

耦合 InVEST 与 FLUS 模型的海南岛生态系统 碳储量时空演变与预测

方赞山¹, 钟才荣¹, 王凤霞², 程成¹, 吕晓波¹, 陈旭¹

[1.海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院) 海南 海口 571100; 2.海南大学 海南 海口 570228]

摘要: [目的] 通过研究海南岛城市化扩张下土地利用变化对碳储量的影响,揭示碳储量时空格局演变和预测未来发展趋势,为优化国土空间布局 and 生态敏感区的保护提供科学依据。[方法] 基于 1980—2020 年土地利用数据,采用 InVEST 模型碳储量模块反演 1980—2020 年海南岛碳储量时空变化,并耦合 FLUS 模型和 InVEST 模型模拟自然发展情景、快速发展情景和生态保护情景 3 种发展情景下 2030 年海南岛的土地利用和碳储量变化情况。[结果] ①海南岛土地利用类型以林地、耕地为主。1980—2020 年耕地、草地、林地和未利用地面积均有不同程度减少。建设用地和水域面积增加,尤以建设用地面积增长最快,增幅为 83.4%。②海南岛碳储量总体呈“中间高,四周低”的特点,1980—2000 年碳储量变化较小,降幅约 0.03%。2000—2020 年海南岛城镇化进程加快,碳储量损失也随之加剧,年均损失约 372 t,累计损失碳储量 7 439 t。③未来建设用地仍会继续扩张,受此影响 3 个情景下 2030 年海南岛碳储量均呈现降低的趋势。其中,快速发展情景下建设用地土地利用变化量最大,碳储量最易流失,自然发展情景次之,生态保护情景变化最小。[结论] 在海南自由贸易港未来的土地利用规划中,应加强中部山区、自然保护地等重点生态区位的保护力度,优化土地利用格局,严格控制林地、耕地和湿地向建设用地转变,提高固碳增汇效能,实现区域可持续发展。

关键词: 碳储量; 土地利用变化; InVEST 模型; FLUS 模型; 海南岛

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0320-10

中图分类号: F301.2, X87

文献参数: 方赞山, 钟才荣, 王凤霞, 等. 耦合 InVEST 与 FLUS 模型的海南岛生态系统碳储量时空演变与预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 320-329. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.038; Fang Zanshan, Zhong Cairong, Wang Fengxia, et al. Spatial-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon storage on Hainan Island by coupling InVEST and FLUS models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 320-329.

Spatial-temporal Evolution and Prediction of Ecosystem Carbon Storage on Hainan Island by Coupling InVEST and FLUS Models

Fang Zanshan¹, Zhong Cairong¹, Wang Fengxia², Cheng Cheng¹, Lü Xiaobo¹, Chen Xu¹

(1. Hainan Academy of Forestry/Hainan Academy of Mangrove, Haikou,

Hainan 571100, China; 2. Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: [Objective] The influence of land use changes on carbon storage were studied under the expansion of urbanization in Hainan Island to reveal the spatial-temporal evolution pattern of carbon storage and to predict future development trends in order to provide scientific evidence for optimizing the spatial layout of the national territory and for protecting ecologically sensitive areas. [Methods] Based on land use data from 1980 to 2020, this research showed the spatial-temporal changes of carbon storage for Hainan Island. The data were used with the carbon storage module of the InVEST model. The FLUS model and the InVEST model were coupled to simulate land use and carbon storage changes for Hainan Island in 2030 under three scenarios: the natural development scenario, the rapid development scenario, and the ecological protection scenario.

收稿日期: 2023-06-08

修回日期: 2023-07-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于多源空间信息的海南红树林物种分布影响机制”(42261064); 海南省省属科研院所技术创新专项“红树植物莲叶桐种苗繁育技术研究”(KYYS-2021-22)

第一作者: 方赞山(1989—), 男(汉族), 海南省屯昌县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事湿地生态研究。Email: shan67886251@qq.com.

通信作者: 钟才荣(1976—), 男(汉族), 海南省海口市人, 本科, 高级工程师, 主要从事红树植物保育与生态修复研究。Email: crzhong169@163.com.

[Results] ① The main types of land use on Hainan Island were forest land and cultivated land. From 1980 to 2020, the areas of cultivated land, grassland, forest land, and unused land decreased to varying degrees. The area of construction land and water increased over that time period, with the fastest growth rate being 83.4% for construction land. ② Carbon storage for Hainan Island was generally characterized as “higher in the middle and lower in the surrounding areas”. Carbon storage changed slightly from 1980 to 2000, with a decrease of about 0.03%. From 2000 to 2020, the urbanization process on Hainan Island accelerated, and the loss of carbon storage also increased. The average annual loss was about 372 t, and the cumulative loss of carbon storage was 7 439 t. ③ The prediction results showed that construction land will continue to expand in the future, and carbon storage on Hainan Island in 2030 will decrease under the three scenarios. Under the rapid development scenario, the land use change of construction land was the largest, and carbon storage was the most vulnerable to loss, followed by the natural development scenario. The ecological protection scenario had the smallest change. [Conclusion] Land Use Planning for Hainan Free Trade Port in the future should focus on the protecting key ecological areas such as the central mountainous areas, strengthening the nature reserves of Hainan Island, optimizing the land use pattern, and strictly controlling the transformation of forest land, cultivated land, and wetlands into construction land. The efficiency of carbon sequestration should be improved, and forest carbon sinks should be increased to achieve regional sustainable development.

Keywords: carbon stocks; land use change; InVEST model; FLUS model; Hainan Island

全球气候变暖是当今人类面临的重大挑战之一。陆地生态系统碳储量是全球碳循环中的重要组成部分,在降低温室效应和减碳增汇方面发挥着举足轻重的作用^[1-3]。土地利用变化对陆地生态系统碳储量和碳循环变化影响深远^[4-5],通过改变生态系统结构和功能,影响地表植被和土壤的固碳能力,进而影响区域乃至全球碳平衡^[6-7]。科学合理的土地开发利用,可重新固定约 60%~70% 已流失的碳^[3]。可见,提升生态系统碳汇能力是实现“双碳”目标重要途径之一。对此,中共中央、国务院 2021 年 9 月 22 日发布的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》对碳达峰碳中和进行系统谋划和部署,指出了强化国土空间规划和用途管控,严守生态保护红线,严控生态空间占用,稳定现有森林、草原、湿地、海洋、土壤、冻土、岩溶等固碳作用,提升生态系统碳汇增量^[8]。2022 年 8 月 9 日,海南省人民政府关于印发《海南省碳达峰实施方案》,提出开展耕地质量提升和国土空间绿化行动,着力提升土壤有机碳储量和森林碳储量^[9],协调推动能源、产业、交通与城乡建设四大领域节能降碳。从中央到地方就推动如期实现碳达峰制定了实践路径。

