

耦合 PLUS-InVEST 模型的海南热带雨林 国家公园碳储量时空演变与预测

肖义发

(国家林业和草原局西南调查规划院, 云南 昆明 650216)

摘要: [目的] 研究海南热带雨林国家公园在不同情景下的土地利用和碳储量变化, 为优化该区土地利用格局, 制定保护政策提供科学依据。[方法] 以 2001, 2011, 2021 海南热带雨林国家公园土地利用数据为基础, 利用 PLUS 模型和 InVEST 模型相结合的方法, 分析研究区在 2001—2021 年及 2030 年不同情景下的土地利用及碳储量变化。[结果] ① 2001—2021 年海南热带雨林国家公园土地利用变化的特征为耕地、草地、水域面积逐年减少, 林地、人造地表面积不断扩张, 20 a 间林地面积增加 561.19 km²; 到 2030 年, 自然发展与耕地保护情景下土地利用变化模拟结果有些相似, 而在生态保护情景下, 土地利用变化与其他两种情景截然相反。② 2001, 2011, 2021 年海南热带雨林国家公园碳储量分别为 8.72 × 10⁷ t, 9.22 × 10⁷ t, 9.13 × 10⁷ t, 到 2030 年自然发展情景下碳储量为 9.04 × 10⁷ t, 耕地保护情景下碳储量为 9.12 × 10⁷ t, 生态保护情景下碳储量为 9.13 × 10⁷ t, 说明实施生态保护措施可以进一步提升海南热带雨林国家公园固碳能力。[结论] 海南热带雨林国家公园碳储量变化与土地利用变化呈高度一致性, 土地利用变化很大程度上决定了碳储总量及空间分布。

关键词: 国家公园; 土地利用; 碳储量; 模型; 热带雨林

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0305-10

中图分类号: X87

文献参数: 肖义发. 耦合 PLUS-InVEST 模型的海南热带雨林国家公园碳储量时空演变与预测[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 305-314. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.033; Xiao Yifa. Spatial-temporal evolution and prediction of carbon storage in Hainan Tropical Rainforest National Park by coupling PLUS-InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 305-314.

Spatial-temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Hainan Tropical Rainforest National Park by Coupling PLUS-InVEST Models

Xiao Yifa

(Southwest Survey and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract: [Objective] The changes of land use and carbon storage under different scenarios were analyzed to provide the scientific bases were provided for optimizing of land use pattern and formulating protection policies in Hainan Tropical Rainforest National Park. [Methods] Based on the land use data of Hainan Tropical Rainforest National Park in 2001, 2011 and 2021, and the PLUS and InVEST models, the changes of land use and carbon storage in 2001—2021 and 2030 under different scenarios were analyzed and predicted, respectively. [Results] ① From 2001 to 2021, the cultivated lands, grassland and water decreased continually, while the forest land and construction land gradually expanded in Hainan Tropical Rainforest National Park. And the forest land increased by 561.19 km² in 20 years. The predicting results of land use changes under natural development scenario and farmland protection scenario in 2030 were similar but were much different with the results of ecological protection scenario. ② In 2001, 2011, and 2021, the carbon storage of Hainan Tropical Rainforest National Park was 8.72 × 10⁷ t, 9.22 × 10⁷ t, and 9.13 × 10⁷ t, respectively. In 2030, the carbon storage of Hainan Tropical Rainforest National Park would be 9.04 × 10⁷ t

收稿日期: 2024-03-06

修回日期: 2024-05-07

资助项目: 国家林业和草原局西南调查规划院科技项目“海南热带雨林国家公园建设专题评估”(2023-166)

第一作者: 肖义发(1987—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事自然保护地规划工作。Email: 89058323@qq.com。

under natural development scenario, 9.12×10^7 t under farmland protection scenario, 9.13×10^7 t under ecological protection scenario. These results indicating that the ecological protection measures could improve the ability of carbon storage in Hainan Tropical Rainforest National Park. [Conclusion] The change of carbon storage was highly consistent with the change of land use, and land use change could affect the pattern of carbon storage in Hainan Tropical Rainforest National Park.

Keywords: national park; land use; carbon storage; model; tropical rainforest

气候变暖是全球面临的重大环境问题,严重威胁与影响人类的生存和生活环境。陆地生态系统作为地球三大碳库之一,通过释放和吸收大气中的 CO_2 和 N_2O 等温室气体能有效维持生态平衡,缓解气候变暖^[1]。已有研究表明,土地利用变化会改变陆地生态系统的能量、结构以及生物循环,从而改变土壤和植被固碳能力,进而影响碳储存^[2],对生态系统碳储量和碳循环起着举足轻重的作用^[3]。因此,研究土地利用变化与碳储量的变化关系,进而探索最优土地利用发展方案,对进一步提升区域碳储量具有重要意义。

自然保护地不仅是全球生物多样性保护的重要载体,同时也是全球巨大的碳库^[4]。Maxwell 等^[5]研究表明,2019 年全球自然保护地覆盖的地上生物量碳达到了全球地上生物量碳总量的 23.7%,土壤碳储量达到了全球总量的 14.6%。为应对全球气候变化,2004 年 CBD COP17 首次提出将应对全球气候变化纳入自然保护地保护管理规划当中^[6],之后世界自然保护联盟、世界野生动物保护协会等多个国际重要组织先后发布了将自然保护地纳入应对全球气候变化的方案^[7-8],如 2022 年 IUCN 在呼吁各国在《国家自主贡献》将生态系统碳密度作为自然保护地设立的重要考虑因素之一^[9]。中国于 2009 年在《国务院关于应对气候变化工作情况的报告》中首次指出自然保护区立法和建设是应对气候变化的策略之一^[10],并在 2019 年成为“NbS 联盟”的共同牵头国,通过生物多样性保护实现减排增汇。可见,开展自然保护地碳储量研究对我国履行国际义务,实现“双碳”目标具有重要意义。

