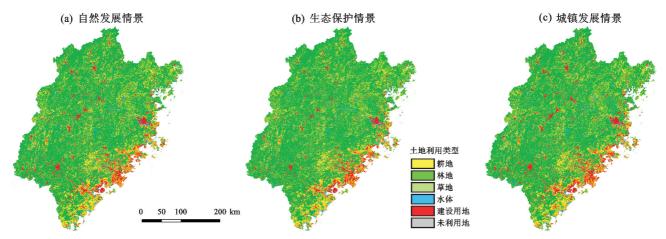


图 4 3 种情景下 2030 年研究区土地利用变化

Fig. 4 Land use map of the study area in 2030 under three scenarios 表 4 2000-2030 年福建省土地利用类型面积与占比

Table 4 Area and proportion of land use types in Fujian Province from 2000 to 2030

土地利用	2000年		2010年		2020年		2030年自然发展情景 2030年生态保护情景 2030年城镇发					真发展情景
类型	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
耕地	25421.47	20.62	24932.02	20.21	24240.62	19.61	23796.59	19.25	23671.56	19.15	23502.89	19.01
林地	83566.23	67.78	83425.05	67.63	82598.12	66.82	81775.57	66.16	83676.44	67.70	81605.18	66.02
草地	8966.60	7.27	9071.96	7.35	8418.00	6.81	8040.30	6.50	7576.77	6.13	7979.83	6.46
水体	1629.43	1.32	1669.31	1.35	1992.29	1.61	2124.07	1.72	2039.31	1.65	2111.46	1.71
建设用地	3340.98	2.71	3917.14	3.18	6008.14	4.86	7584.07	6.14	6357.86	5.14	8123.51	6.57
未利用地	373.18	0.30	343.84	0.28	348.36	0.28	284.93	0.23	283.59	0.23	282.64	0.23

2.2 福建省土地利用变化对碳储量的影响

研究区 2000 年、2010 年和 2020 年的 3 期碳储量数据和 3 种不同的情景发展模拟碳储量数据见图 5 和图 6。

福建省的碳储量总体较高,空间分布呈现"沿海低,内陆高"的特征,虽然空间变化数值较大,但时空变化程度相对较小,呈现斑块状分布。碳储量高值域

地区集中分布于中西部山地和丘陵,该地主要土地利 用类型为林地且植被覆盖率较高;碳储量中值域地区 主要位于城市郊区和山地/丘陵和水源区附近,其主 要土地利用类型为耕地和草地;碳储量低值域地区以 集中式分布于沿海岸带城市群地区和中西部城镇地 区,以河流和湖泊为脉络,通过城市中心呈线状扩散 分布,其土地利用类型主要为建设用地和水体。

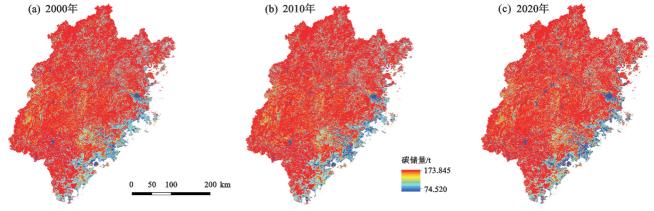


图 5 2000-2020 年研究区碳储量空间分布

Fig. 5 $\,$ Spatial distribution map of carbon storage in the study area from 2000 to 2020

通过分析 2000-2030 年福建省土地利用类型的 碳储量数据(表 5)表明,福建省 2000-2020 年碳储量共减少约 1.83×10^7 t,降幅达 0.85%,平均每年下降约 9.17×10^5 t。其中,2010-2020 年碳储量下降幅度最大,10年间共减少 1.57×10^7 t,占总降幅的

85.00%。在 2030 年自然发展情景下,对比 2020 年碳储量共减少 1.45×10^7 t,降幅达 0.68%。在 2030 年生态保护情景下,对比 2020 年碳储量共增加 1.59×10^7 t,增幅达 0.75%。在 2030 年城镇扩张情景下,对比 2020 年碳储量共减少 1.97×10^7 t,降幅达 0.92%。