在气候变化和“双碳”背景之下,碳储量方面研究引起了越来越多学者的关注,并且开展了大量研究工作^[10]。传统的研究方法包括生物量法、箱式法等^[11],这些基于实地调查的碳储量估算显然更加可信和可靠^[12],但也存在实施效率低,仪器设备成本高,研究范围窄等缺点^[13]。随着 GIS 技术的发展,越来越多的学者通过模型评估碳储量的变化。目前

在陆地生态系统碳储量研究方面应用较为广泛的模型有 CBMCFSS^[14]、CEVSA^[1]、BIOME-BGC 等^[15]。相比之下,生态系统服务和交易的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)具有通用性强,操作简单,需要的参数少,运行速度快等优点^[11],并且可反映长时序和大尺度的土地利用变化与碳储量之间的关系,目前广泛运用于不同国家和地区^[16-17]。部分学者将其与 PLUS^[18-19]、FLUS^[20]、CA-Markov 等^[10-11]模型相结合,对特定区域内未来碳储量的变化趋势进行预测。FLUS 模型(future land use simulation model)是源自元胞自动机(cellular automata, CA)并在此基础之上做了一定改进,用于模拟人类活动与自然影响下的未来多种土地利用变化的模型,具有较高的模拟精度,在地理空间模拟、土地利用优化、辅助决策制定等方面有广泛应用空间^[21-22]。目前在不同尺度土地利用变化与碳储量之间关系方面已开展了大量研究,包括国家^[23]、地区^[24]、省^[19,25]、城市^[18,26-27]、流域^[11,28-29]、海岸带^[30]、自然保护区等^[1]。

海南省是中国最大的经济特区,也是“21 世纪海上丝绸之路”重要战略支点,肩负着建设国家生态文明试验区和海南自由贸易港的历史使命,在经济社会发展和生态环境保护方面都提出了更高的要求。海南省不仅要做好“减碳”,更要做好“增汇”,如何权衡土地开发利用与维持生态系统碳汇服务功能的完整性是该项任务的核心要义。目前海南岛的碳储量方面的研究仍局限于局部区域^[31-34]或单一生态系统

等^[35-36]小尺度的探讨,鲜见以全岛为研究对象,大尺度的研究报道。本研究采用 InVEST 模型碳储量模块估算 1980—2020 年海南岛生态系统碳储量时空分布,利用 ArcGIS 中的 Getis-Ord G_i^* 工具分析海南岛碳储量时空分布特征,揭示区域碳储量变化的内在响应机制。最后,基于 FLUS 模型预测在不同情景下 2030 年海南岛碳储量变化,以期为海南岛国土空间的科学规划与生态保护政策的制定提供科学依据。

1 研究区概况

海南岛(18°10′—20°10′N,108°37′—111°03′E)是中国第二大岛,面积 $3.40 \times 10^4 \text{ km}^2$,地处热带北缘,属热带海洋季风性气候,年均气温为 22.5~26.0 °C,年平均降雨量为 1 639 mm,平均每年在海南岛登陆的热带风暴、台风约 3 次,海岸线长约 1 940 km。地势表现为中间高四周低,以五指山(1 867 m)和鹦哥岭(1 811 m)为隆起中心,向岛屿四周呈山地、丘陵、台地、平原、海滩逐渐降低(图 1),其中山地和丘陵为全岛的主要地貌,占全岛面积的 38.7%。海南岛自然条件优越,拥有丰富的植物种类、复杂的生态系统,素有“热带植物宝库”之称,拥有维管束植物 6 016 种^[37]。截至 2020 年底海南岛的森林覆盖率已达 62.1%^[38]。自 2010 年海南国际旅游岛建设,尤其是海南自由贸易港建设以来,各类建设项目集中开工,城市化的快速发展使得城市建设用地逐年扩张,土地资源承载压力随之增大。通过研究海南岛生态系统碳储量对土地利用变化响应,有利于探究在“双碳”背景下,如何协调生态环境保护与土地开发利用之间的关系,为国家生态文明试验区和自由贸易港建设过程中的土地合理规划利用提供科学依据。

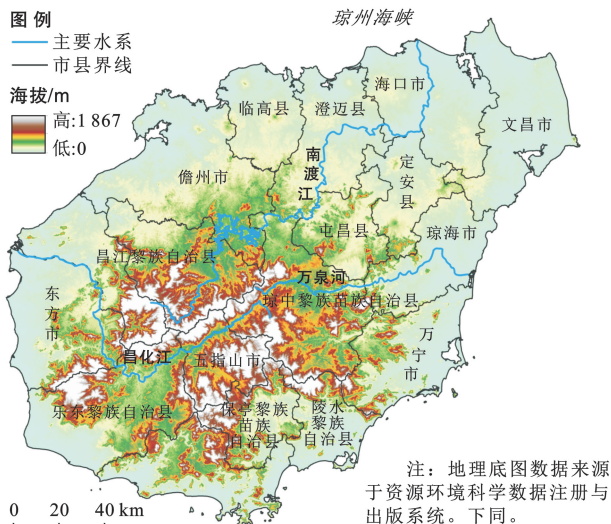


图 1 海南岛地理概况

Fig.1 Overview of Hainan Island

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 土地利用类型和驱动因子数据 土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<https://www.resdc.cn/data>),分别获取 1980,1990,2000,2010,2020 年共 5 期土地利用遥感监测数据,空间分辨率为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,包含 6 种一级类型以及 22 种二级类型,海南岛 5 期土地利用类型数据中无永久性冰川雪地、戈壁、其他和裸岩石砾地 4 种土地利用类型,最终得到 22 种二级地类。本研究选用坡度、DEM 值、NDVI 值、年均降雨量、年均气温、相对湿度、人口密度、GDP 和离道路距离,作为土地利用变化驱动因子,DEM 值、相对湿度、人口密度、GDP 和离道路距离等数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<https://www.resdc.cn/data>)。年均降雨量、年均气温来源于国家气象信息中心(<https://data.cma.cn/>)。

2.1.2 碳密度数据 InVEST 模型 Carbon 模块中假设将某一土地利用类型的碳密度是一个常量^[11]。本研究的碳密度数据尽量参考海南岛范围内或邻近纬度邻省前人研究数据。本文土壤碳密度和死亡有机物碳密度主要参考了周汝波等^[39]和林彤等^[19],以及王文蕾等^[35]、周玉荣等^[40]、郭晓伟等^[32]的研究成果,地上碳密度、地下碳密度主要参考张凯琪等^[20]、刘晓娟等^[23]和邢维奋等^[31]成果稍加修正得到最终海南岛碳密度数据(表 1)。