基于土地利用模拟陆地生态系统碳储量的变化国内外学者作了大量的研究,如吴先雯等^[11]采用 FLUS(future land use simulation model software)模型和 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型耦合的方法,对江苏省土地利用/土地覆盖及碳储量进行了模拟,研究结果表明建设用、未利用地的扩张侵占耕地是江苏省碳储量下降的主要原因。Wang Ziyao 等^[12]、周汶颖^[13]、张燕等^[3]学者也采用 CA-Markov, SD-PLUS 等土地利用模拟模型与 InVEST 模型耦合的方法预

测区域未来土地利用情况和碳储量变化,探讨基于土地利用的碳储量时空变化规律。以往研究主要结合土地利用模拟模型和 InVEST 模型^[14],对不同的发展情景下土地利用对碳储量的影响进行了研究,这些耦合模型研究热点也主要集中在建模技术、模型规则、建模准确性和政策对未来土地利用格局的“约束”(如保护区、禁建区)作用上,缺乏政策对土地变化的“驱动”和“引导”(开发区规划、交通规划)作用^[3,14]。为解决上述问题,梁迅等^[15]在 2020 年提出 PLUS(patch-generating land use simulation)模型,该模型集成了土地扩张分析策略(land expansion analysis strategy, LEAS)和一种基于多类型随机斑块种子的 CA 模型(CA based on multi-type random patch-seeds, CARS),不仅具有模拟精度高,数据处理快的优点,而且还能有效的弥补 CA-Markov, FLUS 等模型斑块反演能力不足,以及难以确定土地利用变化潜在驱动因素等缺点,从而更准确的预测未来不同情景下土地变化格局^[16],近年来已被众多学者应用到省、市、流域、自然保护地^[17]等不同尺度上的土地利用变化与碳储量之间的关系研究上。

海南热带雨林国家公园是中国首批设立的 5 个国家公园之一,国家公园内分布着中国连片面积最大的热带雨林生态系统,固碳潜力巨大。土地利用/覆被变化是陆地生态系统碳储量变化的重要原因^[2],方赞山等^[17]利用土地利用数据(LULC)和碳密度对 1980—2000 年海南岛生态系统碳储量研究发现,建设用地侵占林地是海南岛碳储量降低的主要原因。张育成等^[18]对海南岛中部山区碳储量时空变化研究发现,2000—2018 年期间导致海南中部山区碳储量下降的主要原因是高碳密度的林地被低碳密度的建设用地侵占。对海南热带雨林国家公园碳储量的研究目前主要还集中在土壤、植被碳储量估算和空间分布格局上^[19-20],对土地利用变化引起的碳储量变化,以及碳储量时空变化趋势和演变特征却还未开展相关的研究。鉴于此,本研究以 2001, 2011, 2021 年全球 30 m 地表覆盖数据为基础,采用 PLUS 模型和 InVEST 模型研究海南热带雨林国家公园土地利用变化及碳储量变化特征,并模拟不同情景下的海南热带雨林国家公园未来土地利用及碳储量变化,以期为

海南热带雨林国家公园保护管理、土地利用结构调整提供科学参考。

1 研究区概况

海南热带雨林国家公园位于海南岛中部,东至万宁市、西至东方市、南至保亭黎族苗族自治县、北至白沙黎族自治县,是中国纬度最低的国家公园,总面积 4 269 km²。海南热带雨林国家公园属于热带海洋性季风气候,区内年均气温在 22.5~26.0 °C 之间,年降水量约 1 700~2 700 mm。海南热带雨林国家公园拥有中国分布最集中、保存最完整、连片面积最大的热带雨林,区内共记录有野生维管植物 3 653 种,野生陆生脊椎动物 540 种,是中国生物多样性和遗传资

源的重要宝库,也是海南长臂猿(*Nomascus hainanus*)在全球范围唯一的栖息地^[21]。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究以 2001,2011,2021 年全球 30 m 地表覆盖数据为基础,通过重分类将其分为耕地、林地、草地、水域、人造地表 5 类。由于土地利用数据变化不是由单一因子决定,而是由多重驱动因素共同作用和影响的结果^[16],因此本研究综合考虑研究区域自然环境和社会经济条件对土地利用的影响,分别选取高程、坡度、人口、年平均气温等 12 个因素来模拟未来的土地利用变化情况,具体数据来源及信息详见表 1。

表 1 数据信息及来源

Table 1 List of data information and sources

数据类型	数据名称	数据来源
基础数据	土地利用数据	GlobeLand30(http://www.globallandcover.com/)
	行政边界数据	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
社会经济数据	人口	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	GDP	
气候与环境数据	DEM 高程	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	计算生成
	土壤类型	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	年平均降水	
年平均温		
交通与水系数据	到一级道路的距离	全国地理信息资源目录服务系统(https://www.webmap.cn/main.do?method=index)
	到二级道路的距离	
	到三级道路的距离	
	到四级道路的距离	
	到河流的距离	