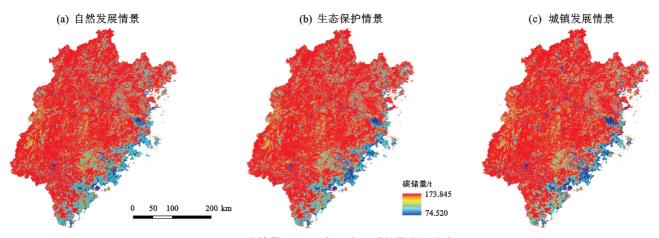


图 6 3 种情景下 2030 年研究区碳储量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution map of carbon storage in the study area in 2030 under three scenarios

表 5 2000-2030 年福建省土地利用类型的碳储量

Table 5 Carbon storage by land use type in Fujian Province from 2000 to 2030

 $10^7 t$

土地利用类型	2000年	2010年	2020年	2030年自然发展情景	景 2030 年生态保护情景	是 2030 年城镇发展情景
耕地	33.53	32.89	31.98	31.39	31.23	31.00
林地	161.42	161.15	159.55	157.96	161.63	157.63
草地	15.12	15.30	14.20	13.56	12.78	13.46
水体	1.49	1.53	1.82	1.94	1.87	1.93
建设用地	2.77	3.24	4.97	6.28	5.26	6.73
未利用地	0.44	0.41	0.41	0.34	0.34	0.34
总储量	214.77	214.51	212.93	211.46	213.10	211.08

2.3 林地的历史演替与变化预测

结合分析可知,林地的演替是研究碳储量变化的重要线索,将2000—2020年期间林地的地类变化趋势进行单独分析,其趋势变化见图7。从图7可以看出,总体上林地的变化程度不大,但呈现出"小区域破碎化"和"大区域集中化"特征。2000—2010年期间,林地减少范围主要集中在龙岩市附近,而扩张范围主要出现在东部沿海地区,其余大部分地区仅有极小范围的变化,在地图上以"斑点"的形式存在;2010—2020年期间,林地减少的趋势比上一阶段更为明显,减少范围主要集中在城镇中心、道路和河流附近,东部沿海地区林地扩张的趋势也有所减缓,而龙岩市附近却出现大面积的林地扩张。

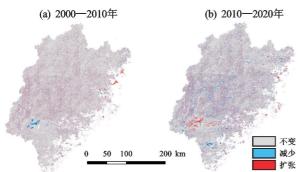


图 7 2000-2020 年研究区林地演替情况

Fig. 7 Forestland succession in the study area from 2000 to 2020

将过去 20 年林地演替的趋势融入到 PLUS 土地利用模型中,仅设置不同的模拟阈值,其余参数以 2030 年自然发展情景为标准,模拟 100 次后将结果通过栅格计算复合叠加分析,从中找出模拟过程中林地演替最为频繁的栅格像元(图 8)。

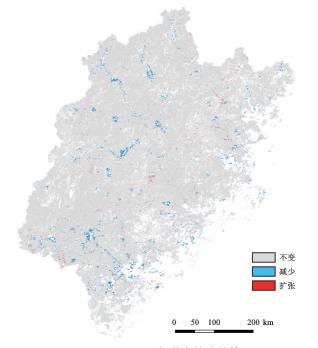


图 8 2020-2030 年潜在的演替情况

Fig. 8 Potential succession scenarios from 2020 to 2030

模拟情况下,林地减少的趋势更为突出,潜在减少区域普遍集中于南平、三明和龙岩市县周边地区,潜在扩张区域集中在河流、湖泊和水库沿岸地区。

2.4 碳储量时空变化评估分析

结合研究区各土地利用类型碳密度表可得知, InVEST 模型在碳储量的实际计算与模拟过程中的 主导因素是各土地利用类型变化与转移。在2000-2010年期间,福建省碳储量下降的主导因素是大量 的耕地转化为建设用地,此过程净损失的碳储量约 0.20×10^7 t,占 2000—2010 年期间损失碳储量的 76.90%。在 2010—2020 年期间,耕地转化为建设用 地的程度逐渐加强,其转化程度是 2000-2010 年的 2.3 倍, 损失的碳储量约 0.66×10⁷ t, 占 2010—2020 年期间减少碳储量的 42.00%,同时大量的林地和草 地也被转化为建设用地,其中林地向建设用地过程中 净损失的碳储量约 0.39×107 t,占 2010—2020 年期 间损失碳储量的24.80%(图9)。此外,中西部丘陵 地区的林地开垦为耕地也是碳储量损失的重要因素, 损失约 0.33×10⁷ t。综上所述,2000—2020 年间福 建省的城市发展、乡村建设和新耕地的开垦是导致全 省碳储量下降的主导因素。

