

- 孙天成, 马梓程, 黄赞慧, 王照翻, 陈思, 肖瑶, 谢翠容, 岳常海, 贾凤鸣, 张倩. 2023. 基于碳储存变化的海岸带生态系统修复策略——以海南岛东南海岸带为例. 热带地理, 43 (3): 443-458.
- Sun Tiancheng, Ma Zicheng, Huang Zanhui, Wang Zhaofan, Chen Si, Xiao Yao, Xie Cuirong, Yue Changhai, Jia Fengming, and Zhang Qian. 2023. Coastal Ecosystem Restoration Strategy Based on Carbon Storage Change: A Case Study of the Southeast Coastal Zone of Hainan Island. *Tropical Geography*, 43 (3): 443-458.

基于碳储存变化的海岸带生态系统修复策略 ——以海南岛东南海岸带为例

孙天成^{1,2}, 马梓程^{2,3}, 黄赞慧^{1,3}, 王照翻¹, 陈思², 肖瑶²,
谢翠容², 岳常海², 贾凤鸣², 张倩²

[1. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127; 2. 湖北省国土测绘院, 武汉 430034;
3. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074]

摘要: 碳达峰碳中和、国土空间生态修复、海域海岛可持续管理均是国家重大发展战略的重要内容。海南东南海岸带近年来因自然因素、人为干扰和全球气候变化的影响, 生态系统破坏严重, 碳汇功能明显下降。其生态质量的下降与海南自由贸易港和国家生态文明建设试验区的定位要求明显不符, 基于碳储存的生态系统修复工作亟需开展。文章以海南岛东南海岸带为例, 基于InVEST模型的碳储存模块, 结合研究区2000、2010、2020年土地利用数据, 估算研究区碳储量, 划分“碳汇、碳源区”, 评价其碳储存功能, 识别近20年来研究区碳损失状况, 明晰碳损失严重区域, 划分生态修复功能区。结果表明: 2000—2020年, 研究区建设用地扩张明显, 林草地面积极减少; 生态系统受到不同程度的破坏, 碳储量持续下降, 20年降低了0.11 Gt; 碳储量低的区域沿着海岸带环线向内陆延伸, 万宁市区域单位栅格碳密度值最低, 三亚市区域单位栅格碳密度降低最多; 碳源区面积始终大于碳汇区面积, 碳储存功能为差和极差的区域面积分别为39.84和27.31 km², 主要分布于北部万宁市和乐镇、南部蜈支洲岛上方、西南部三亚市右侧等区域; 基于碳损失和生态系统服务价值等级细分了自然修复区、人工辅助区、重建修复区和适度开发区, 并针对性、差异化地提出包括退养还湿、岸线修复、湿地重建、加强监管等修复策略。

关键词: 碳储存; 碳评价; 生态修复; InVEST模型; 海南岛东南海岸带

中图分类号: X171.4; S718.5
DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003643

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2023)03-0443-16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



海岸带是陆地主导的全球进程和海洋主导的全球进程相结合并相互作用的区域, 这些相互作用的平衡为依赖梯度的生态系统、气候、地貌、人类居住等提供了一个独特的领域, 更重要的是, 反应了高度动态的物理、化学和生物过程。海岸带是重要的碳汇和氧源区(Christopher et al., 2005), 对全球气候变化至关重要(Nemani et al., 1995; 张丽等, 2020), 其碳储存功能可有效地将有机碳进行封存固定, 沿海湿地在生长过程中吸收碳, 并将其中的

大部分转化为其根系所保持的丰富有机土壤。有研究(Herr et al., 2016)显示: 以2016年全球海岸带面积为基线, 如果一年中海岸带湿地流失减少一半, 二氧化碳排放量将减少0.23亿t。如果沿海湿地恢复到1990年的水平, 相当于抵消了7740万t煤炭的燃烧量。因此, 保护和恢复沿海生态系统, 特别是海岸带潮汐盐沼、海草草甸和红树林, 是缓解和适应气候变化的自然解决办法(邢庆会等, 2022)。

收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2023-02-28

作者简介: 孙天成(1997—), 女, 湖北武汉人, 助理工程师, 硕士, 研究方向为环境与生态遥感、自然资源调查, (E-mail) 1483466132@qq.com;

通信作者: 黄赞慧(1992—), 男, 海南澄迈人, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为基础地质调查、自然资源调查及生态调查, (E-mail) 540177626@qq.com。

然而, 海岸带是全球变化的敏感区和脆弱区, 近几十年来, 环境的改变、如全球变暖、营养盐分输入上升、台风肆虐, 以及人为干扰, 如人口迅速增长、填海造陆、养殖业兴盛、工业及村镇扩张侵占林草地等, 使全球海岸带地区发生剧烈变化(洪华生等, 2003; 李刚等, 2018; 王金华等, 2020; 隋玉正等, 2021; 王法明等, 2021), 导致其湿地面积萎缩、斑块破碎、土壤质量降低, 最终致使碳汇功能持续下降。基于此, 国内外学者通过研究沿岸城市及海岸带生态系统碳储存的变化, 实现对区域碳汇的动态监测, 并将其与生态修复相联系, 运用至生态修复策略中。如 Wang (2018)、严格(2014)、刘子刚(2004)、Lavery (2013) 等使用不同的方法测算了陆地生态系统碳储量、湿地生态系统碳储量及蓝碳, 并探讨了碳储存在相关生态修复方面的应用。

海南岛东南海岸生物资源丰富, 但由于经济建设和乱砍滥伐、海岸带养殖及旅游开发等, 海岸带天然林、湿地草地锐减, 导致气候干热、土地荒漠化日益严重。近年来, 许多学者也使用各类不同方法对海南岛碳储量、碳密度等进行研究, 以分析海南岛碳储量现状。如官惠玲等(2019)以海南岛主要的3种草地类型(低地盐化草甸、热性灌草丛、热性草丛)为对象, 采用收获法收集地上活体植物、凋落物样品等分析草地的地上活体、凋落物、根系生物量以及各生物量和土壤的碳密度, 并结合海南岛草地分布, 探讨海南岛草地的碳密度分布格局及碳储量现状。段璇瑜等(2022)基于1990—2020年土地利用遥感解译数据, 运用ArcGIS与InVEST模型, 探究了海南岛土地利用时空演变及碳储量响应状况。杨众养(薛杨, 2017)团队开展了海南岛东北部沿海防护林生物量与碳储量监测与评价研究, 建立了海南岛东北部木麻黄沿海防护林生物量与碳储量的估测和动态评估模型。然而, 当前研究更多的侧重于对海南岛林草地或海南岛整体的碳储量现状估算, 在滨海湿地、海岸带碳储量、碳储量与生态修复思想相整合等方面尚有更多探索空间。

鉴于此, 本文以海南岛东南重点海岸带为研究区, 对其碳储量进行评估模拟, 识别其碳储存时空变化。并以碳达峰碳中和、国土空间生态修复、海域海岛可持续管理等思想为导向, 结合生态系统服