为保证数据空间一致性,本研究采用 ArcGIS 对数据进行规范化处理,统一投影坐标为 CGCS2000_3_Degree_GK_CM_111 E,同时保证行列号一致,并将分辨率重采样至 30 m×30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 基于 PLUS 模型的土地利用模拟 PLUS 模型是一个基于栅格数据的可用于斑块尺度土地利用/土地覆盖(LULC)变化模拟的元胞自动机(CA)模型^[2]。通过提取两期土地利用变化数据间各类用地扩张部分,采用随机森林算法计算土地利用扩张与驱动因素系之间的关系来揭示土地利用的特征,从而模拟土地斑块的变化^[15]。

(1) 多情景设定。因土地利变化受多种因素影响^[16],结合土地及国家公园管理相关政策和要求,本研究设置自然发展、耕地保护和生态保护 3 种发展情景。

①自然发展情景。自然发展情景不考虑各种规划、政策、法律法规对土地利用变化的约束,依据 2001—2021 年土地利用变化规律,采取 Markov chain 模型预测功能对 2030 年未来土地利用变化进行模拟^[22]。

②耕地保护情景。耕地安全是中国粮食安全的基础,耕地保护也是中国必须长期坚持的一项基本国策。本研究结合耕地保护政策趋势,将耕地向建设用地转移的概率减少 60%^[23],预测 2030 年耕地保护情景下海南热带雨林国家公园土地利用。

③生态保护情景。该情景侧重于生态保护,在自然发展的基础上,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%^[24],预测 2030 年生态保护情景下海南热带雨林国家公园土地利用。

(2) 转移矩阵。转移矩阵表示不同土地利用类型转换规则,当一种地类限制转换成另一种地类时其值为 0,反之则为 1。本研究针对 3 种不同发展情景设置的转移矩阵见表 2。

表 2 不同发展情景设置的土地利用类型转移矩阵

Table 2 Land use types transfer matrix under different development scenarios

土地利用类型	自然发展情景					耕地保护情景					生态保护情景				
	耕地	林地	草地	水域	人造地表	耕地	林地	草地	水域	人造地表	耕地	林地	草地	水域	人造地表
耕地	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
林地	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
水域	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
人造地表	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1

2.2.2 基于 InVEST 模型的碳储量估算

(1) 碳储量计算。本研究采用 InVEST 3.12.1 模型中的 Carbon Storage and Sequestration 模块,对海南热带雨林国家公园碳储量进行计算。在 InVEST 模型碳储量模块中,生态系统碳储量分为地上碳储量、地下碳储量、土有碳储量和死亡有机质碳储量等 4 个部分^[25],其计算公式为:

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

式中: C_{total} 为总碳储量; C_{above} 为地上碳储量; C_{below} 为地下碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量; C_{dead} 为死亡有机质碳储量。

(2) 碳密度数据。InVEST 模型碳储量计算需依据各类土地类型碳密度来计算区域生态系统碳储量。为保证碳密度数据的准确确定,本研究尽量选取海南热带雨林国家公园、海南岛及邻近省范围内的碳密度数据。耕地碳密度数据引用段璇瑜^[26]林彤等^[27]研究成果;刘强等^[19]研究表明,海南热带雨林国家公园林地的地上、地下、土壤和死亡有机质碳密度分别为 72.82, 23.10, 120.92, 1.55 t/hm²;段璇瑜^[28]研究表明,海南草地地上、地下、土壤和死亡有机质碳密度分别为 26.39, 113.5, 10.08, 0.24 t/hm²;人造地表碳密度数据来自段璇瑜^[26]的研究成果。土地碳密度数据详见表 3。

表 3 不同土地利用类型碳密度

Table 3 Carbon density of different land use types t/hm²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机质
耕地	20.92	2.98	10.94	—
林地	72.82	23.10	120.92	1.55
草地	26.39	113.5	10.08	0.24
水域	—	—	—	—
人造地表	16.94	—	22.37	—

3 结果与分析

3.1 基于 Plus 模型对土地利用分布的模拟及预测

3.1.1 2001—2021 年土地利用变化分析 以 2001 年与 2011 年的数据为基础,采用 PLUS 模型对 2021 年土地利用进行模拟,并与 2021 年真实土地利用数据进行比较,得到模拟总精度为 86%,kappa 系数为 0.75%,可见模拟精度较高,具有一定的可靠性,可用于未来土地利用预测模拟。

从图 1 可以看出,海南热带雨林国家公园以林地为主,占总面积的 97%以上,耕地、草地、水域、人造地表分别占 0.61%,0.06%,1.53%和 0.02%。从海南热带雨林国家公园土地利用格局变化来看,2001—2011 年大量草地转为林地,10 a 间减少了 546.44 km²,减幅达到 99.54%,此阶段为土地利用变结构变化的主要时期,2011—2021 年研究区土地利用结构则变化不明显。