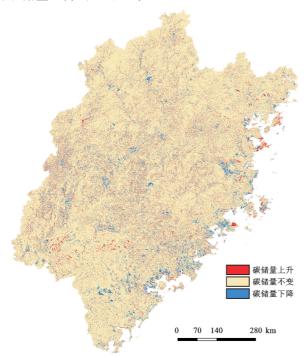


图 9 2000-2020 年研究区碳储量空间变化

Fig. 9 Spatial change map of carbon storage in the study area from 2000 to 2020

基于 2010—2020 年土地利用和碳储量变化的规律,作为评估 2030 年 3 种不同情景下碳储量变化的思路。在 2030 年自然发展的情景下,碳储量与 2020 年相比损失 1.47×10⁷ t。大量的林地被转移为建设用地,转移过程碳储量的净损失量约为 1.41×10⁷ t,

几乎是该情景下最主要的碳储量净损失来源。占 95.80%。少量的耕地转变为林地,是该情景下碳储 量增长的最主要来源,净增长约为 0.10×10⁷ t。在 2030年生态保护的发展情景下,由于严格的生态保 护限制,此情景下福建省碳储量出现上升趋势,与 2020年相比增加 0.17×10⁷ t。在模拟的过程中出现 大量耕地向林地转化以及草地向林地转化,两者的转 化提供0.33×107 t 的净增长量。同时建设用地的扩 张得到大幅度限制,扩张幅度仅为5.82%,仅为现实 中 2010—2020 年期间扩张幅度的 10.90%,建筑用地 转化来源为草地和少量林地,该过程净损失的碳储量 为 0.20×10⁷ t。在 2030 年城镇发展情景中,与 2020 年相比损失 1.85×107 t,该情景下建设用地的扩张幅 度是 2030 年自然发展情景下的 1.34 倍,超大面积的 林地被改造为建设用地,造成的碳储量净损失量高达 1.80×10⁷ t。此外,模拟过程中出现更大程度退耕还 林的现象,耕地的净转移量达 465.08 km²,转化为林 地后补充的碳储量为 0.22×10⁷ t。

对模拟 100 次的 2030 年自然发展情景的碳储量 计算结果通过栅格计算复合叠加分析,从中找出模拟 过程中碳储量变化最为频繁的栅格像元(图 10)。总 体上变化趋势仍以下降为主,潜在的减少区域与林地 潜在减少的范围相对一致,而潜在的上升区域依然围 绕着龙岩市周边地区和沿海地区零散地带进行展开, 这与造林、还林和海岸带生态屏障建设等之类的政策 行动存在一定的相关性。