2.2 研究方法

2.2.1 碳储量计算 本研究采用 InVEST 3.8.9 模型中的碳储量模块(carbon model)对海南岛总碳储量进行计算,该模块将生态系统碳储量划分为 4 个基本碳库,包括地上生物碳(土壤以上所有存活的植物材料中的碳)、地下生物碳(植物存活根系中的碳)、土壤碳(土壤中的有机碳)、死亡有机质碳(植物的凋落物、倒伏或直立的枯死木中的碳)。该区域碳储量等于各种土地利用类型的平均碳密度乘以相应的土地面积计算所得,其计算公式如下:

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

$$C_{\text{ti}} = \sum_{i=1}^n A_i \times (C_{\text{ai}} + C_{\text{bi}} + C_{\text{si}} + C_{\text{di}}) \quad (2)$$

式中: C_{ti} 为第 i 种土地利用类型的总碳储量; A_i 为第 i 种土地利用类型的面积; C_{ai} , C_{bi} , C_{si} , C_{di} 为第 i 种土地利用类型的地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度、死亡有机质碳密度(t/hm^2)。

表 1 海南岛碳密度

Table 1 Carbon density in Hainan Island

一级地类	二级地类	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地	水田	18.24	2.04	10.84	0
	旱地	19.45	3.58	10.84	0
林地	有林地	27.83	6.79	22.57	4.71
	灌木林	20.94	5.88	22.57	2.47
	疏林地	23.72	6.12	22.57	3.59
	其他林地	20.48	5.56	22.57	0.51
	高覆盖度草地	22.31	98.64	9.99	0.24
草地	中覆盖度草地	19.67	92.18	9.99	0.24
	低覆盖度草地	9.36	42.06	9.99	0.24
	河渠	0	0	0	0
水域	湖泊	0	0	0	0
	水库坑塘	0	0	0	0
	滩涂	0.35	1.45	3.03	1.24
	滩地	0.35	1.45	3.03	1.24
	城镇用地	0	0	0	0
建设用地	农村居民点	14.36	2.63	16.19	0
	其他建设用地	13.45	3.08	22.15	0
	沙地	16.12	3.12	0.95	0
未利用地	盐碱地	16.89	3.22	1.00	0
	沼泽地	6.52	1.50	0.90	0
	裸土地	0	0	0.86	0
	填海用地	0	0	0	0

注: C_{above} 为地上生物碳; C_{below} 为地下生物碳; C_{soil} 为土壤碳; C_{dead} 为死亡有机质碳。

2.2.2 土地利用转换矩阵 土地利用转换矩阵可直观反映不同时间段研究区域土地类型的变化情况,包括位置、面积以及各土地利用类型之间的关系,有助于揭示土地变化过程,分析土地利用变化对研究区碳储量的影响。其数学形式如下:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{1n} & S_{2n} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: S 为某土地利用类型面积; $i, j (i, j = 1, 2, 3 \dots n)$ 为转变前、后土地利用类型; S_{ij} 为*i*类型转变为*j*类型的面积;行数值表示*i*类型的转出信息,列数值代表*j*类型的转入信息。

2.2.3 冷点与热点分析 采用 ArcGIS 生成研究区 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的格网,将测算得到的碳储量数据与格网链接,获取每个格网点的碳储量值。基于格网尺度,使用 ArcGIS 热点分析工具(Getis-Ord G_i^*)分析海南岛碳储量时空分布特征^[21,41]。

2.2.4 基于 FLUS 模型的土地利用变化预测 FLUS 模型是用于模拟人类活动与自然影响下的土地利用变化以及未来土地利用情景的模型。FLUS 模型提出一种基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,该机制能有效处理多种土地利用类型在自然作用与人类活动共同影响下发生相互转化时的不确定性与复杂性,使得 FLUS 模型具有较高的模拟精度并且能获得与现实土地利用分布相似的结果^[21,42]。

为了准确模拟预测 2030 年海南岛陆地生态系统碳储量变化情况,本研究采用 FLUS 2.4 模型基于 2010 年的土地利用数据为基础,结合自然地理条件、气候状况和社会经济背景等方面选取 9 个影响土地利用变化的驱动因子(图 2),通过设置和多次调整转移矩阵参数、邻域因子参数(表 2)。转移矩阵中,0 代表不可以发生转换,1 代表可以发生转换^[19]。邻域因子权重范围为 0~1,越接近 1 表示该地类的扩张能力越强^[26],模拟得到 2020 年海南岛的土地利用变化情况,并将其与 2020 年实际的土地利用类型数据进行对比,采用 overall accuracy, kappa 系数和 figure of merit (FoM)值对模拟结果进行精度验证,模拟结果的 overall accuracy 和 kappa 分别为 90.16%, 81.39%,这表明模拟效果好,结果可信度高,预测结果一致性程度好,可信度高。Pontius 指出 FoM 指数在评估模拟变化的准确性方面优于普通的 kappa 系数,本文 FoM 为 0.02,满足研究需求^[43]。

表 2 邻域因子和转移矩阵参数设置

Table 2 Parameters setting of neighborhood factor and transfer matrix

项目	自然发展情景						生态保护情景						快速发展情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
邻域因子参数	0.4	0.6	0.4	0.4	0.9	0.8	0.4	0.6	0.4	0.4	0.8	0.7	0.4	0.6	0.4	0.4	1	0.9
转移矩阵	a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
	b	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
	c	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
	d	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
	e	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
	f	1	1	1	0	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。

