

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

段璇瑜^{1,2}, 龚文峰^{1,2}, 孙雨欣^{1,2}, 刘铁冬^{1,2}, 邱新彩^{1,2}, 张阳阳^{1,2}

(1.海南大学 林学院, 海南 海口 570228; 2.海南大学 智慧林业重点实验室, 海南 海口 570228)

摘要: [目的] 预测未来土地利用/覆盖变化(LULCC)及其对生态系统碳储量的影响,为区域土地利用决策和碳管理提供科学依据。[方法] 基于 30 m 分辨率的海南岛 1990, 2000, 2010, 2020 年土地利用遥感解译数据,运用 ArcGIS 与 InVEST 模型,探究土地利用时空演变及碳储量响应状况,并引入 GeoSOS-FLUS 模型预测研究区 2030 年土地利用多情景变化特征及其对未来不同情景下生态系统碳储量的影响机制。[结果] ①1990—2020 年研究区耕地、林地、草地和未利用地面积减少,水域和建设用地面积增加。未利用地和耕地面积持续减少,建设用地面积持续增加。②30 a 间 LULCC 导致区域碳储量持续减少,达到 1.50×10^6 t 且年变化率为 5.00×10^4 t/a。建设用地的大肆扩张及林地退化是导致碳储量下降的重要原因,“未利用地→草地”为碳储量增加中最明显的图谱变化,“草地→林地(人工林地)”是碳储量减少中最显著的图谱变化。③2020—2030 年的 3 种预测情景中,林地仅在生态优先情景下得到了有效保护,且面积增加了 11.91 km²。建设用地在 3 种预测情景中均呈现不同程度扩张态势,且发展优先情景涨幅最大。[结论] 海南岛大面积高碳密度的天然草地转换为低碳密度的人工林地,高碳区转变为低碳区,区域固碳能力削弱。应采取提高林地、草地等地类比重等一系列的土地利用调控政策,加大区域碳源向碳汇转换的优化发展。

关键词: 海岸带; GeoSOS-FLUS 复合模型; InVEST 模型; 碳储量; 情景模拟; 海南岛

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0301-11

中图分类号: F301.2, X87

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220922.003; 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.

Land Use Change and Its Impact on Temporal and Spatial Evolution of Carbon Storage in Coastal Zone of Hainan Island

Duan Xuanyu^{1,2}, Gong Wenfeng^{1,2}, Sun Yuxin^{1,2}, Liu Tiedong^{1,2}, Qiu Xincail^{1,2}, Zhang Yangyang^{1,2}

(1.College of Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China;

2.Intelligent Forestry Key Laboratory of Haikou City, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: [Objective] The future land use and land cover change (LULCC) and its impact on ecosystem carbon storage were predicted in order to provide a scientific basis for regional land use decision-making and carbon management. [Methods] Based on the quantitative analysis of 30 m resolution remote sensing images of Hainan Island in 1990, 2000, 2010, and 2020, the spatio-temporal evolution of land use and its impact on carbon storage were analyzed. Combined with geographic information system (GIS) spatial superposition analysis, the spatial patterns and mechanisms of land use changes in coastal zones and the impacts of complex

收稿日期: 2022-04-11

修回日期: 2022-05-23

资助项目: 海南省高层次人才项目“海南中部山区红壤中低山丘陵区土地利用/土地覆盖变化对水土流失响应机理及驱动机制研究”(621RC507); 国家自然科学基金项目(32160364); 中国气象局海南生态环境监测项目(ZQC-J20142)

第一作者: 段璇瑜(1999—), 女(汉族), 江西省九江市人, 硕士研究生, 研究方向为 RS 和 GIS 在资源环境监测与评价应用。Email: xuanyudu-an@hainanu.edu.cn.

通信作者: 龚文峰(1976—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境遥感与 GIS 应用等方面研究。Email: gwf101@163.com.

land use changes on tropical and subtropical coastal zones were assessed. The InVEST model was used to estimate carbon storage in Hainan Island's coastal zone. The estimation was further linked to the GeoSOS-FLUS model to predict the distribution characteristics of multi-scenario land use changes in the study area in 2030, and to analyze the influence mechanism on ecosystem carbon storage under different future scenarios. [Results] ① From 1990 to 2020, the areas of cropland, forest land, grassland, and unused land in the study area decreased, while the areas of water and built-up land increased. Among them, the areas of unused land and cropland consistently decreased every year, while the area of built-up land increased year by year. ② Land use/cover change led to a continuous decrease in carbon storage for the study area, reaching 1.50×10^6 t with a decline rate of 5.00×10^4 t/a over the past 30 years. The increase in built-up land and the decline in forestland were the key causes for the decrease in carbon storage. The increase in carbon storage due to the transformation from unused land to grassland was the most significant change, with an increase of 1.25×10^5 t. On the other hand, the change from grassland to forest land (artificial forest land) was the most prominent cause for the decrease in carbon storage, accounting for a decrease of 5.68×10^5 t. ③ Predicted carbon storage in the Hainan Island coastal zone based on the FLUS model was evaluated. The accuracy met the research requirements verified by historical data. Among the three prediction scenarios, forestland will be effectively protected by 2030 only under the ecological priority scenario with an increase in area of 11.91 km^2 . Built-up land will increase to different degrees under the three scenarios, and the development priority scenario had the largest increase. [Conclusion] A large area of natural grassland with high carbon density on Hainan Island has transformed into artificial forest land with low carbon density, and the high carbon area has transformed into a low carbon area, which weakened the regional carbon sequestration ability. A series of land use regulation policies should be adopted to increase the proportions of woodland, grassland, and other land types, and to optimize the transformation of regional carbon sources into carbon sinks.

Keywords: coastal zone; GeoSOS-FLUS; InVEST; carbon storage; multi-scenario simulation; Hainan Island

陆地生态系统中的碳是全球碳储量的重要组成部分^[1],其碳储量在全球碳循环和气候变化中起着非常重要的作用。土地利用/覆被变化是人类活动与生态环境之间联系最紧密的部分^[2],被认为是导致全球陆地生态系统碳储量变化的最重要因素之一^[3-4]。人类活动通过不同土地利用方式改变陆地生态系统原有模式、结构、过程和功能,致使地表的生态环境遭受严重破坏,直接或间接地影响区域生态系统碳循环过程及气候变化进程^[5]。因此,定量评估生态系统碳储量的演变对于改善区域生态系统服务功能及减缓气候变化具有重要意义^[6],引发了关于土地利用方式对碳循环影响的研究。目前,用于估算陆地生态系统碳储量的方法主要有经验统计模型^[7-8]、遥感模型^[9-10]和 IPCC 清单法等^[11]。近年来,评估碳储量对 LULCC 的响应机制主要是借助 InVEST 模型(integrated valuation of ecosystem services and trade offs),该模型具有使用简单、参数灵活、结果相对准确等优点^[12],已被众多学者广泛应用于评估区域碳储量及其时空分布格局^[13-14]。部分学者将 InVEST 模型和土地利用模拟模型(CA-Markov, CLUE-S 和 GeoSOS-FLUS)相结合,揭示过去和未来流域、城市尺度区域