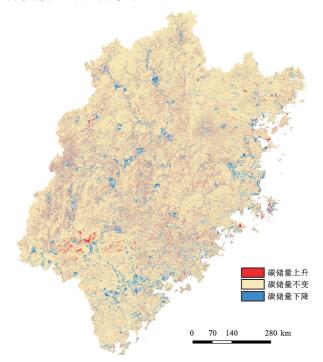


图 10 2020—2030 年潜在的碳储量空间变化 Potential spatial changes in carbon storage from

Fig. 10 Potential spatial changes in carbon storage from 2020 to 2030

3 讨论

3.1 土地利用与碳储量估算影响分析

一般认为,土地利用变化的区域与地表碳储量变 化热点区域存在空间相关性[36]。福建省的碳储量在 2000-2020 年总体变化为下降趋势,2000-2010 年 碳储量总体下降幅度较小,而在2010-2020年碳储 量急剧下降,大量的耕地和林地被转为建筑用地,使 得城镇和乡村的生产和发展得到保障,从而促进福建 省在这10年间经济高速增长,其中碳储量流失严重 区与城市化扩张区域高度吻合。例如,福州市和厦门 市,其城市核心区周边地带原有的耕地被大面积改造 为建设用地[37-38],因此该区域正是碳储量流失严重 区。福建省中西部地区林地比例较高,"耕地一林 地一草地"的比例处于合理的水平[39],土地总体固碳 能力强,是福建省最大的碳库。最重要的是福建省建 设用地在20年间扩张1.79倍的情况下,其碳储量依 旧保持着较低的降幅,既保证社会发展的同时,也保 障生态文明,从总体上说明政府过去的生态理念和治 理方式是先进且合理的[40]。然而将结果放眼到全国 角度,与同样方法评估的安徽省[19]和京津冀地区[28] 进行同期对比,在相对土地面积更小的前提下,福建 省的碳储量流失是安徽省的1.11倍,更是京津冀地 区的 3.23 倍。即便是地区之间土壤碳密度实质含量 和评估方法存在一定差异,但流失的总量相对较高, 对现有的方针政策而言是一次预警信号。

3.2 未来规划与建议

从未来情景模拟情况上看,福建省生态系统碳储量依然保持持续下降的趋势,自然发展情景下碳储量持续下降,城镇发展情景下碳储量的降幅更大,生态保护情景下碳储量才有上涨的空间。

需要注意的是,3 种情景下的模拟都出现为了弥补林地的损失,模型将大量的草地转移为林地,不能有效控制草地面积的减少,这是对现有草地类型的微量变化的综合反映[41]。但从长远来看,草地面积的减少影响区域景观格局多样性,并加剧破碎化程度。根据学者们[8.42]的研究结果认为,合理改造福建省林地树种的组成,扩充优势树种和针阔混交林的种植,从根本上提高林地碳密度才是提高福建省碳储量的有效方法。关键问题的是如何推进土地集约化利用,增强建设用地的社会经济效益,在根源上解决土地在发展与生态保护之间的矛盾,这是新型城镇化的必要手段,也是生态文明建设的根本之策[43]。在2030年实现碳达峰后,生态保护情景应优先考虑并作为未来实现碳中和目标的必由之路,该情景能大幅有效扩张林地面积,增强林地碳储量,从而逆转碳储量下降的趋势。

3.3 结果评估与不确定性分析

王义祥等^[44]在 2005 年对福建省第二次土壤普查数据中对土壤有机碳储量和碳密度进行估算,全省土壤有机碳总量约为 157.566×10⁷ t; KIMBLE 等^[45]研究认为,全球土壤有机碳储量与无机碳储量比例约为 2.1:1.0。综合上述研究成果计算得到的碳储量与本研究的结果具有可比性。

在利用 PLUS 模型模拟土地利用变化的过程中,涉及复杂气候因素、社会政策的变动和动态经济政策的转变都无法做到有效的模拟,使得模拟结果缺乏时效性[46-47]。InVEST 模型的碳密度数值是基于前人实测数据和年降水量数值模型修正得到的静态数据,未能考虑到环境变化和人类活动对地表碳密度的动态影响,从而造成误差。由于福建省位于东南沿海地区,受 ENSO 事件的影响比内陆省份更强[48],目前已有研究[49-51]表明,极端高温和极端降水都提高土壤有机碳的损失效率,从而降低土壤低密度。因此,后续的研究需要尝试将动态不确定因素转化为数据,综合贯彻到模拟演算的过程中才能有效提高模拟的准确性。

4 结论

(1)2000—2020 年福建省碳储量呈现逐年降低的趋势,由 214.77×10⁷ t下降到 212.93×10⁷ t,减少1.84×10⁷ t。与其他地区相比,福建省碳损失量相对显著。其中,林地和耕地是福建省主要碳储库,占比约为全省总量的 90.0%,而林地的占比更是总量的75.0%,全省碳储量下降的主要原因是大面积的林地和耕地被改造为建设用地。

(2)福建省碳储量的空间分布存在分异性特征。 过去20年,以福州、泉州和厦门为核心的东南沿海城 市群既是碳储量低阈值区域,也是最大的碳储量流失 区;以龙岩、三明和南平为代表的中西部丘陵地区是 碳储量高阈值区域,但区域碳储量变化幅度不大。