务价值与碳储存能力分级构建生态修复分区, 以提升海岸带碳储存功能、修复保护海岸带生态环境为目标, 提出相应的生态保护修复策略。旨在为海南省东南海岸带蓝碳生态系统的保护与修复, 完善海洋生态补偿机制和海洋可持续发展方式等提供建议, 为海南省扎实推进基于生态系统的海岸带综合管理等提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于海南岛东南海岸带, 地处万宁市、陵水县、三亚市沿海及邻近海域地区, $18^{\circ}12'42''$ — $19^{\circ}00'11''$ N, $109^{\circ}30'12''$ — $110^{\circ}33'12''$ E, 面积约 740.31 km^2 (图1)。属热带季风海洋性气候, 夏长冬短, 年均温较高, 通常在 $22\sim 25^{\circ}\text{C}$; 雨季旱季分明, 年降水量为 $1\ 500\sim 2\ 500 \text{ mm}$; 自然资源丰富, 但易受台风侵袭, 洪涝灾害多发。地形整体自陆地向海洋缓慢倾斜, 陆域以平原地貌为主, 在靠内陆侧地区分布有台地地貌, 在三亚市南部、万宁市西南部分布着丘陵地貌。海岸线较为曲折, 岬角众多, 形成以砂质岸线为主, 基岩岸线为辅, 二者相间的岸线格局。近海部分地貌以水下岸坡地貌为主, 其上发育小型沙波、浅滩、沙丘。海域沉积环境受区内多个入海河流影响, 以砂质粉砂浅海沉积为主, 主要河流有深田河、陵水河、太阳河等。海域内水深过渡倾缓, 水深等值线为北东向。

根据中国《全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程》规定, 以海南岛东南海岸带海域 6 m 等深线与海岸线陆侧约 2 km 为海岸带, 等深线 $0\sim 6 \text{ m}$ 范围作为浅海(全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程编写组, 1986), 以此为研究区展开生态系统修复研究。

1.2 数据来源和研究方法

1.2.1 技术流程 结合 InVEST 模型对研究区不同时段的碳储存进行评估模拟, 识别其碳储存时空变化。分析研究区不同区域碳损失程度差异, 划定生态修复分区。并根据生态保护修复标准, 从提升海岸带碳储存功能角度出发, 提出相应的生态保护修复方案建议和意见, 技术路线如图2所示。

1.2.2 数据来源 土地利用数据来自于 Yang 等(2021)基于 GEE 平台, 根据 Landsat 8 影像提取的中国土地利用覆盖集 (CLCDS)^①。该数据集分辨

① <https://essd.copernicus.org/articles/13/3907/2021/>

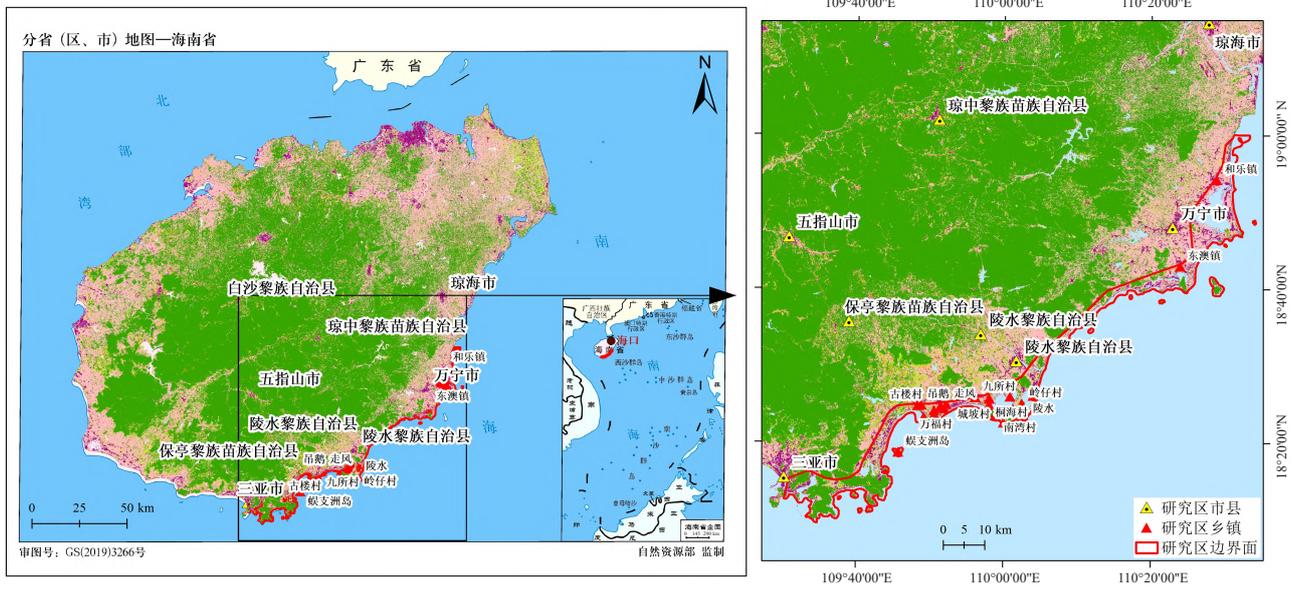


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

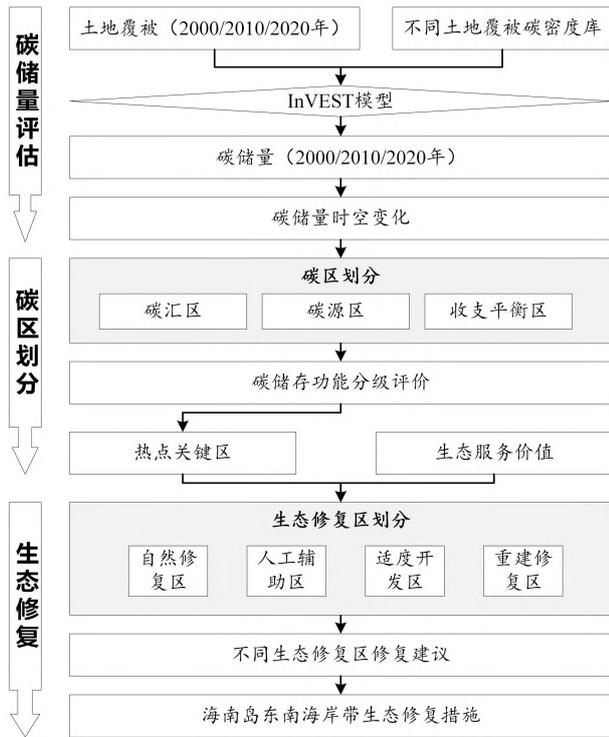


图2 基于碳储存变化的海岸带生态系统修复技术路线

Fig.2 Technical route of coastal ecosystem restoration based on carbon storage change

界裁剪得到土地利用数据。其土地利用可分为10类，分别为浅海、耕地、林地、疏林地、草地、水域、裸地、建设用地、滩涂及盐沼（图3）。其中，耕地主要分布在近海岸带附近区域，沿海岸带呈环状分布，建设用地主要分布在近海村镇等区域周边，林地及草地主要分布于研究区耕地以北区域，靠近中部山区区域。

环境中已有的碳储存大部分依靠4种基本的碳库：地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物。地上生物量包括土壤以上所有存活的植物材料（如树皮、树干、树枝和树叶）；地下生物量包括地上植物持续存活的根系统；土壤库通常被限制为矿质土壤的有机碳，包括有机土壤；死亡的有机物包括凋落物、枯枝落叶或站立着的已死亡的树木中的有机碳含量（Liu et al., 2022）。据此，收集了研究区4种碳库的相关碳密度数据。其中，地上生物量碳库根据已有研究（曹军等，2002；张懿锂等，2004；官惠玲等，2019），按照USGS（United States Geological Survey）土地利用/覆被，采用生物量法结合实地测量，计算获得海南岛各土地利用的碳储量和碳密度。地下碳库参考梅雪英等（2007）根据实地采样估算的湿地现存生物量和初级生产力，采用光合作用原理进一步计算所得碳密度，以地上生物量的30%~80%估算获得地下碳密度。土壤碳库参考张固成等（2011）在海南岛采集