碳储量时空变化特征,探究未来土地利用变化情景及其对区域生态系统碳储量的影响^[15-17]。但目前针对省域尺度海岸带 LULCC 的模拟研究较为缺乏,整合 GeoSOS-FLUS 和 InVEST 探究碳储量对 LULCC 响应机制的研究更加稀少,且目前尚无以时空尺度预测海南未来海岸带多情景土地利用变化并探究其对区域生态系统碳收支影响机制的相关研究。

海岸带是海洋和陆地之间相互作用较为复杂敏感的海景耦合带,蕴藏着巨大的碳库,其具备丰富的自然资源、独特的地理位置和适宜的居住生活环境,已成为人地矛盾最多、环境压力最大的地带^[18]。在区域城镇化加速推进、人类高强度活动和气候变化共同影响下,海岸带生态系统结构与功能受到严重的干扰和破坏,已成为典型的生态脆弱带和环境变化敏感区,碳汇功能的不确定性增加。海南岛海岸带地理位置独特,是海南省向海洋进军的重要门户和向陆地开发的重要基地,在海南经济发展中具有举足轻重的地位。20 世纪 80 年代以来,经济特区建设带动沿海房地产、滨海旅游、农业和渔业等方面迅猛发展。随之而来的无序毁林、毁草和毁湿导致该区域生态系统结构改变和生态功能退化,进而危及区域生态安全,从

而对海岸带区域生态环境产生负面影响。众多学者在土壤有机碳^[19-20]和沿海蓝碳等^[21]单一方面做了大量的研究,但该区域碳储量长时间序列的研究较少,研究结果无法反映区域生态系统碳储量的演变过程和变化趋势,模拟未来情景土地利用并探究其对区域生态系统碳储量动态变化影响机制的研究也较少。

鉴于此,本研究以海南岛遥感影像解译获取的 1990,2000,2010,2020 年土地利用/覆被数据为基础,构建长时间序列和综合碳库的碳储量数据,采用 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型估算预测 1990—2020 年及未来 2030 年区域长时间序列碳储量及其空间格局。基于地学信息图谱探究近 30 a 土地利用时空演变对生态系统碳储量的影响机制,揭示热带和亚热带海岸带复杂土地利用变化过程对区域生态系统碳汇服务功能的影响过程和机理,探究未来多情景土地利用变化对生态系统碳储量的影响,理解碳循环对区域 LULCC 的响应机制,为探寻土地合理利用、提高区域生态系统碳储量及减排增汇等政策制定提供科学依据,对推动中国 2030 年碳达峰和制定区域碳减排策略具有重要意义。

1 方法与材料

1.1 研究区概况

海南岛是中国的经济特区和自由贸易试验区,地理坐标为:108°21′—111°03′E;19°20′—20°10′N。北以琼州海峡与广东划界,西临北部湾与广西、越南相对,东濒南海与台湾对望,东南和南部在南海与菲律宾、文莱、马来西亚为邻。地势四周低平,中间高耸,呈穹隆山地地形,以五指山、鹦哥岭为隆起核心,向外围逐级下降,由山地、丘陵、台地、平原等地貌构成,地带性植被为热带季雨林型的常绿季雨林,人工植被中的经济林发达且海岸带多有红树林及沙生植被^[22]。海南岛属热带季风气候,全年暖热,年平均气温 22~26℃,雨量充沛,年降水量为 1 500~2 200 mm。

现有针对海岸带划分的研究主要分为自然标准、行政边界、任意距离等方式^[23]。海南平均海拔较低,若按照地势划分,无法满足划分海岸带主体功能的需求,同时从区域经济和海岸带综合管理的角度来看,海岸带的划分应该遵从于经济与管理的可控性^[24]。朱丽亚等^[25]在辽宁省与 Chuai 等^[26]在浙江省研究上同样采用行政区域对海岸带进行研究。综合考虑后,我们最终采用海南岛乡/镇行政边界作为海岸带的划分(图 1)。

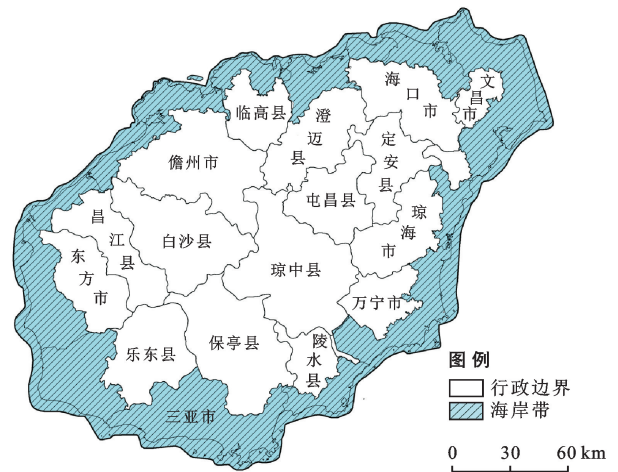


图 1 海南岛海岸带的划分

1.2 数据收集及处理

1.2.1 数据来源 本研究以 1990,2000,2010,2020 年四期的 Landsat TM, ETM 和 OLI 遥感影像(30 m)为主要数据源(<http://glovis.usgs.gov/>),云量控制在 5% 以内。基于图像处理软件 ENVI 5.4 完成不同时期遥感图像的辐射校正、几何校正、影像增强和图像裁剪等预处理。参照中国科学院资源环境数据,结合研究区土地利用特点,分为 7 个一级类型以及 22 个二级类型,分别是海洋、耕地(水田和旱田)、林地(有林地、灌木林地和其他林地)、草地(高盖度草地、中盖度草地和低盖度草地)、水域(河流、水库池塘、滩涂、和湖泊等)、建设用地(城镇用地、居民点和其他建设用地)和未利用地(沙地、沼泽地、盐碱地和裸地),结合随机森林法和人工目视解译,获取研究区土地利用数据。参照 Google Earth 和部分野外调查数据,完成图像分类精度评估,在保证整体分类精度都大于 85% 的基础上,以 GRID 格式存于 ArcGIS 10.8。

1.2.2 碳密度数据及 InVEST 模型碳储量计算 InVEST 模型碳储量模块以地表的土地利用类型为评估单元。在碳模块中基于土地利用及其对应的碳密度数据实现区域生态系统碳储量的评估。为了碳储量估算更加精确,我们使用土地利用的二级地类数据进行估算。根据参考广东省水利厅(http://slt.gd.gov.cn/szygb/index_2.html)、海南水利部(http://swt.hainan.gov.cn/sswt/1_801/list2.shtml)及相关参考文献^[25,27],得出海南、珠江西岸平均温度为:24.0℃,22.3℃,平均降雨量为 1 956.2 mm,1 992.0 mm。在珠江碳密度基础上选用通用程度高的碳密度公式进行修正^[28-31]:

$$C_{SP} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \quad (1)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054 \times MAP} \quad (2)$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \quad (3)$$