(3)模拟得到的 2020—2030 年福建省在自然发展情景、生态保护情景和城镇发展情景下碳储量分别为 211.46×10⁷,213.10×10⁷,211.08×10⁷ t,与 2020年对比分别减少 1.47×10⁷ t,增加 0.17×10⁷ t,减少 1.85×10⁷ t。在自然发展情景下,中西部丘陵地区的碳储量变化幅度比以往更为剧烈,总体上呈下降趋势;东南部沿海城市群的碳储量下降趋势得到一定程度的缓解。以严格的林地保护为核心的生态保护情景是逆转碳储量下降的唯一情景,但该情景下需要额外关注草地的缩减。在增加碳储方面,生态保护情景是福建省未来需要重点考虑的,该情景下的模拟对后续土地政策和碳政策的制定具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 刘菁华,李伟峰,周伟奇,等.权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析 [J].生态学报,2018,38(12):4341-4350.
 - LIU J H, LI W F, ZHOU W Q, et al. Scenario simulation balancing multiple objectives for optimal land use allocation of the Beijing-Tianjin-Hebei megaregion [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12); 4341-4350.
- [2] 张杰,周寅康,李仁强,等.土地利用/覆盖变化空间直观模拟精度检验与不确定性分析:以北京都市区为例[J].中国科学(D辑:地球科学),2009,39(11):1560-1569. ZHANG J, ZHOU Y K, LI R Q, et al. Accuracy assessdments and uncertainty analysis of spatially explicit modeling for land use/cover change and urbanization: A case in Beijing metropolitan area[J]. Science in China Series D: Earth Science,2009,39(11):1560-1569.
- [3] 2030 年前碳达峰行动方案[N]. 人民日报,2021-10-27 (7).

 Action plan for carbon peak before 2030[N]. People's Daily,2021-10-27(7).
- [4] NELSON E, SANDER H, HAWTHORNE P, et al. Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models[J].PLoS One,2010,5(12):e14327.
- [5] LYU R F, MI L N, ZHANG J M, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model[J]. Ecological Research, 2019, 34(3); 380-393.
- [6] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367. HUANG C H, YANG J, ZHANG W J. Development of ecosystem services evaluation models: Research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [7] LI X A, FU J Y, JIANG D, et al. Land use optimization in Ningbo City with a coupled GA and PLUS model [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 375:e134004.
- [8] LIYH, YAOS, JIANGHZ, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage: An integrated framework based on the MOP-PLUS-InVEST model and an applied case study in Hangzhou, East China[J].Land, 2022, 11(12): e2213.
- [9] 肖微.基于 InVEST 模型的闽东南地区生态系统服务功能评估:以古雷石化基地水源地为例[D].福州:福建师范大学,2019.
 - XIAO W. Evaluation of ecosystem service in southeastern Fujian based on InVEST model: A case study of water source of Gulei petrochencical base[D]. Fuzhou: Fujian Normal Universty, 2019.
- [10] 黄康,戴文远,黄万里,等.基于 CA-Markov 和 InVEST

- 模型的土地利用变化对生境影响评价:以福建省福州新区为例[J].水土保持通报,2019,39(6):155-162.
- HUANG K, DAI W Y, HUANG W L, et al. Impacts of land use change evaluation on habitat quality based on CA-Markov and InVEST models: Taking Fuzhou New District of Fujian Province as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6):155-162.
- [11] 刘智方,唐立娜,邱全毅,等.基于土地利用变化的福建 省生境质量时空变化研究[J].生态学报,2017,37(13): 4538-4548.
 - LIU Z F, TANG L N, QIU Q Y, et al. Temporal and spatial changes in habitat quality based on land-use change in Fujian Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(13):4538-4548.
- [12] 福建省统计局.2022 福建统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022.
 Fujian Bureau of Statistics. 2022 Fujian statistical year-

book[M].Beijing: China Statistics Press, 2022.