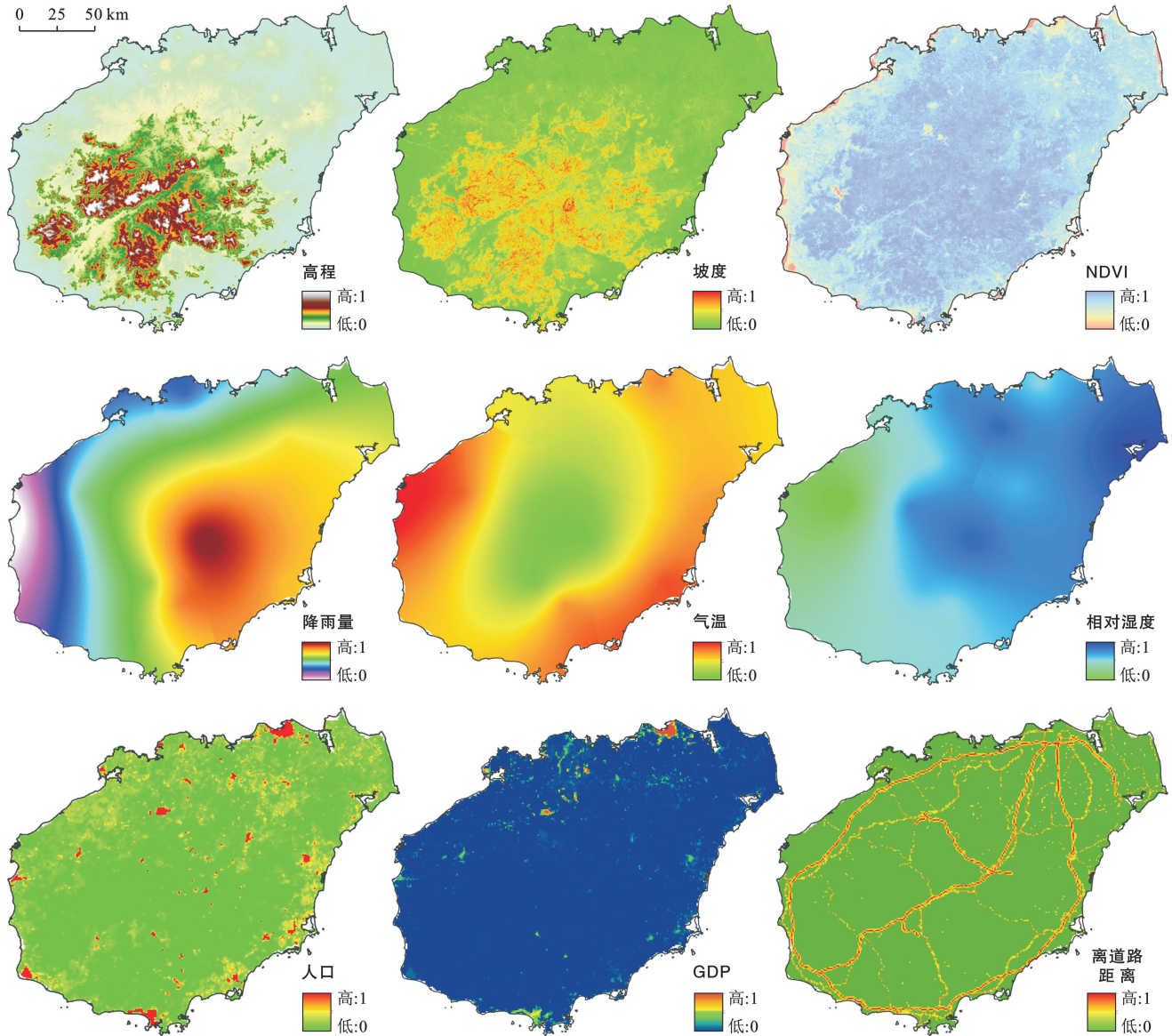


图 2 海南岛土地利用驱动因子模拟预测数据

Fig.2 Simulation and prediction data of land use driving factors in Hainan Island

由于城市的发展受多种因素影响^[3],因此本研究在模拟时设定 3 种发展情景:①自然发展情景:不考虑各种规划政策和法律法规对土地利用变化的约束力,遵循土地利用结构自然演变规律,设置各类型用地均可互相转换,仅限制林地、建设用地和未利用地转化为水域;按照 1980—2020 年土地利用转变速率为参考依据对 2030 年未来土地利用变化进行模拟。②快速发展情景:不限制各地类转化为建设用地。③生态保护情景:该情境在现行的生态保护政策下,注重生态规划,杜绝不合理占用各类土地资源,海南岛的林地和耕地将得到有效保护。综合考虑降低林地、耕地、水体转化为建设用地的概率,以划定的生态红线、自然保护区和永久基本农田和城镇开发边界作为限制转化区域。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

采用 GIS 软件对 1980 年和 2020 年的土地利用数据进行分析(表 3,图 3),结果表明,海南岛土地利用类型以林地、耕地为主,两项合计达 90%。林地主要集中在海南岛中部山区,耕地分布于岛屿四周沿海平坦区域,尤以北部和西部沿海平原区耕地最为密集,北半部的坡地主要是耕地,其他地类镶嵌其中。相较于 1980 年、2020 年林地、耕地、草地、未利用地面积均有所减少。其中,林地由 64.47% 下降至 63.60%;耕地由 26.63% 下降至 25.56%;草地由 3.60% 下降至 3.33%;未利用地由 0.36% 下降至 0.19%;此外,建设用地和水域面积增加,其中变化

量最大为建设用地,40 a 间增长了 83.4%,从 718.56 km²增加到 1 318.02 km²,年均净增长量为

14.99 km²;水域比例由 2.83%提高至 3.46%,面积增加了 214.03 km²。

表 3 海南岛 1980—2020 年土地利用类型变化
Table 3 Land use type change in Hainan Island from 1980 to 2020

土地利用类型	项目	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年
耕地	面积/km ²	9 056.20	9 002.07	9 002.09	8 878.31	8 690.51
	比例/%	26.63	26.47	26.47	26.11	25.56
林地	面积/km ²	21 921.15	21 971.75	21 971.95	21 919.00	21 624.65
	比例/%	64.47	64.62	64.62	64.46	63.60
草地	面积/km ²	1 224.26	1 213.47	1 213.32	1 116.30	1 131.18
	比例/%	3.60	3.57	3.57	3.28	3.33
水域	面积/km ²	962.04	980.46	980.48	1 181.12	1 176.07
	比例/%	2.83	2.88	2.88	3.47	3.46
建设用地	面积/km ²	718.56	722.16	722.08	839.69	1 318.02
	比例/%	2.11	2.12	2.12	2.47	3.88
未利用地	面积/km ²	121.17	113.48	113.48	68.98	62.96
	比例/%	0.36	0.33	0.33	0.20	0.19