式中: C_{SP} 为根据年降水量得到的土壤碳密度 (kg/m^2); C_{BP} , C_{BT} 分别是根据年降水量和平均温度得到的生物量碳密度 (kg/m^2); MAP 是年均降水量 (mm); MAT 是年均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

将海南省和珠江西岸的年均温值和年均降水量值带入上述公式,二者之比即为海南岛碳密度修正系数。

$$K_{BP} = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}}; \quad K_{BT} = \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}} \quad (4)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}} \times \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}} \quad (5)$$

$$K_S = \frac{C'_{SP}}{C''_{SP}} \quad (6)$$

式中: K_{BP} , K_{BT} 分别为生物量碳密度的降水因子和气温因子修正系数; C' 和 C'' 分别是海南省和珠江流域的碳密度数据; K_B , K_S 分别为地上、地下生物量碳密度修正系数和土壤碳密度修正系数。将修正系数与珠江流域碳密度数值相乘即得到海南岛碳密度数据,最终得到碳密度数据见表 1。以此计算研究区不同时期及 2030 年 3 种情景下的碳储量。

表 1 海南岛海岸带土地利用类型碳密度 t/hm^2

一级分类	二级分类	碳密度		
		地上生物量	地下生物量	土壤
耕地	水田	20.928 6	0	10.948 4
	旱地	20.500 2	0	10.948 4
林地	有林地	26.586 0	5.317 2	22.795 7
	灌木林	26.132 4	5.216 4	9.494 0
	疏林地	26.661 6	5.329 8	22.795 7
	其他林地	21.394 8	4.271 4	22.795 7
草地	高覆盖草地	27.115 2	116.587 8	10.089 9
	中覆盖草地	26.397 0	113.500 8	10.089 9
	低覆盖草地	9.021 6	38.782 8	10.089 9
水域	河渠	0	0	0
	湖泊	0	0	0
	水库坑塘	0	0	0
	滩涂	0	0	0
	滩地	0	0	0
建筑用地	城镇用地	11.604 6	0	16.038 8
	农村居民点	16.947 0	0	22.371 5
	其他建设用地	14.742 0	0	16.038 8
未利用地	沙地	23.083 2	0	0.848 4
	盐碱地	0	0	0
	沼泽地	7.182 0	0	23.351 2
	裸土地	26.296 2	0	0
海洋	海洋	4.284 0	0	0

由于海南的植被多为常绿阔叶树种的地带性森林类型,其死亡有机物碳储量相对极其微小且难以观测,本研究中暂不作计算,生态系统碳储量计算公式如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (7)$$

式中: C_{total} 为区域总碳储量 (t/hm^2); C_{above} 为地上部分碳储量 (t/hm^2); C_{below} 为地下部分碳储量 (t/hm^2); C_{soil} 为土壤碳储量 (t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机物碳储量 (t/hm^2)。基于不同地类面积及其对应平均碳密度的乘积求和,估算区域总碳储量。其计算公式如下:

$$C_{i\text{-total}} = (C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}}) \times A_i \quad (8)$$

式中: i 为某地类的平均碳密度; A_i 为其对应的地类总面积。

1.2.3 土地利用转移图谱 地学信息图谱方法是基于 RS, GIS、计算机制图和空间信息技术的一种综合时空复合分析方法^[32],基于时空尺度叠加不同时期土地利用构建的“时空复合体”图谱单元,基于时间序列揭示区域土地利用覆盖的生态地理过程和时空演变进程。本文在 ArcGIS 10.8 的支持下,对该区域 1990—2000, 2000—2010, 2010—2020 年土地利用数据空间叠加分析,最终合成 3 个时段的土地利用信息图谱^[33],定量揭示区域土地利用时空演变规律及其驱动机制,以此探究 30 a 间土地利用时空演变对生态系统碳储量影响机制,图谱计算公式如下:

$$C = 10A + B \quad (9)$$

式中: C 为研究阶段内土地利用演替模式的图谱单元栅格; A 和 B 为研究初期和研究末期的土地利用图谱栅格属性值。

1.2.4 FLUS 模型 FLUS 模型是由 Liu 等学者基于地球模拟优化系统理论 (Geo-SOS) 提出的^[34]。GeoSOS-FLUS 主要借助土地利用数据及其驱动因子 (DEM、坡度、密度、距城镇距离、距铁路的距离、距高速的距离),模拟在多种自然和人为因素影响下的未来土地利用布局情景。其模拟过程主要包括适宜性概率计算、邻域因子计算、自适应惯性系数计算、情景设置和综合概率计算,模拟精度较高,且与现实土地利用分布相似。

由于海南海岸带区域自然条件和经济社会发展状况不同,对不同功能分区的海岸带资源的保护、开发与利用等调控模式不尽相同,模拟未来区域土地利用是一个挑战。因此,基于当前社会发展状况,本文采用情景分析法,结合当前海岸带生态系统构成,根据各情景模式的特点并参照《海南国际旅游岛建设发展规划纲要》,提出建设用地和林地优先两种极端假设情况,以期管理者在两种情况中寻找土地合理利

用平衡点提供参考。由此,本文设定了基准情景、发展优先、生态优先3种情景,根据历史土地利用数据转移概率设置基准情景相关参数,其他情景则参考相关文献^[35-36]在基准情景的参数上进行增加和减弱的调整,通过反复调试、比对不同结果最终确定设置较为科学的转换成本,转化成本表示地类换成需求地类的难易程度,可用系数转化 $[0,1]$ 表示,转换前地类具体设置数值见表2。

表2 3种情境下海南岛海岸带转化不同土地利用类型设置参数

项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	海洋
基准情景	0.63	0.82	0.79	0.72	0.92	0.65	0.95
发展优先情景	0.85	0.65	0.70	0.68	0.98	0.75	0.63
生态优先情景	0.80	0.95	0.82	0.75	0.70	0.78	0.95

(1) 基准情景。基于2010—2020年土地利用转移概率,以10a为步长,无其他调整,基于GeoSOS-FLUS模型预测研究区2030年基准情景下各土地利用类型面积。

(2) 发展优先情景。在国土空间三条红线和海南省总体规划(2015—2030)纲要框架下,结合海岸带目前违规建造,填海造陆的现状,该情景假定在区域经济利益的推动下,建设用地优先发展且受到一定环境的约束制约和节制扩张,其他地类均可转化为建设用地,但各个类型的转换等级有所差异,由高到低的排列顺序为:建设用地、耕地、未利用地、草地、林地、海洋及水域。