- [13] 曲胜秋,刘艳芳,银超慧,等.1990—2015 年福建省耕地变化的空间格局分析[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(4):587-598.
 - QU S Q, LIU Y F, YIN C H, et al. Spatial pattern of cultivated land change in Fujian Province from 1990 to 2015 [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020-28 (4):587-598.
- [14] 邢世和,毛艳铃,周碧青,等.福建省农用地资源评价及 其利用保护对策[J].福建农业大学学报,2000,29(3): 356-362.
 - XING S H, MAO Y L, ZHOU B Q, et al. Evaluation and utilization-protection measures of agricultural land resource in Fujian Province[J]. Journal of Fujian Agricultural University, 2000, 29(3):356-362.
- [15] JUN C, BAN Y F, LI S N. Open access to Earth land-cover map[J]. Nature, 2014, 514 (7523): e434.
- [16] 黄卉.基于 InVEST 模型的土地利用变化与碳储量研究 [D].北京:中国地质大学,2015.
 HUANG H.Research on land use/land cover change and carbon storage based on InVEST model [D]. Beijing: China University of Geosciences,2015.
- [17] HE Y L, MA J M, ZHANG C S, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Guilin based on FLUS and InVEST models [J]. Remote Sensing, 2023, 15(5); e1445.
- [18] ALAM S A, STARR M, CLARK B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study[J].Journal of Arid Environments, 2013, 89:67-76.
- [19] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
 - SUN F H, FANG F M, HONG W L, et al. Evolution

- analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1):151-158.
- [20] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等.江苏省土地利用变化对陆地 生态系统碳储量的影响[J].资源科学,2011,33(10): 1932-1939.
 - CHUAI X W, HUANG X J, ZHENG Z Q, et al. Land use change and its influence on carbon storage of terrestrial ecosystems in Jiangsu Province[J]. Resources Science, 2011, 33(10):1932—1939.
- [21] 周杰,张学儒,牟凤云,等.基于 CA-Markov 的土壤有机 碳储量空间格局重建研究:以泛长三角地区为例[J].长 江流域资源与环境,2018,27(7):1565-1575.

 ZHOU J, ZHANG X R, MOU F Y, et al. Spatial pattern reconstruction of soil organic carbon storage based on CA-Maikov: A case study in Pan-Yangtze river delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,
- [22] 程先富,谢勇.基于 GIS 的安徽省土壤有机碳密度的空间分布特征[J].地理科学,2009,29(4);540-544.
 CHENG X F, XIE Y. Spatial distribution of soil organic carbon density in Anhui Province based on GIS[J]. Scientia Geographica Sinica,2009,29(4);540-544.

2018,27(7):1565-1575.

- [23] 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预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.

 LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the In-VEST-PLUS model: A case study in Guangdong[J].China Environmental Science,022,42(10):4827-4839.
- [24] 代杰瑞,庞绪贵,曾宪东,等.山东省土壤有机碳密度的空间分布特征及其影响因素[J].环境科学研究,2015,28 (9):1449-1458.

 DAI J R, PANG X G, ZENG X D, et al. Soil carbon density and distribution and influencing factors in Shan
 - density and distribution and influencing factors in Shandong Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2015,28(9):1449-1458.
- [25] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].土壤学报,2004,41(1):35-43.

 XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J].Acta Pedologica Sinica,2004,41(1):35-43.
- [26] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国 未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带 地理,2019,39(3):397-409. LIU X J, LI X, LIANG X, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model[J]. Tropical Geography, 2019, 39 (3)397-409.
- [27] 丁岳,王柳柱,桂峰,等.基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J].环境科学,2023,44

- (6):3343-3352.
- DING Y, WANG L Z, GUI F, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou bay area based on InVEST and PLUS models[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3343-3352.
- [28] 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.
 - KONG C X, ZHANG Y H, LI Y H. 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.
- [29] 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 J, YANG H D, WU Z F, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in
 - 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.
- [30] LIANG X, GUAN Q F, 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:e101569.
- [31] LIANG X, LIU X P, LI D, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2018, 32 (11):2294-2316.
- [32] ZHANG J B, ZHU H R, ZHANG P Y, et al. Construction of GI network based on MSPA and PLUS model in the main urban area of Zhengzhou: A case study [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:e878656.
- [33] LIN X F, FU H. Spatial-temporal evolution and driving forces of cultivated land based on the PLUS model: A case study of Haikou City, 1980—2020[J].Sustainability, 2022, 14(21):e14284.
- [34] 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.