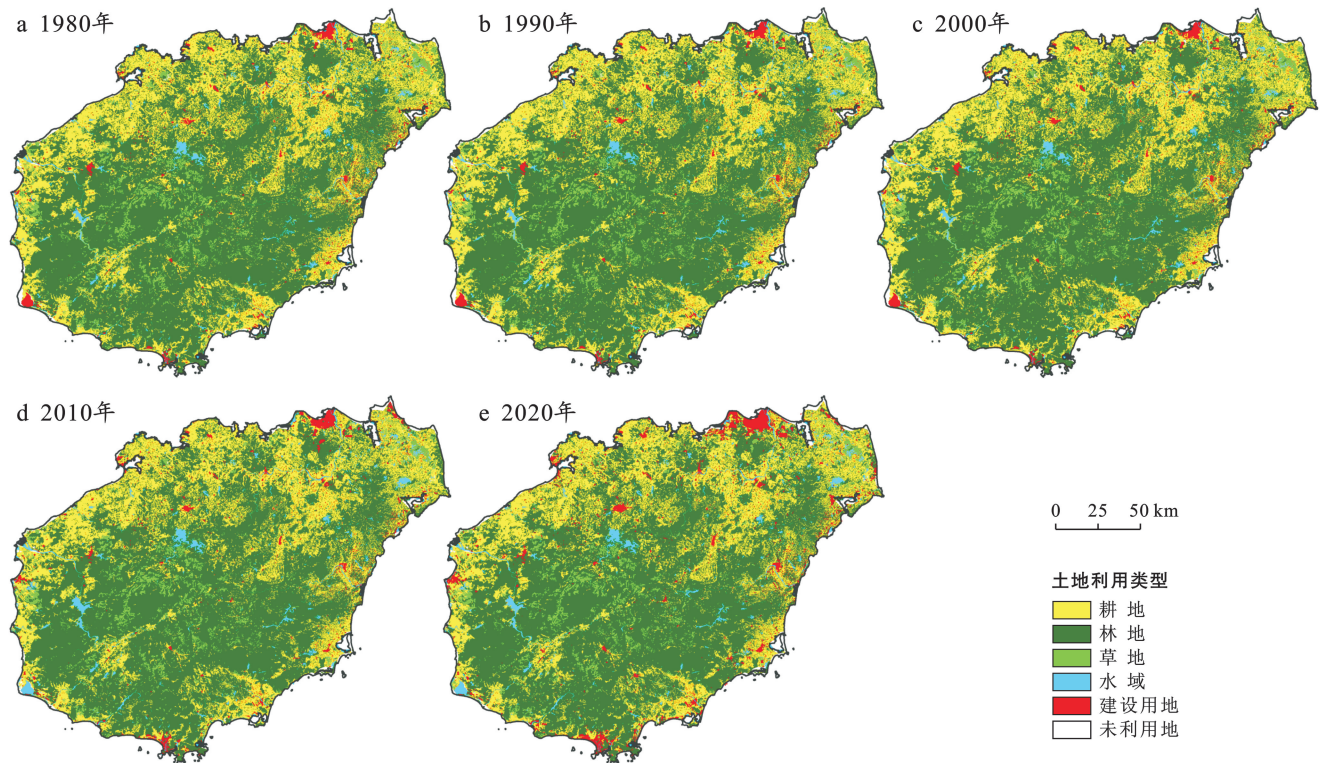


图 3 1980—2020 年海南岛土地利用类型分布

Fig.3 Distribution of land use types from 1980 to 2020 in Hainan Island

从整体上看,1980—2020 年海南岛土地利用类型表现为耕地和林地大幅减少,建设用地增长,区域开发两极化的特点。由表 4 可知,40 a 间耕地转出 1 329.66 km²,其中,59.0%转出为林地,27.5%转出为建设用地。林地共转出 1 397.18 km²,其中,53.8%转出为耕地,24.7%转出为建设用地,11.0%转出为水域,10.1%转出为草地。

40 a 间建设用地增长约 83.4%,其中,超过 66.6%的增长率是在 2010 年海南国际旅游岛政策发布后的 10 a 间贡献的。从空间分布上看,建设用地主要集中在琼北的海口市和琼南的三亚市(图 3),这两个区域也是全岛 GDP 贡献最高的地区,逐渐形成“海澄文”和“大三亚”南北两大经济圈的国土空间开发格局。

表 4 1980—2020 年海南岛土地利用转移矩阵

Table 4 Transfer matrix of land use from 1980 to 2020 in Hainan Island

km²

土地利用类型	2020 年面积							转出
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计	
耕地	7 726.55	784.52	37.90	134.58	365.95	6.70	9 056.20	1 329.66
林地	751.94	20 523.97	141.49	153.06	345.13	5.56	21 921.15	1 397.18
草地	36.09	180.99	927.67	50.51	28.15	0.84	1 224.26	296.59
水域	71.72	75.47	11.28	782.19	20.29	1.10	962.04	179.85
建设用地	75.24	53.21	3.26	47.34	539.34	0.17	718.56	179.22
未利用地	28.98	6.49	9.56	8.39	19.16	48.59	121.17	72.58
合计	8 690.51	21 624.65	1 131.18	1 176.07	1 318.02	62.96	34 003.39	3 455.07
转入	963.97	1 100.68	203.50	393.88	778.68	14.37	3 455.07	—
变化量	-365.69	-296.50	-93.09	214.02	599.46	-58.21	-365.69	—

3.2 碳储量时空变化特征

通过 InVEST 模型碳模块估算得到 1980—2020 年海南岛 5 期碳储量数据分别为 4.422×10^5 , 4.421×10^5 , 4.421×10^5 , 4.362×10^5 , 4.347×10^5 t, 碳储量总体呈逐年减少的趋势(图 4)。如图 4 所示, 1980—2000 年海南岛碳储量变化较小, 仅损失 147.7 t, 降幅约 0.03%。进入 21 世纪后, 由于海南岛城镇化进程加快, 城市建设进入高峰期, 大量耕地和林地转为建设用地, 碳储量流失也随之加剧。2000—2020 年期间降幅最大, 年均损失约 372 t, 累计损失碳储量 7 439 t, 其中, 海口、三亚和儋州等经济发展较快的市县碳储量显著下降。从空间分布上看, 海南岛碳储量总体呈“中间高、四周低”的特点(图 5)。海南岛中部山区为核心储碳区, 这得益于高海拔和大坡度限制了中部山区土地的开垦与开发建设, 城市扩张能力较低, 分布着密集的林地, 碳储量相对较高且稳定。相比之下, 沿海四周地势平坦, 以耕地为主, 人为干扰严重, 土地开发利用率高, 形成碳储量低密度环带。

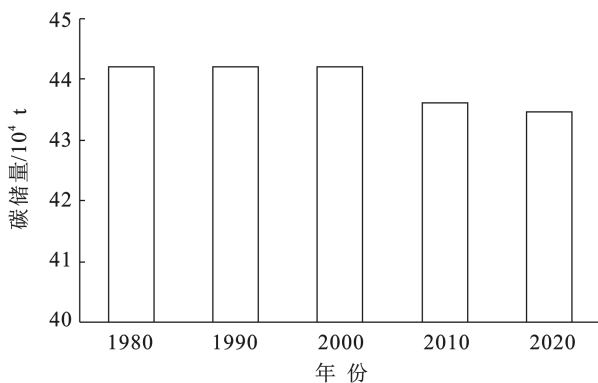


图 4 1980—2020 年海南岛碳储量变化

Fig.4 Change of carbon storage in Hainan Island from 1980 to 2020

3.3 碳储量变化冷点与热点分析

基于格网尺度, 通过 Getis-Ord G_i^* 分析得到海南岛碳储量变化热点图(图 5), 从整体上看, 全岛的冷点显著多于热点, 这也印证了在 1980—2020 年海南岛碳储量下降的变化特征; 海南岛碳储量热点区较为分散, 主要分布于儋州湾、花场湾、泊潮湾等河流入海口区域, 这得益于退塘还林政策使得大面积的水域转化为高碳密度的林地, 尤其以高生物量和高碳储量的红树林湿地为代表的植被类型得到恢复; 海南岛碳储量损失冷点区主要集中在海口、三亚、儋州、东方和琼海等市县, 林地的大面积转出为建设用地是碳储量损失的主要因素之一, 此外, 由于赤田水库(1993 年)、大广坝水库(1994 年)、大隆水库(2007 年)和红岭水库(2015 年)等大型水库的修建^[38], 以及文昌、东方、万宁和乐东等沿海市县内水产养殖和海盐生产场所的发展建设, 这些都导致大量林地、耕地转出为水域, 由于林地的固碳能力较强, 林地转出不利于碳储量的封存, 这也是碳储量变化的直接因素之一。