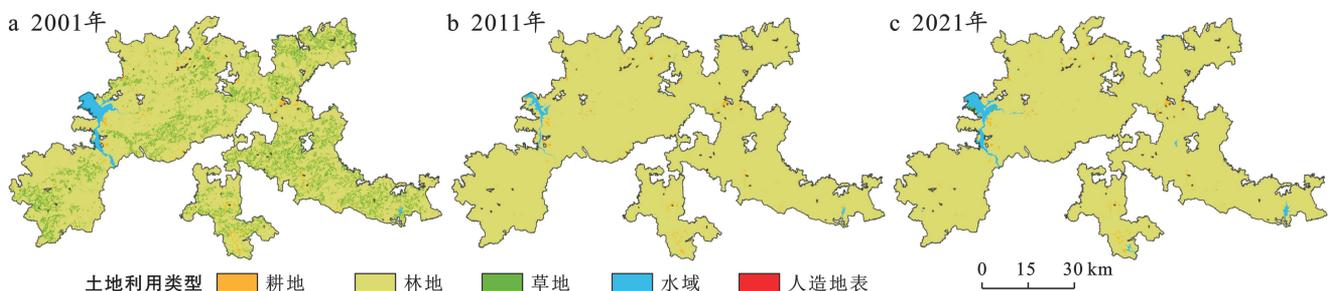


图 1 2001—2021 年海南热带雨林国家公园土地利用类型变化

Fig.1 Change in land use types in Hainan Tropical Rainforest National Park from 2001 to 2021

由表 4 可知,2001—2021 年海南热带雨林国家公园土地转移的面积为 580.69 km²,占研究区土地利用总面积的 13.60%,其中草地转出面积最大 548.86 km²,占转出总面积的 94.52%,林地转入面积最多 568.75 km²,占转入总面积的 94.94%,导致土地利用结构变化的主要原由是:①海南省通过设立自然

保护区、自然公园等各类自然保护地加强区域保护,特别是 2019 年海南热带雨林国家公园试点以来,海南出台了《海南热带雨林国家公园条例(试行)》等法律法规,使区域管理制度化、法制化;②全省通过开展天然林保护、人工造林、封山育林等工程措施,推进了生态系统自然或人为更新,从而推进草地向林地转变。

表 4 2001—2021 年海南热带雨林国家公园土地利用类型转移矩阵

Table 4 Land use types transfer matrix in Hainan Tropical Rainforest National Park from 2001 to 2021

km²

土地利用类型	2021 年					总和	转出面积
	耕地	林地	草地	水域	人造地表		
耕地	23.99	9.22	—	0.18	—	33.39	9.40
林地	1.63	3 605.32	0.12	5.51	0.36	3 612.94	7.62
草地	0.02	547.28	0.10	1.53	0.03	548.96	548.86
水域	0.25	12.08	2.3	58.25	—	72.88	14.63
人造地表	0.01	0.17	—	—	0.65	0.83	0.18
总和	25.90	4 174.07	2.52	65.47	1.04	4 269	—
转入面积	1.91	568.75	2.42	7.22	0.39	—	580.69

3.1.2 基于 PLUS 模型的 2030 年土地利用预测结果与分析 通过设置不同的成本矩阵与邻域因子,利用 2011 年和 2021 年土地利用数据预测不同情景下的 2030 年土地利用情况(见表 5)。研究表明,3 种不同情景下的土地利用格局存在一定的差异。在自然发展情景下,耕地增加 0.65 km²,草地增加 0.66 km²,水域增加 37.87 km²,人造地表增加 0.22 km²,而林地则相反,面积呈下降趋势,较 2021 年减少 39.40 km²,降幅为 0.94%,主要是向水域转移。在耕地保护情景下,耕地增加了 0.74 km²,林地减少了 2.44 km²,草地

增加了 0.82 km²,水域增加 0.68 km²,人造地表增加 0.2 km²,可见严格落实耕地保护政策,严格管控耕地用途,能有效地保护耕地安全,在该情景下虽然对耕地实施保护,但却增加了林地向草地、水域、人造地表扩张的可能性。在生态保护情景下,耕地减少 0.23 km²,林地增加 0.63 km²,草地减少 0.65 km²,水域增加 0.69 km²,人造地表减少 0.44 km²,在该情景下林地、水域等生态系统得到了扩张,且使耕地、草地、人造地表扩张率得到抑制,符合国家公园土地利用发展方向。

表 5 不同情景下海南热带雨林国家公园土地利用类型面积与变化率

Table 5 Areas and change rates of land use types under different scenarios in Hainan Tropical Rainforest National Park

土地利用类型	2021 年	2030 年自然发展情景		2030 年耕地保护发展情景		2030 年生态保护发展情景	
	面积/km ²	面积/km ²	变化率/%	面积/km ²	变化率/%	面积/km ²	变化率/%
耕地	26.47	27.12	2.46	27.21	2.80	26.24	-0.87
林地	4 172.81	4 133.41	-0.94	4 170.37	-0.06	4 173.44	0.02
草地	2.55	3.21	25.88	3.37	32.16	1.90	-25.49
水域	65.99	103.86	57.39	66.67	1.03	66.68	1.05
人造地表	1.18	1.40	18.64	1.38	16.95	0.74	-37.29

从 3 种情景预测结果来看,在自然发展和耕地保护情景下,耕地、草地、人造地表、水域保持着增长趋势,在生态保护情景下,耕地、草地、人造地表、水域的扩张率被一定程度抑制,而林地、水域则有一定程度的扩张,符合国家公园土地利用发展方向,与海南热带雨林国家公园发展目标一致。虽然生态保护情景更符合海南热带雨林国家公园土地利用发展方向,但耕地面积减少较多,因此在未来生态保护情景下,应严格落实耕地保护政策,加强耕地保护,确保稳定。