(3) 生态优先情景。按照海南省“严守生态底线、优化经济布局、促进陆海统筹”的空间发展思路,

突出海南“生态、经济特区、国际旅游岛”三大优势,结合海岸带土地利用结构特征、生态环境承载能力和现状发展基础,林地、草地和水域(湿地)优先被保护,只能转入,不能转出,且林地的保护地位级最高,同时增加耕地和海洋的转出成本,限制永久基本农田转换。土地由高到低转化等级为:林地、草地、未利用地、耕地、海洋、建设用地、水域。

2 结果与分析

2.1 1990—2020年土地利用变化特征分析

1990—2020年期间,海南岛海岸带土地利用类型发生显著变化(表3和图2),在1990,2000,2010,2020年,研究区土地利用结构主要以林地和耕地为主,分别占研究区总面积的66.48%,66.50%,65.34%和63.15%。其中林地占据优势地位,面积占比分别为39.20%,39.73%,39.04%和37.81%,呈现先增后减的变化趋势,总体变化速率为-3.51%。耕地占据次要位置且呈递减趋势,面积比例分别为27.28%,26.77%,26.30%和25.34%。草地面积变化率为-15.97%,-8.48%,2.65%,呈现先减少而后增加的变化趋势,总体呈现减少的趋势。水域总体变化率为173.71%,呈现先增加而后减少的变化趋势。建设用地面积比例持续递增,年变化率为3.12%,3.49%和5.47%。未利用地占据面积最小比例且持续递减。30a间研究区耕地、林地、草地和未利用地总体面积减少,且未利用地和耕地呈现持续减少态势。水域和建设用地面积增加,且建设用地呈现持续增加态势。

表3 1990—2020年海南岛海岸带各期土地利用面积及比例

土地利用类型	1990年		2000年		2010年		2020年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
海洋	3 119.78	22.53	3 127.18	22.58	3 127.52	22.58	3 127.51	22.58
耕地	3 778.09	27.28	3 707.61	26.77	3 642.16	26.30	3 509.37	25.34
林地	5 427.96	39.20	5 503.13	39.73	5 406.43	39.04	5 237.58	37.81
草地	517.73	3.74	435.06	3.14	398.18	2.87	408.72	2.95
水域	536.44	3.87	542.09	3.91	642.35	4.64	637.27	4.60
建设用地	311.24	2.25	408.37	2.95	550.76	3.98	851.89	6.15
未利用地	156.49	1.13	128.19	0.93	82.41	0.60	79.32	0.57

2.2 1990—2020年土地利用图谱轨迹分析

本研究基于地学信息图谱理论,通过ArcGIS生成研究区域3个时期(1990—2000年;2000—2010年和2010—2020年)土地利用图谱单元如表4和图3所示。

1990—2000年产生25类土地利用转型图谱单元(总面积为269.69 km²)。土地利用类型的转型最明显的是“草地→林地”(编码32),面积为82.96 km²,

占转移图谱总面积的30.74%,主要分布东方市、昌江县和海口市且距海洋1 500 m范围内,源于部分天然草地被侵占并转换为生态海防林;“耕地→建设用地(编码15)”和“林地→建设用地(编码25)”次之,分别占总图谱单元面积的21.28%和8.42%,主要发生于在海口市。在经济特区的政策下,海口市社会经济和城市化进程得到快速发展,耕地和林地被侵占和蚕食并转变为建设用地,局部区域土地利用呈现不合理性。