3.4 不同情景下土地利用类型和碳储量变化

采用 FLUS 模型模拟预测不同情景下的土地利用类型变化, 并通过 InVEST 模型计算碳储量变化。由图 6 可知, 3 种发展情景下海南岛的土地利用类型变化主要是建设用地扩张推动的, 其中, 基于现行关于林地、耕地等地类的保护政策的生态保护情景, 在 2020—2030 年期间建设用地的增长能得到有效的制约, 建设用地仅增加 63.05 km²; 在不考虑相关政策制约的自然发展情景下, 建设用地将增加 365.53 km²; 而在各地类均可互相转换的快速发展情景下建设用地土地利用变化量最大, 建设用地增长量是生态保护情景的 9 倍, 达 564.92 km²(图 6)。

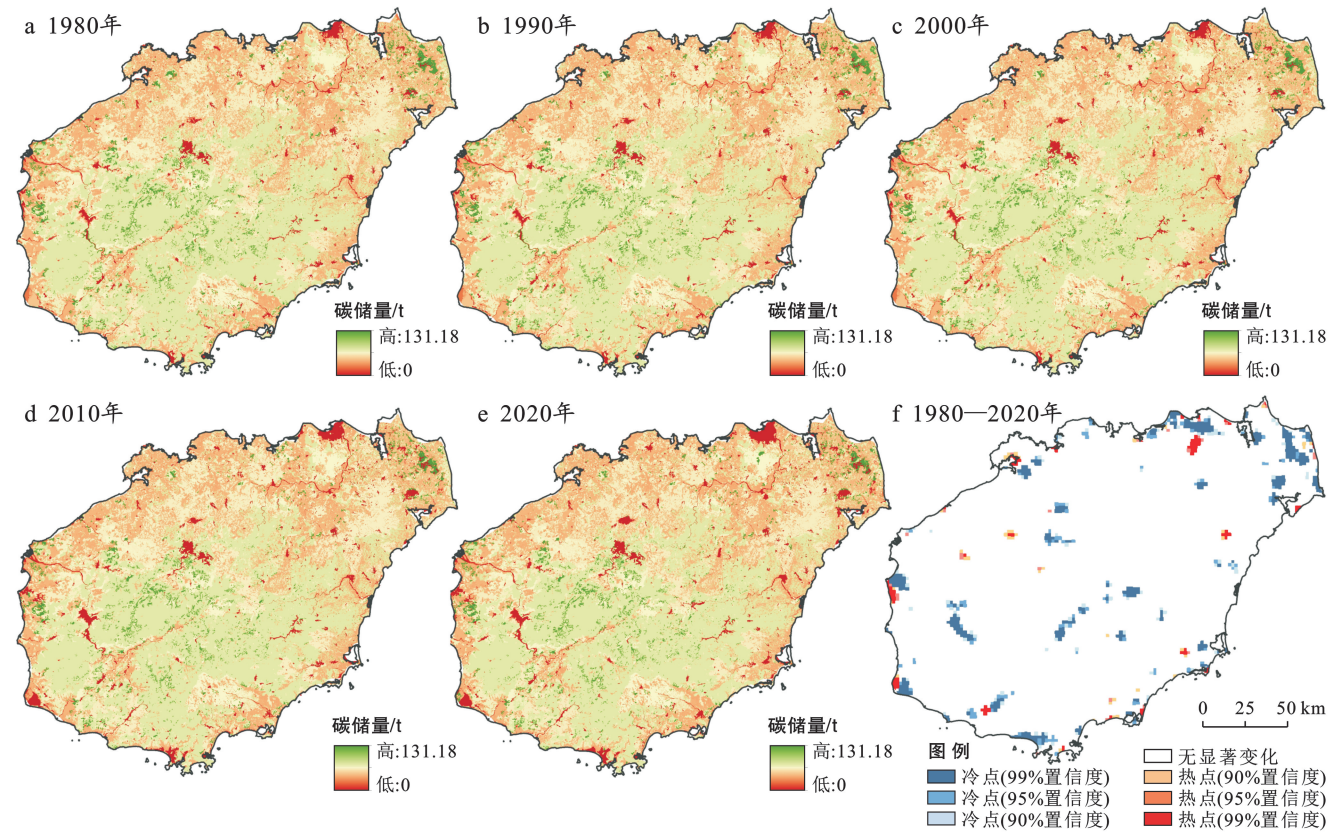


图 5 1980—2020 年海南岛碳储量空间分布和冷点热点分布

Fig.5 Spatial distribution of carbon storage, and cold spots and hot spots from 1980 to 2020 in Hainan Island

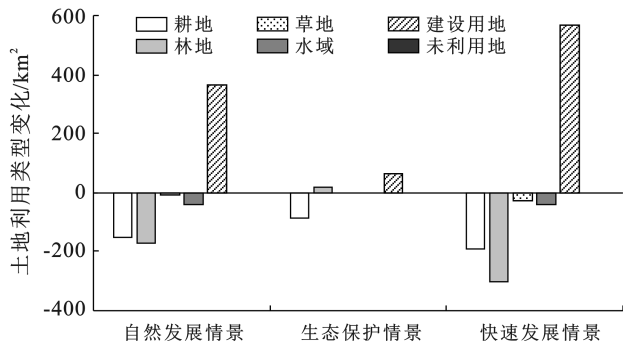


图 6 不同情景下 2030 年海南岛土地利用变化

Fig.6 Land use type change of Hainan Island under different scenarios in 2030

模拟结果表明,3 个情景下 2030 年海南岛碳储量均呈现降低的趋势,其中生态保护情景碳储量变化量最小,为 4.33×10^5 t,与 2020 年相比仅降低 0.41%,该情景下大面积的林地和耕地被划入保护地范围,限制转换为碳储量较低的建设用地,且林地和草地均有所增加,对碳储量的降低也有一定的减缓作用。可见,在现行的生态保护政策下碳储量的减少得到一定程度上抑制;而在自然发展情景下大量的耕地和林地迅速转化为建设用地,碳储量随之降低至 4.31×10^5 t;快速发展情景与自然发展情景类似,建设用地急剧扩张,主要集中在海口、万宁、三亚、儋州、临高等