3.2 碳储量变化评估

3.2.1 2001—2021 年碳储量变化分析 利用 InVEST 模型计算得到 2001—2021 年海南热带雨林国家公园 3 期碳储量数据分别为 8.72×10⁷ t,9.22×10⁷ t,9.13×10⁷ t,碳储量变化差异显著(表 6)。2001—2011 年期间,研究区总碳储量增加 5.00×10⁶ t,相较于 2001 年增幅约 5.73%,增加的主导因素为大量的草地向林地转换,此过程增加碳储量为 4.90×10⁶ t,约占 2001—2011 期间增长碳储量总量的 98%。

2011—2021 年期间,林地转化为耕地、草地、人造地表的转化强度加强,较 2011 年损失碳储量 9.00×10^5 t,其中林地—耕地转化损失碳储量 3 000 t,林地—草地转化损失碳储量 4.00×10^4 t,林地—人造地表转换损失碳储量 1 000 t。

2001—2021 年海南热带雨林国家公园碳储量空

间分布如图 2 所示。2001—2011 年碳储量变化呈大聚集、散分布的特点,这一时期草地、水域向林地扩张剧烈,各区域碳储量增加均较为明显。2011—2021 年碳储量变化主要分布在林地、耕地、草地、人造地表的转移区,变化并不明显,但在空间上仍有差异性,如大广坝水库、小妹水库等区域仍有一些的变化。

表 6 2001—2021 年海南热带雨林国家公园不同土地利用类型碳储量

Table 6 Carbon storage of different land use types in Hainan Tropical Rainforest National Park during 2001—2021

土地利用类型	2001 年		2011 年		2021 年	
	碳储量/ 10^7 t	比例/%	碳储量/ 10^7 t	比例/%	碳储量/ 10^7 t	比例/%
耕地	0.01	0.12	0.01	0.11	0.01	0.11
林地	7.89	90.48	9.21	99.89	9.11	99.78
草地	0.82	9.4	0.000 3	0.003	0.004	0.04
水域	—	—	—	—	—	—
人造地表	0.000 04	0.000 5	0.000 3	0.003	0.006	0.07
总碳储量	8.72	100.00	9.22	100.00	9.13	100.00

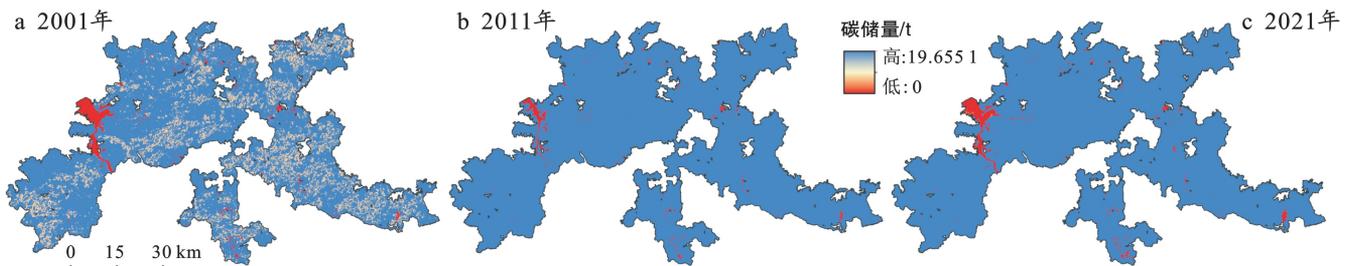


图 2 2001—2021 年海南热带雨林国家公园碳储量空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of carbon storage in Hainan Tropical Rainforest National Park from 2001 to 2021

3.2.2 不同情景下碳储量预测分析 通过 Plus 和 InVEST 模型估算出海南热带雨林国家公园 3 种不同情景下的碳储量。

从图 3 可以看出,碳储量高的区域主要分布在林区,碳储量低的区域分布在村庄、水域等区域,这与土地利用数据情况一致。2030 年在自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景下模拟的海南热带雨林国家公园碳储量分别为 9.04×10^7 t, 9.12×10^7 t, 9.13×10^7 t。在自然发展情景下,2030 年总碳储量较 2021 年减少 9.00×10^5 t,导致碳储量减少的主要原因是因为林地被转移,林地碳储量减少 8.00×10^5 t。

在耕地保护情景下,2030 年总碳储量较 2021 年减少了 4.00×10^4 t,其中林地减少 5.00×10^4 t,耕地、草地、水域、建设用地分别增加 3 000, 10 000, 800 t。在生态保护情景下,2030 年总碳储量较 2021 年增加了 2 000 t,较自然发展情景增加了 9.00×10^5 t,较耕地保护发展情景增加了 4.00×10^4 t。可见,生态保护情景相对于其他情景碳储量明显升高,这主要是由于在生态保护情景下,限制了林地向其他地类转移,同时增加了耕地、草地、人造地表等地类向林地转移概率,使林地得到进一步的扩张,进而提升了区域总碳储量。