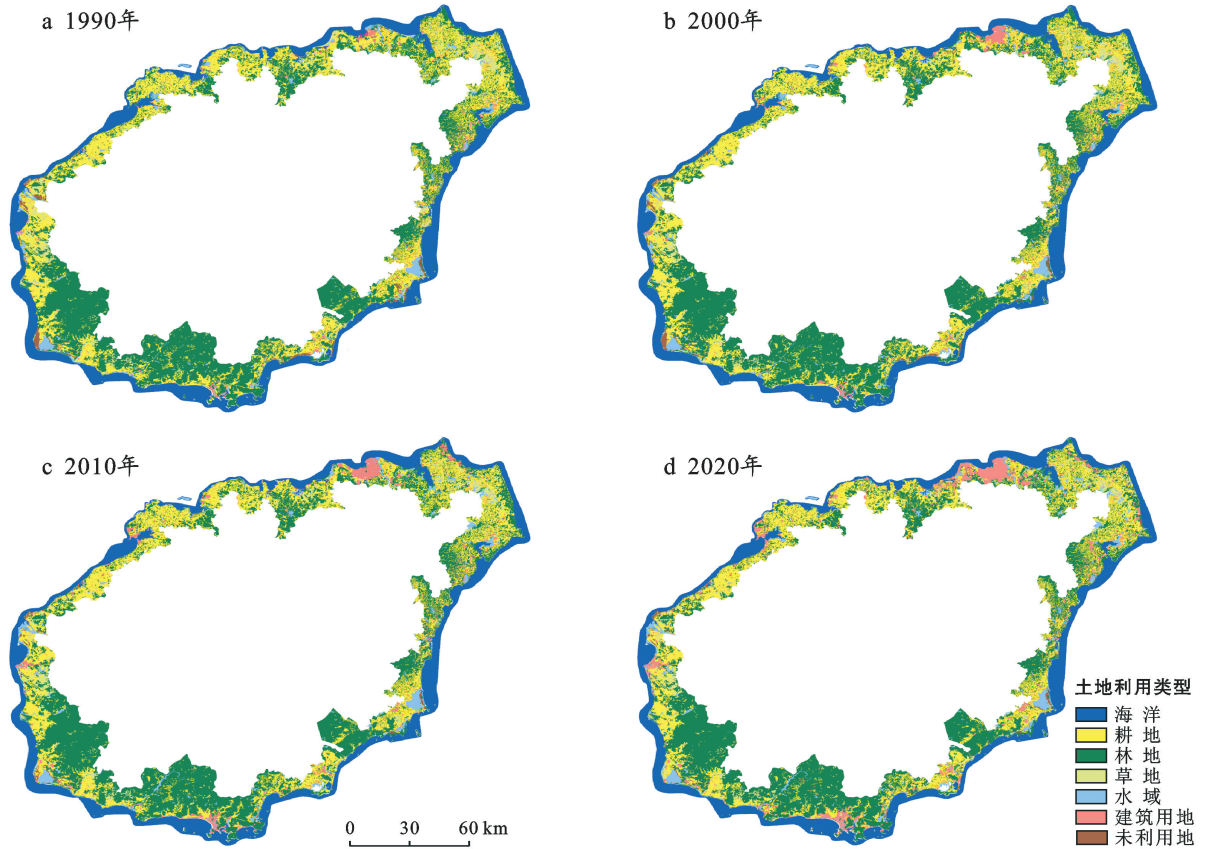


图 2 1990—2020 年海南岛海岸带土地利用类型空间分布

表 4 1990—2020 年海南岛海岸带图谱变化排序

编号	1990—2000 年		编号	2000—2010 年		编号	2010—2020 年	
	面积/km ²	变更比例/%		面积/km ²	变更比例/%		面积/km ²	变更比例/%
32	82.895 4	30.74	15	93.442 5	17.21	15	146.456 1	30.08
15	57.382 2	21.28	25	71.649 0	13.20	25	145.158 3	29.82
25	22.716 9	8.42	14	56.663 1	10.44	21	28.936 8	5.94
62	15.480 0	5.74	24	52.774 2	9.72	14	18.285 3	3.76
14	15.276 6	5.66	21	46.340 1	8.54	45	17.279 1	3.55
45	12.934 8	4.80	12	36.061 2	6.64	12	16.399 8	3.37
12	12.231 9	4.54	41	28.434 6	5.24	35	13.950 9	2.87
63	8.935 2	3.31	61	24.687 0	4.55	51	12.089 7	2.48
40	7.440 3	2.76	34	19.534 5	3.60	23	11.974 5	2.46
21	6.863 4	2.54	51	17.514 9	3.23	41	11.084 4	2.28

注:0—6 分别代表海洋、耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。代码 12 表示耕地转化为林地,其他代码遵循相同的规则。

2000—2010 年各土地利用类型之间转换较为剧烈,且主要集中于耕地、林地和建设用地之间。“耕地→建设用地(编码 15)”转移面积最大,占总图谱单元面积的 17.21%,面积为 93.44 km²,主要分布在海口市和三亚市;“林地→建设用地(编码 25)”紧随其后,面积为 71.65 km²,占总图谱单元面积的 13.20%,主要分布在海口市、三亚市和文昌市。由于现代旅游业、农业、渔业和建筑业等产业的共同作用,更多的耕地和林地被挤压侵占,成为城市建设用地的最重要来源。其

中,三亚市最具有代表性,10 a 间人口年平均增长率最高,为 3.58%,是全省的 3.65 倍,而凤凰岛、太阳湾以及三亚湾新城等开发项目的建设更加大了对耕地和林地的侵占力度。此外,“耕地(林地)→水域”的面积分别为 56.66,52.77 km²,主要发生于万宁市和东方市沿海区域,源于水域淹没部分耕地和林地。“林地→耕地”和“耕地→林地”面积分别为 46.34,36.06 km²,说明局部区域仍需完善退耕还林等生态政策。

2010—2020 年主要土地利用类型之间转换仍集

中于耕地、林地和建设用地上。建设用地主要由耕地和林地转入,其中“耕地→建设用地”和“林地→建设用地”面积分别 146.46 km²,145.16 km²,共占图谱转移面积的 59.90%,主要发生于海口市、三亚市和文昌市。经济的跨越式发展更加速了城市化的进程,建设用地由城市向沿海无序扩张延伸,海岸带近海区的

“海景房”如雨后春笋般拔地而起及填海建房、建岛等现象就是直接的例证(“水域→建设用地”面积为 17.28 km²),区域生态环境的恶化程度加剧,重发展轻保护的观念还没有彻底转变。虽然在国家环保督察和生态红线的管控下,区域不合理土地利用方式得到了一定程度的遏制,但局部形势仍不容乐观。

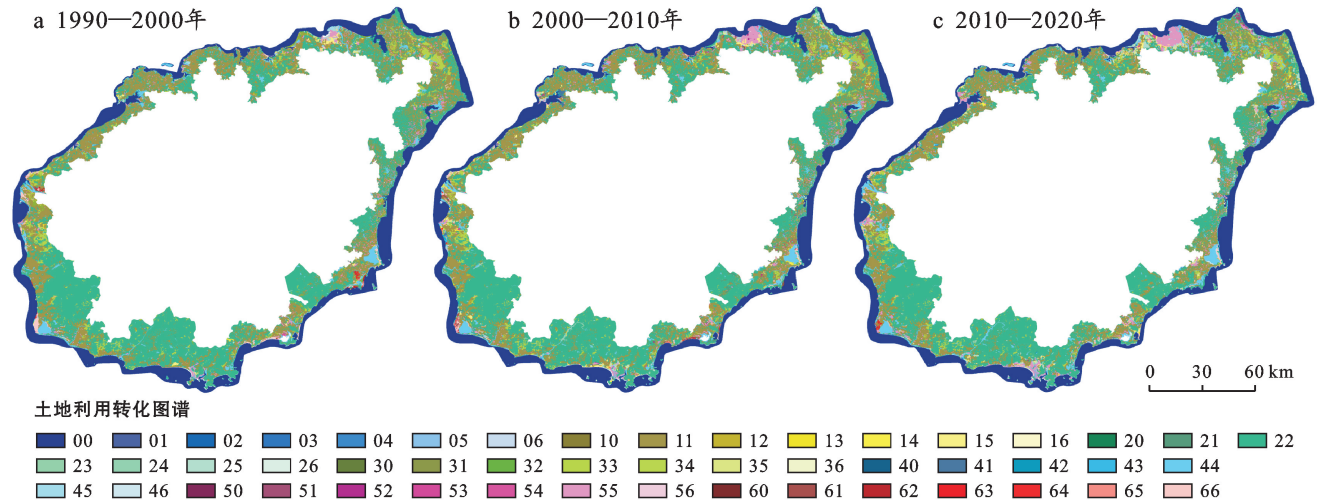


图 3 1990—2020 年海南岛海岸带土地变化轨迹

2.3 土地利用时空演变对区域碳储量影响研究

基于地学图谱探究不同时期土地利用时空演变对碳储量变化特征的影响机制(表 5)。30 a 间碳储量增加最明显的转换为“未利用地→草地”,达

到 1.25×10^5 t,“林地→草地”次之,为 1.06×10^5 t。碳储量减少最为显著的变换为“草地→林地(人工林)”,为 5.68×10^5 t;其次是“草地→水域”,为 3.62×10^5 t。

表 5 1990—2020 年海南岛海岸带土地转移所对应的碳储量

年份	碳储量增加		碳储量减少	
	主要土地类型转换	变化量/t	主要土地类型转换	变化量/t
1990—2000	耕地—林地	259 210.10	草地—林地	-617 323.00
	林地—草地	122 986.70	林地—耕地	-239 028.00
	耕地—草地	105 972.90	草地—耕地	-131 095.00
2000—2010	水域—耕地	77 865.40	草地—水域	-239 489.63
	水域—草地	77 609.35	林地—水域	-233 771.11
	耕地—林地	58 612.06	耕地—水域	-154 681.15
	林地—草地	94 743.57	林地—建筑用地	-214 953.77
2010—2020	未利用地—草地	88 720.26	草地—建筑用地	-129 519.39
	水域—建筑用地	48 735.80	草地—水域	-57 076.94