率为30 m，选取其中2000、2010、2020年的土地利用数据，与对应时间段的中国滨海滩涂湿地分布数据叠加（胡忠文等，2021），最后使用研究区边

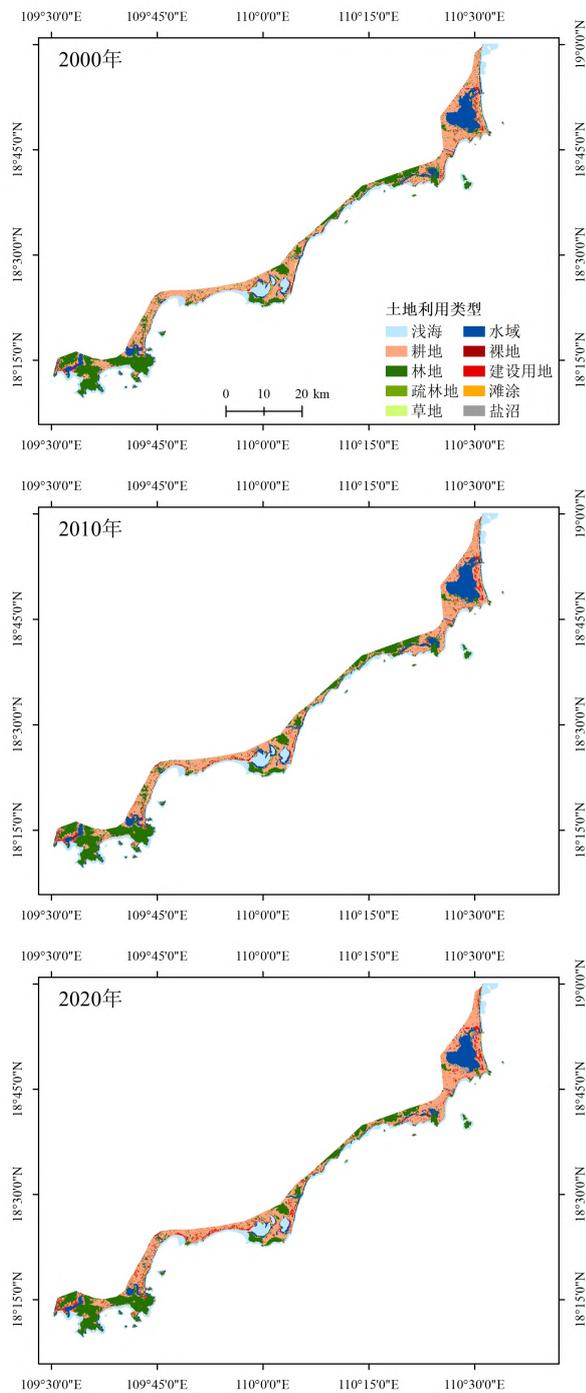


图3 研究区2000—2020年土地利用空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land use in the study area from 2000 to 2020

的土壤样品测算所得其土壤有机碳含量及空间分布,按照研究区用地类型对应其土壤碳密度取值获得。死亡有机物碳库参考文献(朱丽亚等,2022)

② <http://www.cnerm.org.cn/>

③ <http://www.resdc.cn>

对海岸带景观的死亡有机碳库赋值,并结合国家生态科学数据中心^②中海南岛不同景观生态系统碳密度的数据所得,具体见表1所示。

表1 研究区土地利用类型碳库碳密度

Table 1 Carbon density of land use carbon pool in the study area

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
浅海	2	1	26	0
耕地	7.89	4	27.52	0.35
林地	48.18	7.4	39.24	2.8
疏林地	20.07	3.26	25	2
草地	18.24	2.6	10.45	1.4
水域	1.55	0.5	13.53	0
裸地	0	0	14.48	0
建设用地	0	0	14	0
滩涂	3.2	0.7	15.3	0.2
盐沼	7	2.5	20	0.5

生态系统服务价值数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心^③的中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集。其中包括2020年全国生态系统服务价值分布图,其单位为元/hm²。

生态系统服务(Ecological Services)是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务(欧阳志云等,2013)。不同土地利用类型具有不同的生态服务功能与价值,中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集是以全国陆地生态系统类型遥感分类为基础,生态系统类型包括:旱地、农田、针叶林、针阔混交林、阔叶林、灌木林、草原、灌草丛、草甸、湿地、荒漠、裸地、水系、冰川积雪、人工表面(包括建筑用地、工矿用地)15个二级类(农田、森林、草地、湿地、荒漠、水域6个一级类)。参考谢高地等(2015)生态服务价值当量因子法,依据全国净初级生产力NPP、降水量、土壤保持空间分布数据,分别对生态系统各服务价值当量因子价值进行调整,计算了全国11种生态服务的价值。本文使用研究区生态系统服务总值作为生态修复分区的判断因素之一。

1.2.3 InVEST模型 生态系统服务综合评估和权衡(InVEST, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型是由美国斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)与世界自然基金会(WWF)联合开发的用于生态系统服务功能评估的模型系统

(Tang et al., 2015)。目前, 该模型已在 20 多个国家和地区的空间规划、生态补偿、风险管理、适应气候变化等环境管理决策中得到广泛应用。

其中, 碳储存和固存模型可用于估算景观中当前储存的碳量, InVEST 模型使用土地利用分类图及木材采伐量、采伐产品降解率和 4 个碳库的碳密度估算在当前景观下碳储量或者一个时间段内的碳固持(刘晓娟等, 2019)。模型的数学原理(Tang et al., 2015)为:

$$C_{mi} = C_{ma} + C_{mb} + C_{ms} + C_{md} \quad (1)$$

$$A_{\text{total}} = \sum_{m=1}^n C \times S_m \quad (2)$$

式中: A 表示研究区域的总碳储量; m 表示土地利用类型; n 表示土地利用类型的数量; S_m 表示土地利用类型 m 的面积; C_{ma} 、 C_{mb} 、 C_{ms} 和 C_{md} 分别代表该种土地利用类型 m 的地上生物碳储量、地下生物碳储量、土壤有机和死亡有机碳储量的碳密度。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空变化

2.1.1 土地利用时空演变 根据研究区 2000、2010、2020 年土地利用数据, 统计分析其各土地利用类型, 其面积及占比如图 4 所示。可知: 从 2000—2020 年, 耕地、林地始终是研究区主要土地利用类型, 为优势地类, 两者占比总和均超过 70%。耕地主要分布在近海岸带附近区域, 林地及草地主要分布于研究区耕地以北区域。从 2000—2020 年, 耕地面积先减少后增加, 至 2020 年面积

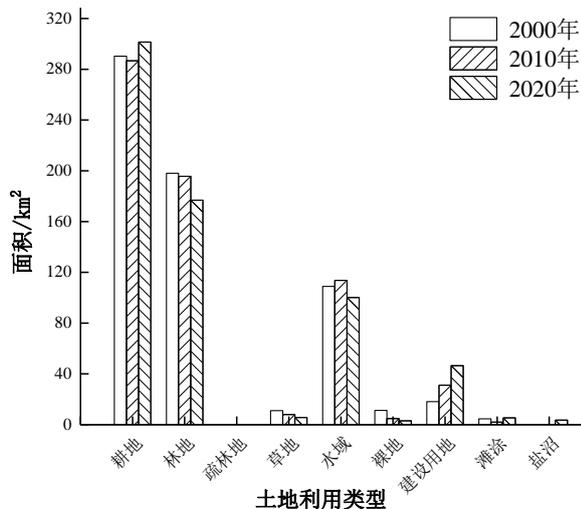


图 4 2000—2020 年研究区土地利用面积

Fig.4 Area of land use in the study during 2000-2020

达到 301.42 km², 占有土地利用类型的 46.93%, 20 年间增加了 11.12 km²。林地面积持续减少, 至 2020 年面积达到 176.89 km², 占比为 27.54%, 20 年间减少了 21.10 km²。20 年间, 草地、水域及裸地均呈现减少的趋势, 建设用地面积持续增长明显, 2000—2020 年面积增加了 28.42 km²。