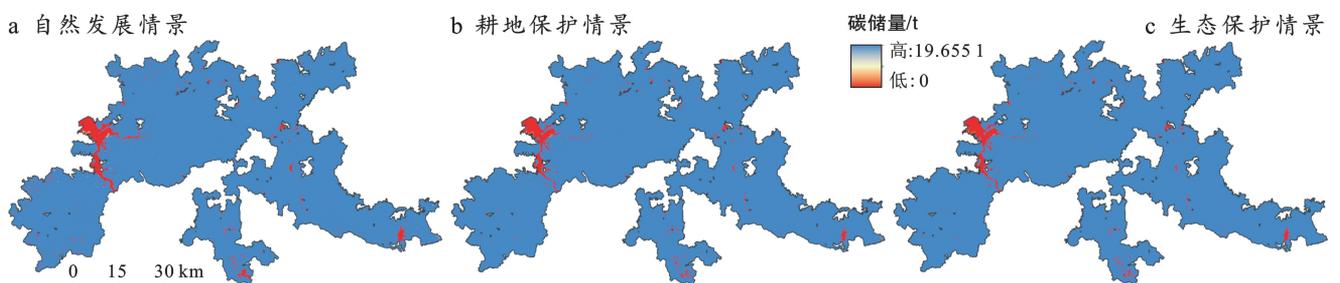


图 3 2030 年海南热带雨林国家公园不同情景下碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon storage under different scenarios in Hainan Tropical Rainforest National Park in 2030

3.3 土地利用变化对碳储量的影响

根据 2001—2021 年的土地利用转移矩阵和不同地类之间的碳密度值,计算土地利用变化引起的碳储量变化^[24]。由于不同土地类型转移面积,以及植被、土壤、死亡有机质的碳密度存在差异,故土地利用变对碳储量造成的影响也不尽相同。2001—2021 年期间,海南热带雨林国家公园耕地转出导致碳储量增加 2.00×10^5 t,主要是因为退耕还林等林地保护政策和人工造林等工程的实施使耕地向林地转移,从而增加了总碳储量。林地转出造成总碳储量的损失为 2.00×10^5 t,主要是因为受人为干扰等因素的影响,林地 向耕地、草地、水域、人造地表等进行了转移,而林地具有较强的固碳能力,其向任何地类转移都不利于碳储量的封存,故导致林地总碳储量减低。草地是减幅最大的土地利用类型,但草地转出却使总碳储量增加了 3.70×10^5 t,这是因为草地转为了碳密度更高的林地,且转移面积较大,从而促进了总碳储量的增加。本研究将水域的碳密度设置为 0,因此水域向其他土地利用类型转移都有利于碳储量的增加,水域转出共计增加总碳储量增加了 3.00×10^5 t。人造地表转成耕地、林地总碳储量增加 3 000 t。

2001—2021 年土地利用变化导致海南热带雨林国家公园总碳储量增加了 4.00×10^5 t,生态系统正向演变(耕地、草地、人造地表转为林地,人造地表转为耕地,耕地转为水域)引起的碳储量增量为 4.20×10^5 t,生态系统逆向演变(林地转草地、耕地、人造地表,草地转耕地、人造地表,水域转耕地)引起的碳储总量减量为 4.00×10^4 t。可见,2001—2021 年海南热带雨林国家公园碳储量的增加,主要是因为生态系统正向演变使得碳密度低的土地利用类型向碳密度高的土地利用类型转化,从而使植被覆盖面积增加,总碳储量增加。

4 讨论

(1) 碳储量时空变化及影响因素。本研究利用 PLUS 和 InVEST 模型评估了 2001—2021 年海南热带雨林国家公园土地利用变化对碳储量的影响,并模拟了自然发展、耕地保护、生态保护 3 种情景下土地利用结构与碳储量变化。研究结果表明,2001—2021 年海南热带雨林国家公园碳储量呈“先增后减”趋势,2001—2011 年碳储量增加幅度较大,总计增加了 5.00×10^6 t,这主要是由于 20 世纪 80 a 海南省陆续实施了“生态立省”“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”“自然保护地设立”等一系列生态保护工程和土地管理政策,促进了

生态系统正向演变,增加了植被覆盖率,使低碳密度的土地利用类型向高碳密度的土地利用类型转变,从而增加了碳储量,这与方赞山等^[17]对海南岛生态系统碳储量时空演变与预测研究结果一致。2011—2021 年期间海南热带雨林国家公园碳储量呈下降趋势,但减幅较小,较 2011 年减少 9.00×10^5 t,导致碳储量减少的主要原因是进入 21 世纪,海南省城镇建设进入高峰期,受城镇化扩张侵占等影响,碳密度较高的林地 向水域、建设用地发生了转移,这一时段的碳储量变化情况与众多学者研究结果一致^[18,29]。

(2) 未来发展与建议。本研究中自然发展情景下土地利用转化趋势为高密度地类向低密度地类转换,致使林地 向耕地、水域、人造地表转换;耕地保护情况更专注于耕地的保护,而忽略了对林地、草地的保护,从而造成区域碳储总量损失,而生态保护情景下,由于《海南热带雨林国家公园管理条例》和森林法等保护政策法规的实施,使得林地转入概率增加,该情景下碳储量维持在相对较高的水平,这与傅楷翔^[29]利用 PLUS-InVEST-Geodector 模型预测新疆地区 2035 碳储量预测结果一致。因此,海南热带雨林国家公园应该继续实施天然林保护、绿化宝岛、封山育林等生态保护政策,促进生态系统正向演变,不断提升区域碳储总量。此外,目前我国还未建立起国家公园碳交易机制,应加强国家公园碳汇功能研究、鼓励建立国家公园碳汇交易机制和平台,有效识别并充分发挥国家公园碳汇功能,提升国家公园在实现“双碳”目标中的作用。