1990—2000 年研究区碳汇使碳储量增加 6.63×10^5 t,碳源使碳储量减少 1.25×10^6 t,碳储量净减少 5.83×10^5 t,碳源区主要分布于海口、东方、琼海、万宁市等,“草地→林地(人工林)”减少最多,为 6.17×10^5 t。一方面在海南省政府的椰林工程启动下,另一方面由于速生树种的引入,导致人工林进一步侵占草地,弱化了区域碳汇功能。“林地(草地)→耕地”也是区域碳储量减少的重要地类变换,分别减少了 2.39×10^5 t 和 1.31×10^5 t,在文昌市尤为突出,

体现部分地区依旧存在不合理的土地利用现象。“耕地→林地”碳储量增加最大,为 2.59×10^5 t,源于“退耕还林”等生态政策的推行。“林地→草地”紧随其后,达到 1.23×10^5 t,说明林草地构成局部碳汇重要组成部分,在区域碳收支平衡中起着不可低估的作用。

1990—2000 年研究区碳汇使碳储量增加 9.37×10^5 t,碳源使碳储量减少 1.78×10^6 t,碳储量净减少 8.39×10^5 t,“草地(林地)→水域”碳储量减少量占据前两位,分别为 2.39×10^5 t 和 2.34×10^5 t,主要位于

文昌、海口和三亚市等区域。水域的碳密度要远小于林草地碳密度,水域淹没部分林草地,造成了区域碳储量减少。“水域(滩涂)→耕地”碳储量增加最大,为 7.79×10^4 t,主要分布在儋州市。由此可见,区域耕地面积的增加在一定程度上表现出明显的碳汇特征,提高了碳储量水平,很大程度上源于耕地的碳密度要远高于水域的碳密度,反映出人类活动半径的扩大及对滩涂的改造和利用。“水域→草地”碳储量增加 7.76×10^4 t,主要分布于文昌市和三亚市部分区域,源于水域碳密度远小于草地碳密度,草地比水域具备更强的碳汇能力。

1990—2000 年研究区碳汇使碳储量增加 1.03×10^6 t,碳源使碳储量减少 1.12×10^6 t,碳储量净减少 8.64×10^4 t,碳储量显著减少的地类变换为“林地→建设用地”和“草地→建设用地”,达到 2.15×10^5 t 和 1.30×10^5 t,主要在海口市、儋州市、澄迈县和万宁市等区域。“林地(草地)→建设用地”再次彰显了城市化进程加速了区域碳储量的急剧减少,尤其 2018 年海南建设自贸港以来,建设用地需求急剧增加,沿海市(县)向海要地、向岸要房等情况严重,无序扩张更加剧了建设用地与林地和草地之间的矛盾,不合理的人为活动导致区域碳储量急剧变化,人为因素对碳储量的影响上升。被生态环境部挂牌督办的儋州海花岛填海造陆、万宁市月岛项目未批先建、三亚凤凰岛填海及开发房地产和酒店和澄迈县肆意围填海及破坏红树林等等都是人类活动对区域碳干扰的直接例证。

2.4 多情景下未来土地模拟及其碳储量估算

为了准确预测未来不同情景 LULCC 及其对生

态系统碳储量影响,本文基于马尔可夫算法、GeoSOS-FLUS,2010—2020 年土地利用转移概率矩阵及相关模拟约束条件,完成 2030 年基准、发展优先和生态优先 3 种不同情景下 LULCC 定量模拟(表 6 和图 4),模拟的精度分别为 92.26%,94.37% 和 93.32%。模拟结果显示研究区依旧以林地和耕地为主要土地利用结构,符合区域农业产业结构。林地在 3 种情景下均占据优势地位,面积比分别为 36.67%,36.70% 和 37.92%。2020—2030 年,在生态优先情景下作为生态用地的林地得到了有效的保护,面积增加了 11.91 km^2 (0.11%),在其他两种情景下面积萎缩,分别减少 161.45 km^2 (1.14%) 和 157.57 km^2 (1.11%)。相比 2020 年,耕地在 3 种情景下均呈现萎缩态势,减少量分别为 120.40 km^2 , 133.78 km^2 , 120.34 km^2 ,且在发展优先情景下减少最大,成为建设用地的主要转入来源。未利用地面积在 3 种情景下的变化与耕地相似,萎缩的面积分别为 2.90 km^2 , 3.25 km^2 , 2.91 km^2 。草地在发展优先情景未来 10 a 间呈现萎缩趋势,面积减少 2.41 km^2 ,在其他 2 种情景下得到一定的保护,呈现出一定的扩张特征,面积分别增加 11.70 km^2 , 10.34 km^2 ,表明控制草地向耕地和建设用地的流转可以促进草地面积增加。建设用地在 3 种情景下呈不同程度扩张态势,呈现以海岸带建筑群落为中心的圈层模式向外扩张。发展优先情景下涨幅最大,增加面积为 295.01 km^2 ,基准情景次之,为 269.04 km^2 ,生态优先情景下扩张速度减缓且涨幅最小,为 96.88 km^2 ,分别是 2020 年建设用地面积的 1.35,1.32 倍和 1.14 倍。

表 6 2030 年海南省海岸带多情景模拟土地利用情况

项目	海洋/ km^2	耕地/ km^2	林地/ km^2	草地/ km^2	水域/ km^2	建设用地/ km^2	未利用地/ km^2
基准情景	3 127.31	3 388.97	5 076.13	420.42	632.54	1 120.93	76.42
发展优先	3 126.78	3 375.59	5 080.01	406.31	631.06	1 146.9	76.07
生态优先	3 127.42	3 389.03	5 249.49	419.06	632.54	948.77	76.41

2020—2030 年基准、发展优先和生态优先 3 种情景下的碳储量分别为 4.20×10^7 t, 4.18×10^7 t 和 4.22×10^7 t(图 5),与 2020 年相比,分别减少 1.29×10^5 t, 2.45×10^5 t, 增加 1.34×10^5 t。具体情况如下:

(1) 基准情景。“林地→建设用地”是其最大的碳源,碳储量损失达到 2.93×10^5 t,而“耕地→林地”是其最大的碳汇,碳储量增加 2.14×10^5 t。在当前国家生态政策的实施下,退耕还林政策取得了一定成效,但总体林地及碳储量仍呈现下降趋势。

(2) 发展优先情景。模拟结果显示研究区城市建设用地不断向外扩张,建筑物分布由分散的点状形式逐渐演变为一个连续且聚集的块状区域,加之海岸带城郊部分零散的村镇快速发展并演变为初具规模的卫星城镇。建设用地的大肆扩张以及林地和草地与之转化造成碳储量和碳密度下降,草、林地这种高碳密度的用地类型被低碳密度的人工建筑物取代,碳汇区转变为碳源区,碳储量明显减少。“林地(草地)→建设用地”是其最主要碳源,共造成损失碳储量 2.67×10^5 t,占总减少量的 63.88%。