2.1.2 土地利用流向分析 根据 2000—2020 年研究区土地利用数据, 得到 3 个时间段内的土地利用流向(图 5)。总的来说, 2000—2020 年发生变化的土地利用面积占研究区总面积的 19.09%。其中, 耕地与林地的互相转化最为明显, 变化也较为剧烈, 其转出率分别为 15.77% 和 20.09%。其中, 耕地转化为林地的面积为 17.39 km², 转化为建设用地的面积为 21.65 km², 转化为盐沼的面积为 1.19 km²。林地转化为耕地的面积为 36.18 km², 转化为建设用地的面积为 2.39 km²。建设用地及盐沼的转入趋势显著, 其转入率分别为 63.71% 和 97.93% (图 6), 多为耕地、林地、草地等转变而来。

2000—2010 年研究区土地利用时空变化格局以林地面积增加为主, 主要由耕地、草地、湿地和水域等转化而来, 从 2000—2010 年, 耕地的转出率为 20.85%, 多为耕地转变为林地及建设用地, 面积分别为 224.89 和 23.04 km²。草地和裸地的转出率较高, 分别为 66.08% 和 62.52%; 建设用地的转入率较高, 为 42.78%。2010—2020 年土地利用变化以耕地和建设用地显著增加、林地面积明显减少为主, 部分林地转变成耕地及建设用地。从 2010—2020 年, 林地的转出率为 11.78%, 较 2000—2010 年提升了 6.29%; 耕地的转入率为 25.21%, 较 2000—2010 年提升了 14.11%。滩涂及建设用地的转入率较高, 分别为 84.20% 和 38.10%。

自然因素和社会为因素都可能导致土地利用的转变, 2005 年“达维”、2014 年最强“威马逊”、2016 年“莎莉嘉”等台风袭击万宁、文昌等地, 对海岸带的海防林造成严重破坏(刘旷勋等, 2008; 张书齐, 2019), 导致海岸带林地面积减少。而社会因素中人口变化及经济发展是导致土地利用改变的重要原因(张国桥, 2013)。《2020 年海南统计年鉴》(海南省统计局等, 2021)显示 2020 年底海南省常住人口 944.72 万人, 较 2000 年人口增长 157.72 万人, 增加的大部分人口集中居住在海岸带及其周边地区。根据《2020 年海南省国民经济和社会发展统计公报》(海南省统计局等, 2021), 2000 年为 526.82 亿元, 2020 年地区生产总值(GDP)为

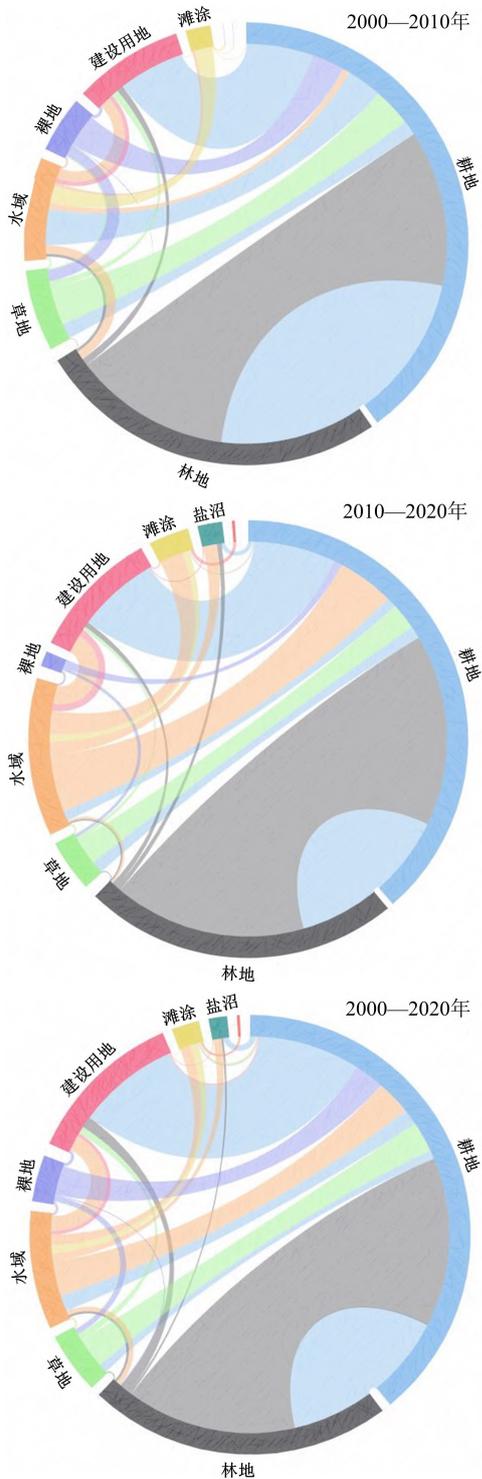


图5 研究区土地利用流向

Fig.5 Flow chart of land use in the study area

注：每种颜色代表一类土地利用，色块的宽度表示每种土地利用的面积大小，越宽土地利用面积越大。以2000—2010年土地利用流向为例：林地向耕地转移时，灰色扇形部分即为其转移部分；即地块所表示那一部分转移色带区域越大，其实际转移面积越大；图中蓝色色带的移动方形即为耕地的转移方向，耕地主要向林地、草地、水域及建设用地转移。

5 532.39亿元，增长了近10倍。产业结构组成上，第一产业与第二产业所占比例下降明显，第三产业增长明显，说明海南省的主导产业已从农业、工业转向服务业，产业结构的转变也对土地利用变化产生影响。人口的强势增长与经济的快速发展导致建设用地面积的大幅度增长。从政策因素上看，2000—2020年，海南省大力发展旅游业开发的项目，也是促使建设用地面积增长的因素之一。《海南省土地利用总体规划》(2006—2020)(中华人民共和国自然资源部，2010)指出耕地面积至2020年保有量应为718 000 hm²，规划期内对破坏的耕地进行退耕，这可能是耕地面积减少的原因。

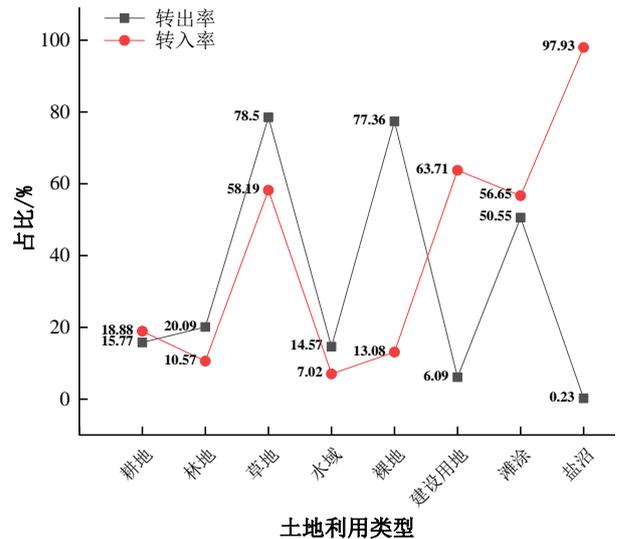


图6 2000—2020年研究区土地利用转入转出率

Fig.6 Transfer in and transfer out rate of land use in the study area from 2000 to 2020