市县,在此类没有限制条件的情景下,碳储量最易流失,全岛总碳储量仅为 4.29×10^5 t(见图 7)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 海南岛碳储量时空变化影响因素。陆地生态系统是世界上最主要的碳库之一^[1],土地利用格局的变化对陆地生态系统有直接影响,进而影响区域碳储量的时空分布,这一关系得到了大量研究的证实^[19-23,39,28]。本研究结果表明:1980—2020 年海南岛碳储量呈现逐步递减的趋势,其中,前 20 a 海南岛碳储量略有减少,碳储量总体变化较小。这是主要由于海南自建省办经济特区以来,一直奉行“生态立省”的政策,即经济发展与生态环境保护并重,出台了一系列地方性法律法规,使得土地开发利用受到严格的管理限制。虽部分林地和耕地被开发利用,但随着“天然林保护工程”“绿化宝岛工程”“退耕还林工程”“退塘还林工程”等一系列生态保护修复工程的实施,林地得到保护和恢复,局部区域碳储量得到一定平衡。进入 21 世纪后,尤其是 2010 年海南国际旅游岛建设以来,海南岛城镇化进程加快,城市建设进入高峰期,碳密度较高的耕地和林地大量转为建设用地,40 a 间建设用地增长约 83.4%,其中,超过 66.6%的增长率

是在 2010 年海南国际旅游岛政策发布后的 10 a 间贡献的。

可见,建设用地的扩张是海南岛碳储量流失的主要因素,这与大部分学者的研究结论一致^[1,24-26]。

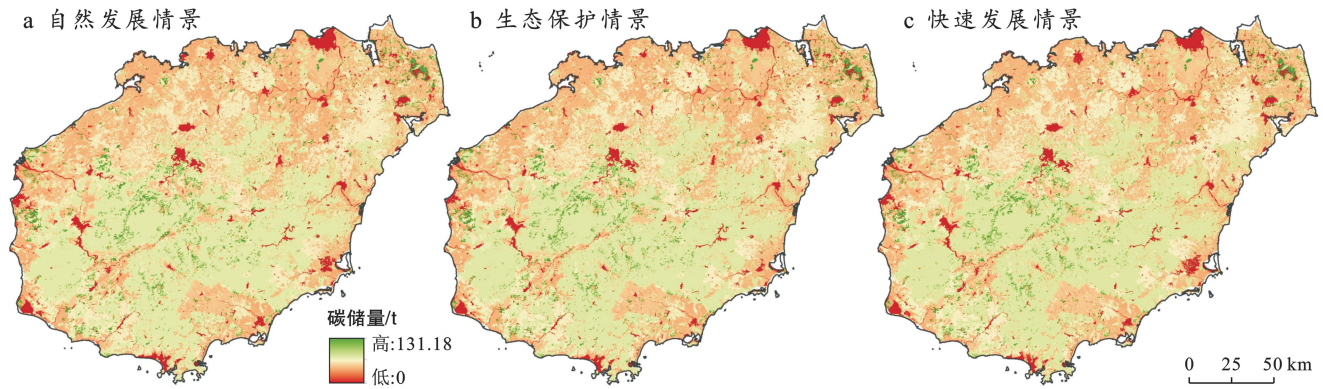


图 7 不同情景下 2030 年海南岛碳储量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of carbon storage of Hainan Island under different scenarios in 2030

(2) 预测结论具有局限性。本研究基于土地利用数据通过耦合 InVEST 模型和 FLUS 模型清晰反映海南岛的土地利用和碳储量的时空变化,但模型预测存在一定局限性^[30]。首先,关于海南岛各种土地利用类型的碳密度的报道较少,缺乏实测数据。本研究中采用的碳密度数据为本岛和广东、广西等邻近区域的碳密度数据修正而得,与实际的碳密度存在一定误差;其次,滨海蓝碳生态系统约占海洋沉积物有机碳埋藏总量的 50%,是碳密度最高的生态系统之一^[44-45],但土地利用类型划分不够细致,如碳密度较高的红树林、盐沼、海草床生态系统未单独划分地类,影响模拟精度;同时,在模型计算过程中未考虑碳密度受地形、气候、水文、植被类型、土壤类型等多种因素影响而产生波动^[46],对模拟结果会产生一定影响;此外,时间跨度太长,解译人员的主观性对土地利用监测数据解译精度存在影响。在今后的研究中,应加强对海南岛各种土地利用类型碳密度进行调查监测,完善土地利用类型划分方法,选取较高精度的土地利用数据,提高模拟结果的准确性。

(3) 研究对提高海南岛生态系统碳储量的启示。不同情景下碳储量均呈现降低的趋势,建设用地的快速扩张致使林地、耕地和草地被大量占用,生态空间逐渐破碎化,碳储量损失随之增大。相比之下,生态保护情景下由于“三线一单”(指生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单)、自然保护地体系和森林法等政策法规的实施,使得碳储量较高的林地和耕地得到有效保护,该情景下碳储量维持在相对较高的水平。同时,部分区域由于退塘还林、退耕还林等政策实施,碳储量的呈现局部增加现象。

4.2 结论

(1) 海南岛土地利用类型以林地、耕地为主,两项合计达 90%,林地主要集中在海南岛中部山区,耕地分布于岛屿沿海四周平原;1980—2020 年,耕地、草地、林地和未利用地面积均有不同程度减少,建设用地和水域面积增加。

(2) 从时间尺度上看,1980—2020 年的前 20 a 海南岛碳储量变化较小,降幅仅为 0.03%。随着城镇化进程加快,土地资源大面积开发利用,2000—2020 年期间碳储量损失速率急剧增大,年均损失量达 372 t。从空间分布上看,海南岛碳储量总体呈现出中部山区高,沿海地区偏低的特点。

(3) 预测结果表明,3 个情景下 2030 年海南岛碳储量均呈现降低的趋势。其中,快速发展情景下建设用地土地利用变化量最大,碳储量最易损失,自然发展情景次之,生态保护情景碳储量损失最小。

由此可见,在未来的海南自贸港建设过程中,应持续推动生态修复、植树造林、生物多样性保育等工作,推进高新技术产业、现代服务业、热带高效农业等土地节约型和环境友好型产业发展,提高房地产开发的生态准入门槛,加强林地、湿地、草地等重点生态区位的保护力度,减少建设用地对林地、耕地的侵占。尤其是筑牢海南岛中部以海南热带雨林国家公园为基础的生态屏障,构建以国家公园为主体的自然保护地体系,推动生态保护与经济社会协调发展。

[参 考 文 献]

- [1] 邓喆,丁文广,蒲晓婷,等.基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J].水土保持通报,2022,42(3):324-334.
- [2] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem car-