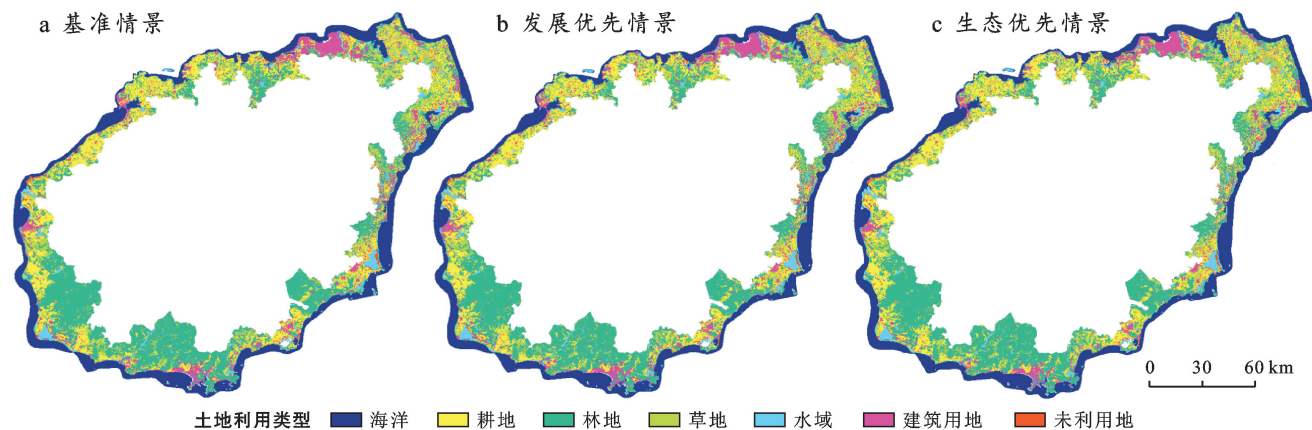


图 4 3 种情境下海南岛海岸带 2030 年土地利用分布

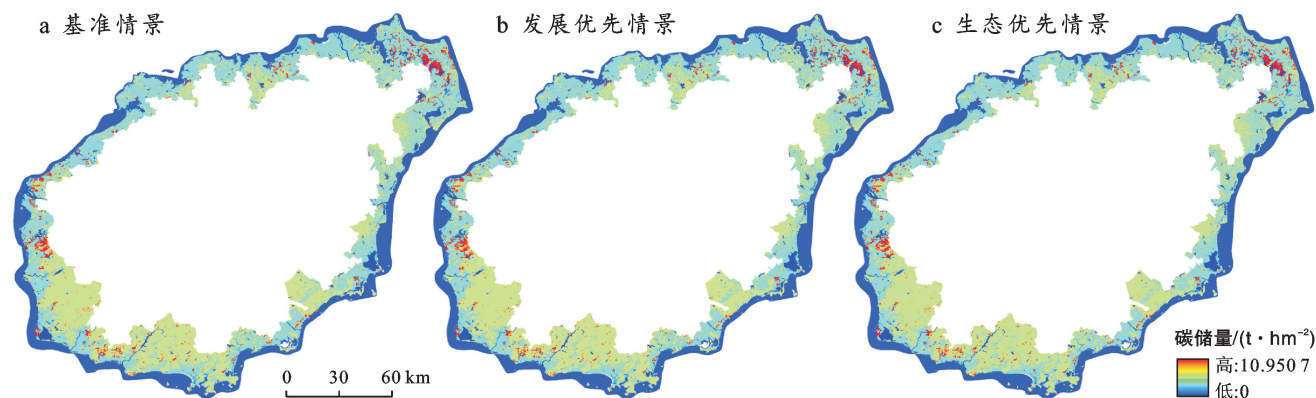


图 5 2030 年海南岛海岸带土地利用预测碳储量

(3) 生态优先情景。在生态红线和退耕还林(草)等生态政策的制约下,设置了相对严格的生态保护约定条件,限制了林地和草地等地类向其他地类转换,使得未来 10 a 间林地和草地增加 6.56 km^2 , 11.91 km^2 ,其所产生碳储量就已达到 $1.55 \times 10^5 \text{ t}$ 。×林地的增加有助于对整体碳储量水平的提高,说明严格的生态保护措施及其生态工程对于碳储量有一定积极影响^[37]。“耕地→草地”为最大的碳汇,碳储量增加 $9.95 \times 10^4 \text{ t}$,其次为“建设用地→草地”,碳储量增加 $1.80 \times 10^4 \text{ t}$ 。虽然建设用地扩张速率减缓,但其面积增加量仍达到了林地的 8.13 倍和草地的 14.77 倍。建设用地的增加不利于区域碳储量和固碳水平的提高,对区域整体碳储量水平的提高具有负面影响。

3 讨论

本研究结果表明,研究区 30 a 碳储量下降了 $1.52 \times 10^6 \text{ t}$,且呈现逐年减少的趋势,而海南省人口呈现爆炸式增长,2020 年首次突破千万,建设用地由 612 km^2 增加到 $1\,401 \text{ km}^2$,增长了 1.9 倍,呈现由城市向沿海扩张延伸且集中在海岸带区域的发展态势。

Fu 等^[9]研究表明发展中的城市地区和快速城市化阶段对区域碳储量的影响最大。经济高速发展促使海南岛区域土地利用的大规模集约式发展,直接影响区域碳储量并危及其生态安全,再次验证了 Jiang 和 He 等^[12,38]的研究成果。

“草地→林地(人工林)”是区域碳储量减少最大的土地利用转变类型,与当地产业结构调整 and 农民追求的经济利益相关,2003—2018 年全省人工林面积由大面积高碳密度的天然草地转换为低碳密度的人工林地,高碳区转变为低碳区,区域固碳能力削弱。今后发展中,采取提高林地、草地等地类比重等一系列的土地利用调控政策,加大区域碳源向碳汇转换的优化发展。

在未来预测中,基础情景和发展情景下因建设用地的急剧扩张(1.94%和 2.13%),侵占了未来耕地(1.11%和 1.14%)和林地(0.87%和 0.97%),导致区域碳储量减少且生态系统服务功能减弱。尤其发展情景模式下,虽然设置土地利用约束措施,但建设用地依旧得到了大肆扩张,部分林地、草地和耕地被侵占且区域碳储量急剧减少。导致未来海岸带土地开发利用强度超出其生态承载力,从而引发城市热岛效

应、城市空心化等问题。因此,今后要将生态与发展作“出发点”和“归属点”,优化区域城市发展空间格局土地利用结构力度,积极推行林业生态工程,加大区域耕地和未利用地等向林地、草地的转化力度^[39-40],确保滨海生态系统稳定性,保障区域碳储量和维持碳平衡,实现区域低碳建设和碳源—汇转换的优化发展。