2.2 碳储量时空演变

2.2.1 栅格碳储存变化

基于InVEST模型中的碳储存模块计算得到研究区2000、2010、2020年栅格单元的碳储量。图7显示：碳密度为1.18~8.52 t/hm²，从2000—2020年，单位栅格碳密度均值持续降低，在2000年最高，为4.03 t/hm²，2020年达到最低，为3.87 t/hm²。所有土地利用类型的单位栅格碳密度值从大到小依次为林地、疏林地、耕地、草地、盐沼、滩涂、水域、裸地、建设用地(表2)；在所有土地利用类型中，碳储量最多的为林地，其次为耕地，分别为0.137、0.096 Gt。

按照行政区对研究区的栅格碳密度进行统计分析(图8)。从时间上看，20年间3个区域的平均栅

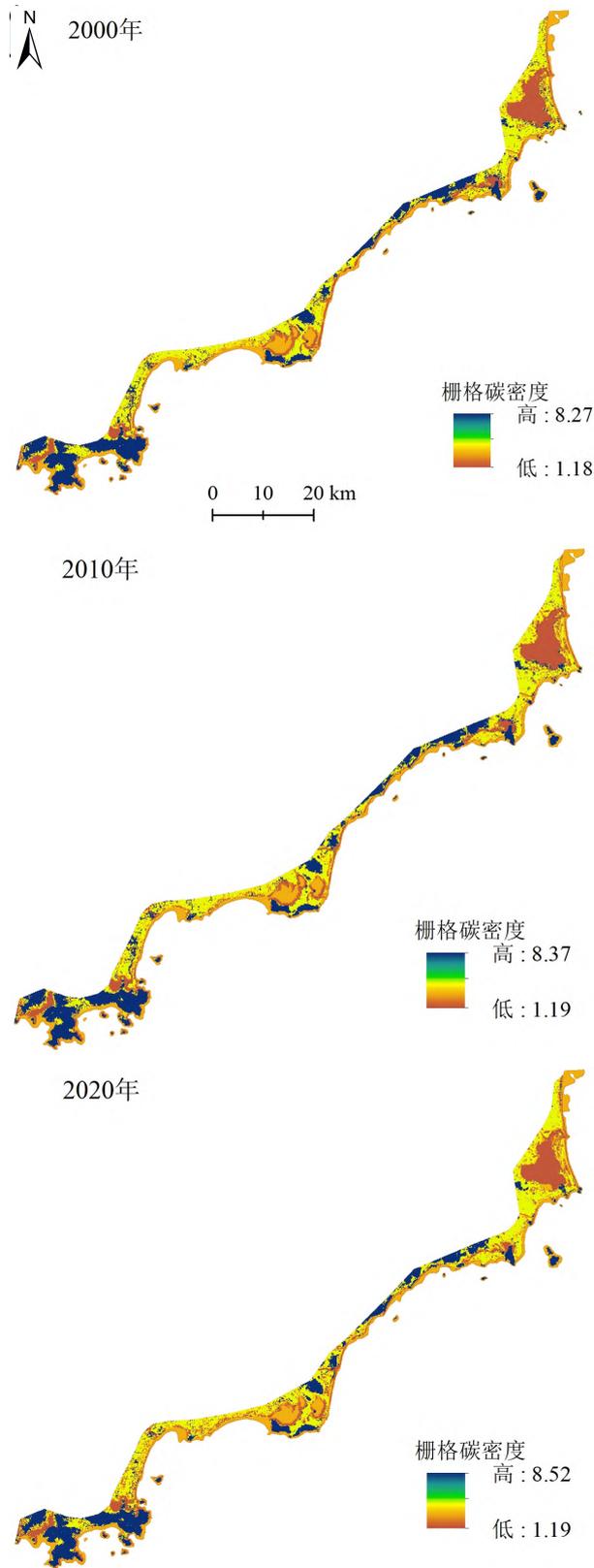


图7 2000—2020年研究区单位栅格碳密度分布
Fig.7 Grid carbon storage distribution in the study area
from 2000 to 2020

表2 2020年研究区不同土地利用类型的
平均单位栅格碳密度统计

Tab.2 Statistics of average grid carbon density of different land
use types in the study area in 2020 t/hm²

土地利用类型	单位栅格碳储量
耕地	3.367
林地	8.517
疏林地	4.262
草地	2.769
水域	1.319
裸地	1.226
建设用地	1.186
滩涂	1.645
盐沼	2.541

格碳密度值都逐渐下降；从空间上看，3个区域的平均栅格碳密度值从大到小排序为三亚市、陵水彝族自治县、万宁市，其平均栅格碳储量分别为5.60、4.02、3.64 t/hm²。2000—2020年，三亚市区域的平均栅格碳密度值降低最为显著，从2000年的5.70下降至2020年的5.45 t/hm²，下降了0.25 t/hm²；陵水彝族自治县与万宁市分别下降了0.16和0.22 t/hm²。20年间，碳储量低的区域沿着海岸带环线向内陆延伸，万宁市区域单位栅格碳密度值最低，三亚市区域单位栅格碳密度降低最多，其原因可能是万宁市长时间的不合理土地开发、浅海的养殖业的兴盛及三亚市部分区域旅游业的大力发展，导致不透水表面及养殖坑塘增加，植被覆盖和土壤质量下降，最终使地上生物量及土壤有机碳储量下降。

栅格碳储存量较高的区域主要集中在较为为内陆的区域及研究区南部，主要分布林地、水域及草地。根据2000—2020年碳储量平均值与其对应面积的乘积，得到研究区2000—2020年的碳储存总量：2000、2010、2020年碳储存总量分别为2.87、2.85、2.76 Gt，整体逐段下降，共减少了0.11 Gt，减少显著。

根据2000—2020年研究区4类碳储量得到图9所示变化结果。结果显示，2000—2020年不同地层的碳储量变化较为明显，其含量由高到低依次为土壤有机碳储量、地上生物碳储量、地下生物碳储量和死亡有机碳储量。地上生物碳储量显著下降，其可能原因是林地、草地、水域面积的减少；地下生物碳储量、土壤有机碳储量与死亡有机碳储量变化趋势类似，均为波动下降；土壤有机碳储量在2010年达到最大值，为1.648 Gt。从4个碳库的碳储量变化看，地上生物碳储量的持续减少是研究区碳储量持续减少的主要影响因素。

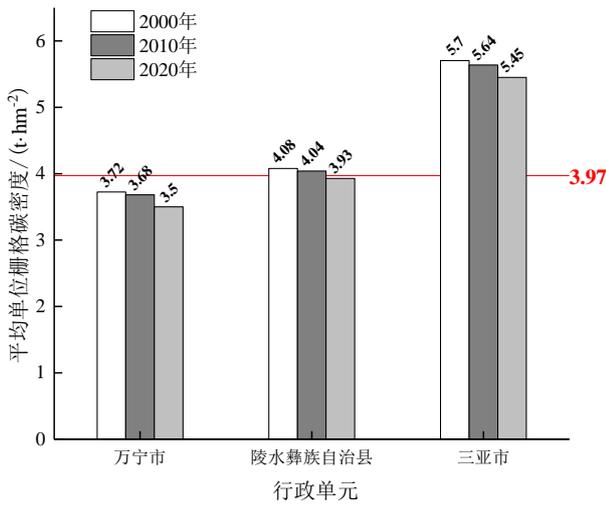


图8 2000—2020年不同行政区内的平均单位栅格碳密度值

Fig.8 Carbon storage density per unit grid in different administrative regions from 2000 to 2020