(3) 不确定性分析。本研究采用 PLUS 对海南热带雨林国家公园未来土地利用变化进行了模拟,模拟结果能够清晰地反映两者在数量和空间上的关系,对优化生态系统功能、制定土地管理措施等具有一定的参考意义。虽然模型拟合效果较好,拟合精度也能满足要求,但还存在一定的局限性。首先本次研究仅选择了人口、坡度、年平均温、道路等 12 个因子作为土地利用变化驱动因素,现实中对土地利用变化的影响因素实际上可能会更多^[30],如政策因素、坡向、到居民点距离等均未在模型中得到考虑;其次与多数前人研究一样^[21,31],模型中的转移矩阵值、邻域权重等值的设定,多数是通过模型指南、前人研究成果以及反复试验所得,部分计算数据受个人经验和主观意识影响,会对模拟精度造成一定的影响,导致模拟土地利用与真实土地利用存在一定的差异。再者,在自然发展、耕地保护和生态保护 3 种情景下对未来土地利用类型的预测时,也无法对未来政策进准确预测,对未来规划也无法进行量化,而 PLUS 模型是基于过去

土地扩张趋势结合设定的特定的预测规则对未来土地利用类型进行预测,那么预测结果可能会与未来土地利用产生一定的偏差^[32]。此外,本研究中 InVEST 模型使用的碳密度数据是基于文献获得,且只考虑不同地类的碳密度,而未考虑碳密度受地形、气候、植被类型等多种因素的影响和波动以及人为类活动对碳密度的影响等^[33],这也势必会对拟合结果造成一定的影响,因此在今后的研究中应开展碳密度实地调研,并综合考虑各种碳密度影响因素,从而提高模型估算的准确性。

5 结论

本研究采用 PLUS 模型和 InVEST 模型相结合的方法,评估了海南热带雨林国家公园 2001—2021 年的土地利用及碳储量变化,并模拟评估了自然发展、耕地保护和生态保护 3 种发展情景下 2030 年土地利用及碳储量。得出以下结论:

(1) 2001—2021 年海南热带雨林国家公园土地利用变化特征为耕地、草地、水域向林地、人造地表转移,其中草地向林地转移面积最大。

(2) 2001—2021 年海南热带雨林国家公园碳储量分别为分 8.72×10^7 t, 9.22×10^7 t 和 9.13×10^7 t, 碳储量变化差异显著。2001—2011 年碳储量变化在空间上呈大聚集、散分布的特点,2011—2021 年碳储量在空间上变化不是很明显,但仍有差异性。

(3) 到 2030 年,自然发展情景、耕地保护情景下碳储量分别下降了 9.00×10^5 t 和 4.00×10^4 t, 生态保护情景较其他 2 种情景能有效地增加碳储量、减少碳储量的损失。

(4) 海南热带雨林国家公园碳储量变化与土地利用变化呈高度一致性,土地利用变化很大程度上决定了碳储总量及空间分布。

参考文献 (References)

- [1] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [2] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(2): 300-314.
Luo Shuqi, Hu Xiaomeng, Sun Yuan, et al. Multi-scenario land use change and its impact on carbon storage based on coupled Plus-Invest model [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 300-314.
- [3] 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.
Zhang Yan, Shi Xueyi, Tang Qian. Carbon storage assessment in the upper reaches of the Fenhe River under different land use scenarios [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 360-373.
- [4] 王方邑, 赵智聪, 王沛, 等. 中国自然保护区碳中和贡献的初步评估及三个关键研究课题[J]. *中国园林*, 2023, 39(3): 6-13.
Wang Fangyi, Zhao Zhicong, Wang Pei, et al. The preliminary assessment and three key issues of carbon neutrality contribution of protected areas in China [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2023, 39(3): 6-13.
- [5] Maxwell S L, Cazalis V, Dudley N, et al. Area-based conservation in the twenty-first century [J]. *Nature*, 2020, 586(7828): 217-227.
- [6] 杨蕾, 杨立, 李婧昕, 等. 东北地区 5 个物种潜在栖息地变化与优化保护规划[J]. *生态学报*, 2019, 39(3): 1082-1094.
Yang Lei, Yang Li, Li Jingxin, et al. Potential distribution and conservation priority areas of five species in Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 1082-1094.
- [7] WWF International. Management Effectiveness Tracking Tool: Reporting Progress at Protected Area Sites: Second Edition [EB/OL]. (2007-07) [2021-11-22]. https://wwf-feu.awsassets.panda.org/downloads/mett2_final_version_july_2007.pdf.
- [8] GROSS, J E, WOODLEY S, WELLING L A. Adapting to Climate Change: Guidance for Protected Area Managers and Planners [M/OL]. Gland: IUCN, 2016: xviii, 129. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/PAG-024.pdf>.
- [9] IUCN. Protected Areas and Climate Change [EB/OL]. (2022-07-21) [2022-11-30]. https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-7/protected_areas_and_climate_change_briefing_paper_december_2019-final.pdf.
- [10] 钟乐, 赵智聪, 王小珊, 等. 基于气候变化与生物多样性协同的中国自然保护区建设路径[J]. *风景园林*, 2022, 29(6): 56-62.
Zhong Le, Zhao Zhicong, Wang Xiaoshan, et al. Construction path of protected areas in China based on the synergy of climate change response and biodiversity conservation [J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(6): 56-62.
- [11] 吴先雯, 郭风成. 基于 Invest 模型和 Flus 模型的江苏省碳储量变化模拟与预测[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(2): 230-239.
Wu Xianwen, Guo Fengcheng. Analysis and prediction of carbon storage changes in Jiangsu Province based on the Invest model and Flus model [J]. *Chinese Journal*