本研究耦合 InVEST 模型与 FLUS 模型能够为海南省海岸带提供较为完整的评估及预测体系,但仍存在一些不足。InVEST 模型碳储量模块侧重于不同土地利用类型之间的碳密度差异,利用静态不同类型的地类碳密度来估算碳储量,却忽视了土地利用类型内部以及植被年龄结构带来的固碳功能的差异^[6]。今后仍需要补充大量野外实测数据、高分辨率土地利用数据和优化模型输入参数,探究区域土地利用类型内部空间异质性以及植被年龄结构对碳密度的影响来提高生态系统碳储量评估精度。未来应充分考虑国家宏观政策,并综合土壤类型、降水、温度等自然因素和人口、GDP 值、相关政策、社会发展状况和产业发展等社会因素,构建全面综合的区域土地利用驱动因子体系,以此提高 GeoSOS-FLUS 模型模拟精度。

4 结论

(1) 1990—2020 年研究区耕地、林地、草地和未利用地面积减少,且未利用地和耕地持续减少,面积分别减少了 0.56% 和 1.94%,水域和建设用地面积增加较为明显,且建设用地表现出持续增加特征,增加了 3.90%。

(2) 1990—2000 年最大面积转型图谱为“草地→林地”,占转移图谱总面积 30.74%,2000—2010—2020 年间土地利用类型的转换主要集中在耕地、林地和建设用地之间,其中“耕地(林地)→建设用地”是 2000—2020 年的主要土地转换类型。

(3) 1990,2000,2010,2020 年研究区碳储量分别为 4.36×10^7 t, 4.3×10^7 t, 4.22×10^7 t 和 4.21×10^7 t,呈持续减少趋势,1990—2000 年,“草地→林地(人工林地)”占区域碳储量减少量比重最大;2000—2010 年“草地→水域”是碳储量减少最显著的图谱变化;2010—2020 年“林地→建设用地”为碳储量减少最明显图谱变化。

(4) 林地在基准与发展优先情景下面积萎缩,在生态优先情景下面积扩张;草地在基准情景和生态优先情景下表现明显扩张特征。建设用地在 3 种情景下呈不同程度扩张态势,而耕地则均呈减少态势。相比 2020 年碳储量,基准与发展优先情景碳储量减少

了 1.29×10^5 t 和 2.45×10^5 t,生态优先情景增加了 1.34×10^5 t。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] Canadell J G, Raupach M R. Managing forests for climate change mitigation [J]. Science, 2008, 320(5882):1456-1457.
- [3] Zhang Mei, Huang Xianjin, Chuai Xiaowei, et al. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A spatial-temporal perspective [J]. Scientific Reports, 2015,5:10233.
- [4] Thompson T M. Modeling the climate and carbon systems to estimate the social cost of carbon [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2018,9(5): e532.
- [5] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000 [J]. Tellus B, 2003,55(2):378-390.
- [6] 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.
- [7] Cusack M, Saderne V, Arias-Ortiz A, et al. Organic carbon sequestration and storage in vegetated coastal habitats along the western coast of the Arabian Gulf [J]. Environmental Research Letters, 2018,13(7):074007.
- [8] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850—1990 [J]. Tellus B, 1999,51(2):298-313.
- [9] Fu Qi, Xu Liangliang, Zheng Hongyu, et al. Spatiotemporal dynamics of carbon storage in response to urbanization: A case study in the Su-Xi-Chang region, China [J]. Processes, 2019,7(11):836.
- [10] DeFries R S, Field C B, Fung I, et al. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999,13(3):803-815.
- [11] Liang Youjia, Hashimoto S, Liu Lijun. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050 [J]. Ecological Indicators, 2021,120:106939.
- [12] Jiang Weiguo, Deng Yue, Tang Zhenghong, et al. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [J]. Eco-

- logical Modelling, 2017,345:30-40.
- [13] Sahle M, Saito O, Fürst C, et al. Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,646:573-586.
- [14] Liang Youjia, Liu Lijun, Huang Jiejun. Integrating the SD-CLUE-S and InVEST models into assessment of oasis carbon storage in northwestern China [J]. *PLoS One*, 2017,12(2):e0172494.
- [15] 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.
- [16] Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, et al. Ecosystem carbon storage under different scenarios of land use change in Qihe catchment, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020,30(9):1507-1522.
- [17] 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.
- [18] 曹珍秀,孙月,谢跟踪,等.海口市海岸带生态网络演变趋势[J].*生态学报*,2020,40(3):1044-1054.
- [19] 张书齐,许全,杨秋,等.海南岛海岸带沙地土壤碳氮磷含量及碳氮比[J].*森林与环境学报*,2019,39(4):398-403.
- [20] Xiong Yanmei, Liao Baowen, Proffitt E, et al. Soil carbon storage in mangroves is primarily controlled by soil properties: A study at Dongzhai Bay, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 1226-1235.
- [21] Huxham M, Whitlock D, Githaiga M, et al. Carbon in the coastal seascape: How interactions between mangrove forests, seagrass meadows and tidal marshes influence carbon storage [J]. *Current Forestry Reports*, 2018,4(2):101-110.
- [22] 陈树培.海南岛的植被概要[J].*生态科学*,1982,1(1):29-37.
- [23] Sun Wei, Chen Cheng, Wang Lei. Spatial function regionalization and governance of coastal zone: A case study in Ningbo City [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018,28(8):1167-1181.
- [24] 朱坚真,刘汉斌.中国海岸带划分范围及其空间发展战略[J].*经济研究参考*,2012(45):48-54.
- [25] 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.
- [26] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Wu Changyan, et al. Land use and ecosystems services value changes and ecological land management in coastal Jiangsu, China [J]. *Habitat International*, 2016,57:164-174.
- [27] 谢毅文,李娟,陈伟荣,等.1959—2013年珠江流域平均气温时空变化特征[J].*中山大学学报(自然科学版)*,2016,55(3):30-38.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000,404(6780):858-861.
- [31] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends [J]. *Ecology*, 1989,70(5):1346-1354.
- [32] 路昌,周浩,张凤,等.基于地学信息图谱的山东省国土空间转型分析[J].*农业机械学报*,2021,52(7):222-230.
- [33] 龚文峰,袁力,范文义.基于地形梯度的哈尔滨市土地利用格局变化分析[J].*农业工程学报*,2013,29(2):250-259.
- [34] 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.
- [35] 张斌,李璐,夏秋月,等.“三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J].*生态学报*,2022,42(6):2265-2280.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] He Chunyang, da Zhang, Huang Qingxu, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016,75:44-58.
- [39] Zhou Liang, Dang Xuwei, Sun Qinke, et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,55:102045.
- [40] Feng Dingrao, Bao Wenkai, Fu Meichen, et al. Current and future land use characters of a national central city in eco-fragile region: A case study in Xi'an City based on FLUS model [J]. *Land*, 2021,10(3):286.