注：图中红线为20年间工作区全区平均单位栅格碳密度值。

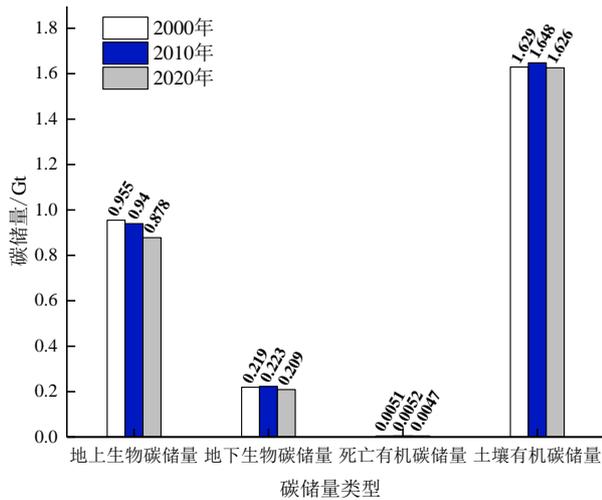


图9 不同类型地层的碳储量统计

Fig.9 Carbon stock statistics of different types of formations

2.2.2 “碳汇”“碳源”区划分 碳储存的动态变化即指示区域碳储量总量的增减，一定时间段内某区域碳储存总量增加明显，即认为该地区为“碳汇”，一定时间段内该区域碳储存总量显著减少，即认为其为“碳源”区，若总量保持在一定范围即为“收支平衡”区。土地利用方式的转变会影响区域碳储量，使“碳汇”“碳源”区相互转变。

分析2000—2010、2010—2020年2个时间段的碳储存结果，根据区域碳储量在对应时间段内的增

减情况，划分碳区并统计各时间段内碳区面积（图10、表3）。总体上，2000—2010年，碳源区面积始终大于碳汇区面积，碳源区面积持续增长，面积为47.65 km²，碳汇区面积为36.75 km²；2010—2020年，碳汇区迅速减少，比上一阶段面积减少2.37 km²，碳源区面积为53.22 km²，比上一阶段增加5.57 km²，且向内陆发展趋势明显，部分区域碳储存功能被严重损坏。图10显示，海岸带南部北高村附近区域，碳汇区面积减少，碳源区面积明显增加，在2000—2010年碳汇区区域集中于蜈支洲岛上

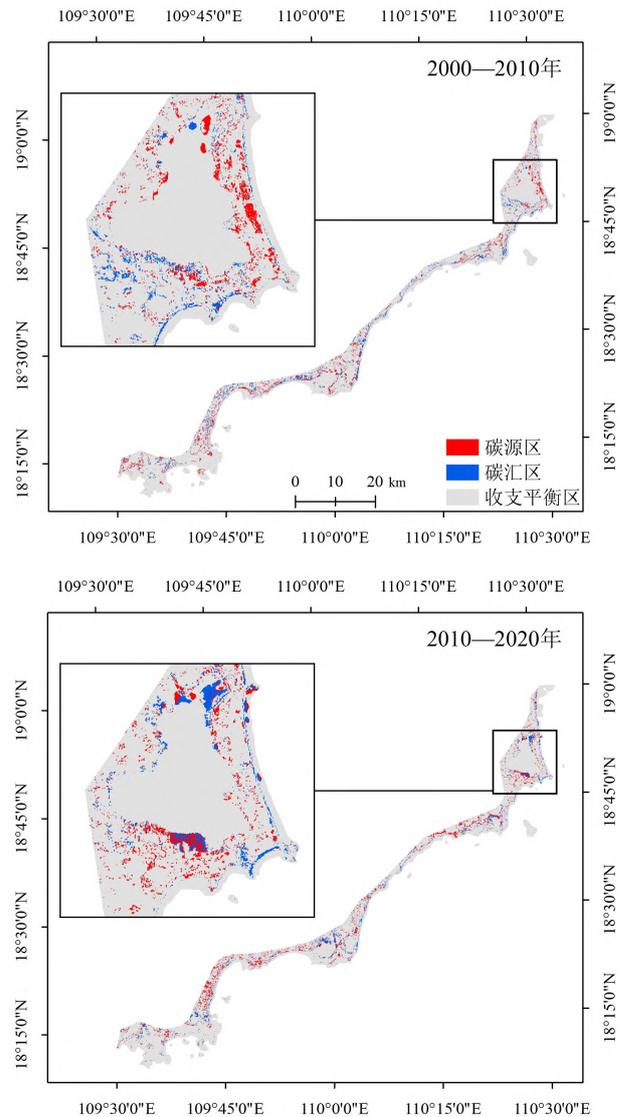


图10 2000—2010年及2010—2020年研究区碳汇、碳源区划分

Fig.10 Division of carbon sink and carbon source areas in the study area during 2000-2010 and 2010-2020

表3 2000—2010年及2010—2020年研究区
碳汇、碳源区面积变化

Table 3 Change of carbon sink and carbon source area in the
study area during 2000-2010 and 2010-2020 km²

时间段	区类	面积
2000—2010年	碳汇区	36.75
	碳源区	47.65
2010—2020年	碳汇区	34.38
	碳源区	53.22
2000—2020年	碳汇区	46.32
	碳源区	76.55

方, 而到2010—2020年, 该区域大部分转变为碳源区。这反映研究区碳储存功能下降的区域持续增多, 生态系统退化趋势显著。

2.2.3 碳储存功能评价 2000—2020年, 由于经济建设和乱砍滥伐、海岸带养殖及旅游开发等人类工程活动, 研究区天然林、湿地草地锐减, 导致气候干热、土地荒漠化日益严重, 碳汇区面积减小, 碳储存功能持续下降。而对研究区碳储存功能进行分级评价, 能更精准的识别研究区生态被破坏、碳损失为较严重的区域, 有利于对其进行及时的修复, 维护地区碳储存。通过NBC(自然断点分类法)按照碳损失程度对生态系统碳损失功能进行分级, 得到其分级结果(图11)。

其中, 碳储存功能评价等级极差、差、良好的地区面积分别为39.84、27.31和10.85 km²。等级为差和较差的区域主要分布在研究区北部万宁市和乐镇、东澳镇附近, 南部海岸带沿线, 蜈支洲岛上方区域, 古楼村周边区域(图11-a1、b1); 西南部主要分布于三亚市、凤凰岛等东部区域; 中部主要分布于陵水彝族自治县、沿海的赤岭村、南湾村、大坡村等附近区域。优和良好的区域主要分布于研究区北部海岸带, 和乐镇下方湖泊周边的滩涂及近海湿地水域等区域。从图11-a2、b2可得出, 碳储存功能较差的区域土地利用类型多为耕地、裸地及建设用地。

3 生态修复

3.1 生态修复分区

基于2020年中国陆地生态系统服务价值空间分布数据, 得到海南省陆地生态系统服务价值空间分布数据(徐新良等, 2017), 其分布见图12所示。采用NBC(自然断点分类法)对生态系统服务价值进行分类, 从1级至4级等级越高代表价值越高。