 WANG B S, LIAO J F, ZHU W, et al. The weight of nerghborhood setting of the FLUS model based on a historieal scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12):4284-4298.
- [35] 李胜鹏,柳建玲,林津,等.基于1980—2018年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J].应用生态学报,

- 2020,31(12):4080-4090.
- LIS P, LIU J L, LIN J, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31 (12): 4084-4090.
- [36] 唐睿,彭开丽.土地利用变化对区域陆地碳储量的影响研究综述[J].江苏农业科学,2018,46(19):5-11. TANG R, PENG K L. Impact of land use change on regional land carbon storage: A review[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(19):5-11.
- [37] 刘孝富,舒俭民,张林波.最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用:以厦门为例[J].生态学报,2010,30(2):421-428.

 LIU X F, SHU J M, ZHANG L B. Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: As an example of Xiamen City[J].Acta Ecologica Sinica,2010,30(2):421-428.
- [38] 黄一绥.福州市环境与经济协调发展度评价与分析[J]. 环境科学与管理,2008,33(12):44-47.
 HUANG Y S. Assessment and analysis on the harmony development degree between environment and economy in Fuzhou City[J]. Environmental Science and Management, 2008,33(12):44-47.
- [39] 姚成胜,朱鹤健,吕晞,等.土地利用变化的社会经济驱动因子对福建生态系统服务价值的影响[J].自然资源学报,2009,24(2):225-233.
 YAO C S, ZHU H J, LV X, et al. Study on the impact of socio-economic driving factors of land use change on the ecosystem service values in Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources,2009,24(2):225-233.
- [40] 王印红,李萌竹.地方政府生态环境治理注意力研究:基于 30 个省市政府工作报告(2006—2015)文本分析[J]. 中国人口・资源与环境,2017,27(2):28-35. WANG Y H, LI M Z. Study on local government attention of ecological environment governance[J]. China Population, Resources and Environment,2017,27(2):28-35.
- [41] 邹亚荣,张增祥,周全斌,等.遥感与 GIS 支持下近十年中国草地变化空间格局分析[J].遥感学报,2003,7(5):428-432.

 ZOU Y R, ZHANG Z X, ZHOU Q B, et al. Spatial pattern and its analysis of China's grassland change in recent ten years using remote sensing and GIS [J].

 Journal of Remote Sensing,2003,7(5):428-432.
- [42] 王艳霞.福建主要人工林生态系统碳贮量研究[D].福州:福建农林大学,2010. WANG Y X. Carbon storage in main plantation ecosys-

- tems, Fujian Province[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [43] 李学明.城市土地节约集约利用理论与实践研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.

 LI X M. Researches on the theory and practice of urban land intensification[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2010.
- [44] 王义祥,翁伯琦.福建省土壤有机碳密度和储量的估算 [J].福建农业学报,2005,20(1):42-45. WANG YX, WENG BQ. Estimate of soil organic carbon density and its stock in Fujian Province[J].Fujian Journal of Agricultural Sciences,2005,20(1):42-45.
- [45] KIMBLE J M, LEVINE E R. The Nairobi Conference: Topics, results, and research needs[A]. Trans 15th World Conf Soil Sci[C]. Acapulco, Mexico, 1994:151-162.
- [46] ZHANG S H, ZHONG Q L, CHENG D L, et al. Land-scape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region [J]. Ecological Indicators, 2022, 136:e108642.
- [47] XU L F, LIU X A, TONG D, et al. Forecasting urban land use change based on cellular automata and the PLUS Model[J].Land,2022,11(5):e652.
- [48] 陈文,兰晓青,王林,等.ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响[J].科学通报,2013,58(8):634-641. CHEN W, LAN X Q, WANG L, et al. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Science Bulletin,2013,58(8):634-641.
- [49] ZHOU J G, ZHANG J F, LAMBERS H, et al. Intensified rainfall in the wet season alters the microbial contribution to soil carbon storage[J]. Plant and Soil, 2022, 476(1):337-351.
- [50] 苏永中,赵哈林.土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J].中国沙漠,2002,22(3):220-228.
 SU Y Z, ZHAO H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J].Journal of Desert Research,2002,22 (3):220-228.
- [51] 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 等. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 888-894.
 - WEI Y Y, YIN H J, LIU Q, et al. Advance in research of forest carbon cycling under climate warming [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009, 15 (6):888-894.