- of Eco-agriculture, 2024, 32(2):230-239.
- [12] Wang Ziyao, Li Xin, Mao Yueting, et al. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134:108499.
- [13] 周汶颖. 基于 Logistic-CA-Markov 和 InVEST 模型的上海市土地利用与碳储量时空演化及预测[D]. 上海: 上海师范大学, 2023.
Zhou Wenying Analysis and prediction of land use and carbon storage in Shanghai based on the Logistic-CA-Markov model and InVEST model [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2023.
- [14] 胥丽, 罗绍龙, 国朝胜, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的西双版纳碳储量变化研究[J]. *三峡生态环境监测*, 2023, 8(2):75-87.
Xu Li, Luo Shaolong, Guo Chaosheng, et al. Carbon storage change in Xishuangbanna based on PLUS and InVEST model [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2023, 8(2):75-87.
- [15] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85:101569.
- [16] 尹珂, 廖思雨. 基于 InVEST 模型和 Plus 模型的三峡库区(重庆段)碳储量时间变化及预测[J/OL]. *长江科学院院报*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20231229.1321.002>.
Yin Ke, Liao Siyu. Spatial and temporal variability and prediction of carbon stocks in the Three Gorges reservoir area (Chongqing section) based on the InVEST-PLUS model [J/OL]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20231229.1321.002>.
- [17] 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.
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.
- [18] 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.
Zhang Yucheng, Han Nianlong, Hu Ke, et al. The impact of land-use changes on the spatio-temporal variation of carbon storage in the central mountainous area of Hainan Island [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(2):115-122.
- [19] 刘强, 周璋, 陈德祥, 等. 海南热带雨林国家公园森林生态系统碳储量及变化特征[J]. *自然保护地*, 2023, 3(4):1-10.
Liu Qiang, Zhou Zhang, Chen Dexiang, et al. Carbon storage and its change characteristics of forest ecosystems in National Park of Hainan tropical rainforest, China [J]. *Natural Protected Areas*, 2023, 3(4):1-10.
- [20] 吴慧. 海南岛热带雨林西部天然林土壤有机碳分布特征及其影响因素研究[D]. 海南 海口: 海南师范大学, 2023.
Wu Hui Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in natural forests in the west-erntropical rainforest of Hainan Island [D]. Haikou, Hainan: Hainan Normal University, 2023.
- [21] 吴庭天, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 海南热带雨林代表性种群空间分布特征研究[J]. *林草资源研究*, 2023(5):133-141.
Wu Tingtian, Chen Yiqing, Chen Zongzhu, et al. Analysis on the spatial distribution characteristics of representative populations in tropical rainforest of Hainan [J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 2023(5):133-141.
- [22] 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.
- [23] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟: 以汉中市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10):86-95.
Yang Shuo, Su Hao, Zhao Guoping. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10):86-95.
- [24] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(1):378-387.
Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1):378-387.
- [25] Zhang Fan, Zhan Jinyan, Zhang Qian, et al. Impacts of

- land use/cover change on terrestrial carbon stocks in Uganda [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101:195-203.
- [26] 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.
- Duan Xuanyu, Gong Wenfeng, Sun Yuxin, et al. Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5):301-311.
- [27] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测: 以广东省为例[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10):4827-4839.
- Lin Tong, Yang Muzhuang, Wu Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10):4827-4839.
- [28] 段璇瑜. 海南岛海岸带土地利用/覆盖变化及其对碳储量影响的评估预测[D]. 海口: 海南大学, 2023.
- Duan Xuanyu. Land use/cover change and its impact on carbon storage in Hainan Island coastal zone [D]. Haikou, Hainan: Hainan University, 2023.
- [29] 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的新疆地区碳储量时空变化及驱动机制分析[J/OL]. *环境科学*. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202309230>.
- FU Kaixiang, JIA Guodong, YU Xinxiao, et al. Analysis of Temporal and Spatial Carbon Stock Changes and Driving Mechanism in Xinjiang Region by Coupled PLUS-InVEST-Geodector Model[J/OL]. *Environmental Science*. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202309230>.
- [30] 陈竹安, 柳雪. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量时空变化与多情景模拟预测: 以江西省为例[J]. *上海国土资源*, 2023, 44(4):146-153.
- Chen Zhu'an, Liu Xue. Spatio-temporal variation and multi-scenario prediction of carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study of Jiangxi Province [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2023, 44(4):146-153.
- [31] 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 Yue, Wang Liuzhu, Gui Feng, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay area based on InVEST and PLUS models [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6):3343-3352.
- [32] 王子昊, 王冰, 张宇飞, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的呼和浩特多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J/OL]. *农业资源与环境学报*. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0249>.
- Wang Zihao, Wang Bing, Zhang Yufei, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model [J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0249>.
- [33] 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(3):777-794.
- He Lei, Ye Siyuan, Zhao Guangming, et al. Research progress on blue carbon management in coastal wetland ecotones [J]. *Geology in China*, 2023, 50(3):777-794.