结合《海岛生态整治修复技术指南》《滨海湿

地生态修复技术指南》等的原则和规定, 将碳储存功能空间分布与海南岛陆地生态系统服务价值进行空间分布叠加, 划分出自然修复区、人工辅助区、适度开发区和重建修复区4类生态修复分区(李扬帆等, 2020)。其中, 重建修复区的碳储存功能差及生态系统服务价值低, 该区域大都受到外力胁迫基本丧失碳储存功能, 生态系统大部分遭到严重破坏, 退化或完全改变, 无法通过自然再生或在少量人工辅助下实现自然恢复。重建修复区面积为54.13 km², 分布在研究区的北部的耕地区域, 中南部黎安镇、童湾村附近建设用地、裸地、浅海水域等区域, 南部沿海万福村、三亚市附近(图13)。人工辅助区生态系统服务价值高且碳储存功能一般, 生态系统的完整性可以修复到较高水平, 该区域面积为161.08 km², 主要分布在万宁市沿海、湖泊滩涂周边, 和西部林地、耕地、裸地区域。自然修复区生态系统服务价值高且碳储存功能一般至优良的区域, 该区域面积为489.12 km², 在研究区全境均有大量分布。适度开发区为生态系统服务价值一般且碳储存功能较高的区域, 该区域面积为35.98 km², 主要分布在中西部沿海区域, 长坡村、九所村、第三村等村镇附近。

3.2 重点修复措施

以需要实施修复措施的3个分区(自然修复区、人工辅助区及重建修复区)为基础, 以恢复海岸带生态系统碳储存为目标, 以保护保育为面, 以重建修复为点, 以海岸带碳廊道网络为线(叶有华等, 2021), 结合海南省国土空间规划, 海岸带生态保护修复、流域山水林田湖草生态保护修复等重点工程, 通过生态修复建设达到海岸带生态系统受损状况大幅改善、生态系统功能和碳储存能力提升的目的。

3.2.1 自然修复区 自然修复区是碳储存功能较高、生态系统服务价值也较高的区域, 区域内生态系统表现出轻微破坏, 但维持在自我稳定的状态内。区域林内有足够繁殖体、自我更新能力强。针对该修复区内自然林草地、盐沼与滩涂区域, 如研究区内三亚市南部区域、陵水彝族自治县中部等地区, 应加强海岸带保护, 严格管控沿海岸段的开发利用, 以沿海岸段为环, 统筹滨海滩涂、海岸、湿地系统的治理维护, 确保自然岸线保有率。对于碳汇价值丰富的区域, 应创新生态资源价值转化通道。坚持生态保护优先, 挖掘生态资源价值, 探索提供高价值生态产品, 积极增加区域碳汇, 建立差

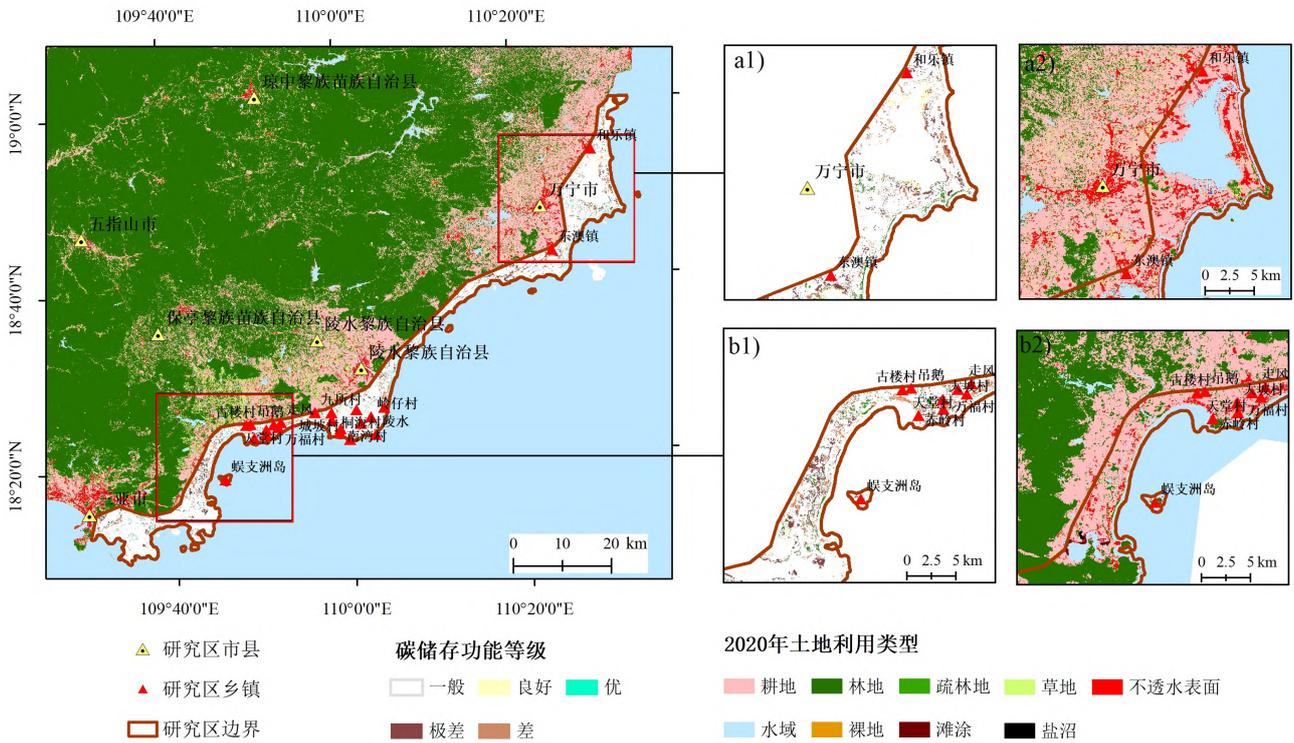


图11 生态系统碳储存功能评价
 Fig.11 Evaluation of carbon storage function of ecosystem

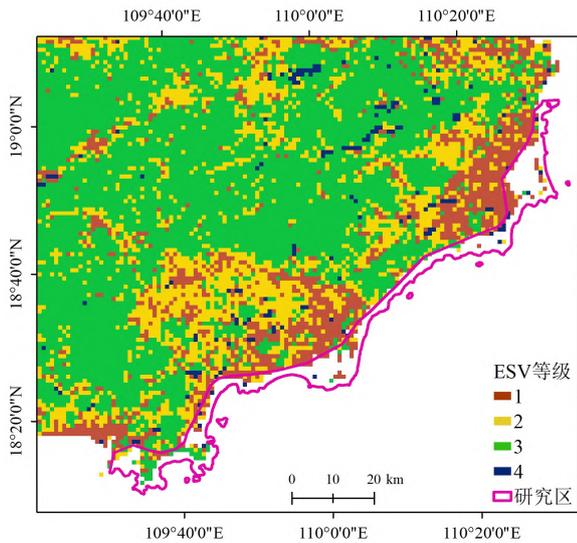


图12 研究区陆地生态系统服务价值分级
 Fig.12 Classification of terrestrial ecosystem service value in the study area

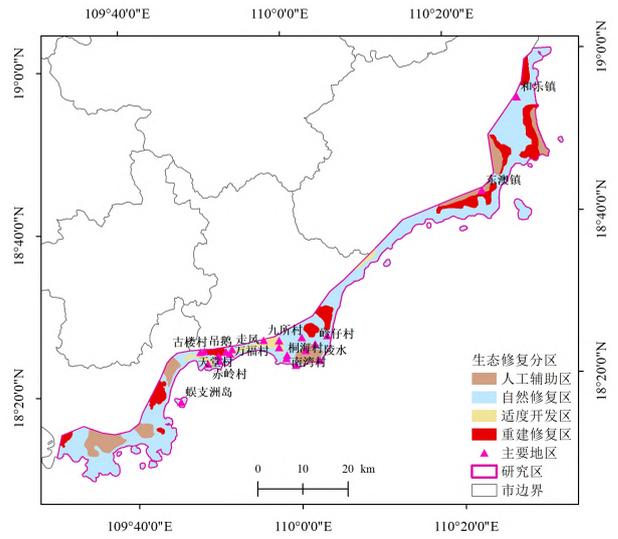


图13 研究区生态修复分区
 Fig.13 Ecological restoration zoning of the study area

异化生态补偿机制。具体措施为：

- 1) 保护林草地，主要采取去除外界压力或干扰、封滩育林的方式。常见的干扰因素包括林下采捕、果实采集、污染排放、家禽养殖以及轻微的病

虫害和海漂垃圾等。对于植被退化程度较轻，区内幼苗和繁殖体数量较多区域，应消除常见外界压力或干扰，充分发挥植被自我修复能力。

- 2) 针对滩涂盐沼区域，可制定海滩保护方案，封滩育林。

3) 针对浅海及滩涂区域, 应重点关注生态系统完整与健康, 采取水系恢复、海草床等植被保育、水质污染防治、过度捕捞防治等措施, 尽可能恢复受损滨海湿地的结构与功能, 最终通过区域的自我修复达到提升碳储存功能的目的。