- bon dynamics and climate feedbacks [J]. *Nature*, 2008, 451(7176):289-292.
- [3] 邵壮,陈然,赵晶,等.基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J].*生态学报*,2022,42(23):9456-9469.
- [4] 张燕,师学义,唐倩.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J].*生态学报*,2021,41(1):360-373.
- [5] 张海凤,崔桂善.土地利用/覆盖类型的变化对陆地生态系统碳收支的影响[J].*中国资源综合利用*,2019,37(1):176-179.
- [6] 葛全胜,戴君虎,何凡能,等.过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J].*中国科学(D 辑:地球科学)*,2008,38(2):197-210.
- [7] 崔旺来,蔡莉,奚恒辉,等.基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析[J].*生态学报*,2022,42(6):2136-2148.
- [8] 中共中央、国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL](2021-10-24).http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [9] 海南省人民政府关于印发海南省碳达峰实施方案的通知[EB/OL](2022-08-09).<http://en.hainan.gov.cn/hainan/zchbhnwj/202208/e7b5ef412c304385a90a775150d9221d.shtml>.
- [10] 史名杰,武红旗,贾宏涛,等.基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J].*农业资源与环境学报*,2021,38(6):1010-1019.
- [11] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].*生态学报*,2021,41(10):4052-4065.
- [12] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001,292(5525):2320-2322.
- [13] 马学威,熊康宁,张俞,等.森林生态系统碳储量研究进展与展望[J].*西北林学院学报*,2019,34(5):62-72.
- [14] 甄伟,黄攻,翟印礼,等.辽宁省森林植被碳储量和固碳速率变化[J].*应用生态学报*,2014,25(5):1259-1265.
- [15] 亓伟伟,牛海山,汪诗平,等.增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究[J].*生态学报*,2012,32(6):1713-1722.
- [16] 侯红艳,戴尔阜,张明庆.InVEST 模型应用研究进展[J].*首都师范大学学报(自然科学版)*,2018,39(4):62-67.
- [17] Zhao Minmin, He Zhibin, Du Jun, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models [J]. *Ecological Indicators*, 2019,98:29-38.
- [18] 杨激威,赵娟,朱家田,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J].*自然资源遥感*,2022,34(4):175-182.
- [19] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测:以广东省为例[J].*中国环境科学*,2022,42(10):4827-4839.
- [20] 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(6):2799-2809.
- [21] 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.
- [22] 齐麟,许东,朱琪,等.基于 GeoSOS-FLUS 平台的东北森林屏障带生态格局优化[J].*生态学杂志*,2021,40(11):3448-3462.
- [23] 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.
- [24] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].*生态学报*,2021,41(17):6786-6799.
- [25] 吴佩君,刘小平,黎夏,等.基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估:以广东省为例[J].*地理与地理信息科学*,2016,32(5):22-28.
- [26] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].*水土保持通报*,2021,41(2):222-229.
- [27] 何海珊,赵宇豪,吴健生.低碳导向下土地覆被演变模拟:以深圳市为例[J].*生态学报*,2021,41(21):8352-8363.
- [28] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].*地理学报*,2019,74(3):446-459.
- [29] 刘冠,李国庆,李洁,等.基于 InVEST 模型的 1999—2016 年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J].*干旱区研究*,2021,38(1):267-274.
- [30] 朱丽亚,胡克,孙爽,等.基于 InVEST 模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究[J].*现代地质*,2022,36(1):96-104.
- [31] 段璇瑜,龚文峰,孙雨欣,等.海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J].*水土保持通报*,2022,42(5):301-311.
- [32] 郭晓伟,骆土寿,李意德,等.海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征[J].*生态学报*,2015,35(23):7878-7886.
- [33] 杨熙,余威,何静,等.海南黎安港海草床碳储量评估[J].*海洋科学*,2022,46(11):116-125.

- 2783-2792.
- [37] Li Lu, Song Yan, Wei Xuhua, et al. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: a case study of Wuhan, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111:106064.
- [38] 叶剑平, 高峰. 我国快速城镇化背景下滨海地带土地开发利用探讨[J]. *现代管理科学*, 2017(6):9-11.
- [39] 朱丽亚, 胡克, 孙爽, 等. 基于 InVEST 模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究[J]. *现代地质*, 2022, 36(1):96-104.
- [40] 杨怀宇, 王春晓, 郭宗香, 等. 池塘养殖生态系统空气调节服务价值的实证研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(5):432-438.
- [41] 徐婕, 潘洪义, 曹文亚, 等. 基于 LUCC 的眉山市县域碳排放效应[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(5):683-689.
- [42] 辛琨, 肖笃宁. 盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J]. *生态学报*, 2002, 22(8):1345-1349.
- [43] 陈娟, 王龙, 赵欣运, 等. 贵阳市城镇化进程与土地利用转变关系[J]. *地球科学*, 2019, 44(9):2944-2954.
- [44] 虎陈霞, 郭旭东, 连纲, 等. 长三角快速城市化地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响: 以嘉兴市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(3):333-340.
- [45] Zhang Chao, Zhong Shuai, Wang Xue, et al. Land use change in coastal cities during the rapid urbanization period from 1990 to 2016: a case study in Ningbo City, China [J]. *Sustainability*, 2019, 11(7):2122.
- [46] Li Ying, Feng Yu, Guo Xiaorong, et al. Changes in coastal city ecosystem service values based on land use: a case study of Yingkou, China [J]. *Land Use Policy*, 2017, 65:287-293.
- [47] 李毅, 肖腊梅, 胡文敏, 等. 长株潭核心区土地利用变化时空格局及驱动力多维分析[J]. *经济地理*, 2021, 41(7):173-182.
- [48] 张宇晗, 张兵华, 彭琳, 等. 福州市 2005—2020 年土地利用变化及驱动因素研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3):408-416.
- [49] 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(4):1280-1290.
- [50] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5):1214-1232.
- [51] 张晓光, 张赢心, 李士美, 等. 基于土地利用的青岛市碳排放变化特征与预测[J]. *地理空间信息*, 2022, 20(5):1-5.

(上接第 329 页)

- [34] 张育诚, 韩念龙, 胡珂, 等. 海南岛中部山区土地利用变化对碳储量时空分异的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(2):115-122.
- [35] 王文蕾, 陈宇翔, 王旭, 等. 海南岛桉树林土壤碳库研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(2):91-95.
- [36] 褚梦凡, 肖晓彤, 丁杨, 等. 海南儋州湾红树林区沉积有机质来源及碳储量[J]. *海洋科学*, 2021, 45(2):22-31.
- [37] 杨小波, 陈宗铸, 李东海. 海南植被志(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [38] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 等. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, 40(14):4760-4773.
- [39] 周汝波, 林媚珍, 吴卓, 等. 珠江西岸生态系统碳储量对土地利用变化的响应[J]. *生态科学*, 2018, 37(6):175-183.
- [40] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5):518-522.
- [41] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(10):3482-3493.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [46] 何磊, 叶思源, 赵广明, 等. 海岸带滨海湿地蓝碳管理的研究进展[J]. *中国地质*, 2023, 50(03):777-794.
- [47] 陈鹭真, 卢伟志, 林光辉译. 滨海蓝碳: 红树林、盐沼、海草床碳储量和碳排放因子评估方法[M]. 福建 厦门: 厦门大学出版社, 2018.
- [48] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(5):692-703.