3.2.2 人工辅助区 人工辅助区内多覆盖潟湖、养殖坑塘、盐田及农场, 土地利用粗放, 并且多处存在旅游业开发导致海岸侵蚀沙化加剧的现象。海岸潟湖是重要的海岸湿地类型之一, 能发挥防潮护岸、降解污染、防洪保水等作用(吴协保等, 2020)。但由于部分区域渔民长期以养殖为主要用地方式, 渔排养殖区产生的饵料沉降于海底腐烂, 导致海水水质下降, 海草床等滨海湿地面积萎缩, 海岸带生态服务功能下降, 碳储量损失严重。为防止其损失恶化, 提出以下修复措施:

1) 以海南岛主要入海河流为廊道, 统筹山水林田湖海的系统保护, 重点治理河口、潟湖等河海交汇区, 实现生态系统的山海相通。针对养殖坑塘面积过大, 如陵水新村潟湖和黎安潟湖、万宁东鲁等区域, 在保持原有植被不被破坏的基础上, 适当拆除养殖区, 保留部分坑塘的塘坝, 调整现有粗放式养殖方案。

2) 以资源环境承载力为基准, 优化近岸海域建设活动, 除保障性产业用海外, 其他海域空间以保护为主, 积极拓展深远海的开发利用, 发展新兴海洋产业。针对养殖池塘以潟湖、河道等为废水排放造成的水质污染、河道淤积及损害浅海生态等状况, 可以采用清理岸线各类垃圾, 建设垃圾收集点及转运站, 配套污水处理设备, 在近岸水深 5 m 以内的海底以及滩涂放流贝类、清淤疏浚等措施。

3) 构建“两空间一红线”近岸海域总体布局, 对近岸海域开发保护功能进行引导。“两空间”包括海洋生态空间和海洋开发利用空间, “一红线”为海洋生态保护红线。针对被人为开发过度, 岸线侵蚀较为严重的地区, 如三亚亚龙湾周边区域, 开展湿地修复和岸线修复工程, 通过人工沙滩补沙、生态护坡、非法构筑物拆除、退堤还林等针对性修复措施, 恢复受损区域生态, 进而恢复其碳储存功能。对于侵蚀较严重岸段, 需查清侵蚀机理, 在必要的区域建设水下潜堤或人工岬角等, 跟进修复进度。

4) 建设以海岸带一体化监测体系为基础的智慧城市海岸带管理平台, 综合运用现代化新型信息技术, 历史卫星影像、无人机或航空影像、研究区基

础地理信息等, 实现自动实时的生态环境现状及修复进程监测, 以及及时掌握区域生态状况, 跟进修复进度。在人工辅助区内即对需要修复的区域进行识别, 通过各种人为手段, 辅助该区域的生态环境修复工程, 恢复其生态系统功能及碳储存能力, 实现人与自然和谐共处。

3.2.3 重建修复区 重建修复区内碳储量显著下降, 生态系统大部分退化或完全改变, 海岸带区域各生态斑块连通性被阻隔, 生境被破坏。为修复碳储存功能, 在消除胁迫因素的基础上, 实施生境修复、人工种植、封滩禁海等手段进行重建性修复。针对海南岛东南海岸带村镇扩张、林草地侵占、沙滩退化等现象, 加强围填海管控, 强化湿地生态建设与修复, 构建“一环、多廊、多点”湿地保护格局, 建立以“自然保护区—湿地自然公园”为主体的湿地保护体系, 保障湿地面积不减少、功能不降低。即利用重建滨海湿地, 退养还湿, 补充种植等生态重建的方式, 增加浅海湿地面积、逐步恢复海岸带区域植被及土壤质地, 这有利于增强区域地上生物量固碳量及土壤固碳能力, 进而提高生态系统碳储存能力。具体措施为:

1) 针对海岸带滨海湿地, 如黎安镇、桐海村等区域, 拆除占据海域或滩涂的围塘堤坝及构筑物, 修复微生物群落, 恢复湿地盐沼植被、补充种植适宜当地气候环境的植被, 增强受损湿地碳储存功能。

2) 强化水源涵养、水土保持等生态功能区的保护。针对因多处海水养殖坑塘而产生的垃圾废水长期向海岸超标排放, 导致的海防林树木枯死, 面积缩减, 沙滩海滩侵蚀, 浅海及近海区域的土壤环境及水质被破坏的区域, 如万宁市港尾村、和乐镇内村仔村、东澳镇中草村、外坡村、大石岭北村等。应进行退养还湿工作, 以地区海滨生态环境特征为依据, 借助修筑防护堤、人工增沙、补沙和保育等手段, 通过改善土壤结构, 重塑被侵蚀沙滩地区的水土平衡条件, 从而达到维护沙滩平衡, 降低海岸侵蚀的目的。

3) 针对旅游业开发及村镇扩张, 不透水表面的增多导致的林草地侵占及部分岸线海防林密度稀疏, 林地、湿地宽度缩减区域, 如古楼村、蜈支洲岛左侧港尾村、龙江村、三亚市左侧等地。应加强自然保护地及自然林草地监管工作, 恢复适宜本地环境生长的林木或灌丛, 重现如木麻黄、青梅—柄果木林、万宁水椰林、秋茄树林、刺篱木灌丛、厚

藤铺地黍群落灌丛等原生景观。

4) 维护生物多样性, 加强外来物种管控, 开展外来物种入侵调查, 针对被外来物种侵占的生境, 应及时对其进行完全彻底的清除及实行若干预防措施, 保护本地生物多样性。

4 讨论与结论

4.1 讨论

海南岛东南海岸带的碳储量分布具有明显的空间区域特征, 20 a间, 研究区“碳源区”的面积始终大于“碳汇区”, “碳源区”面积持续增加, 碳储量低的区域沿着海岸带环线向内陆延伸, 万宁市区域单位栅格碳密度值最低, 20 a间三亚市区域单位栅格碳密度降低最多。其主要原因在于海岸带南部北高村附近、中部蜈支洲岛上方等区域碳源区面积的增加, 林草耕地等碳密度值高的地区面积的减少。土地利用中林地单位碳密度值最大, 建设用地碳密度值最小, 对应土地利用流向变化及其流动原因, 耕地、林地、水域与建设用地的相互转化是引起碳储量变化的主要因素。可能是20世纪以来, 人口的强势增长与经济的快速发展、浅海的养殖业及旅游业规模的迅速扩张, 海岸带部分地区建设用地面积大幅度增长, 林地和草地转变成建设用地、滩涂盐沼及水域等转变成养殖坑塘, 导致植被覆盖和土壤质量, 地上生物量及土壤有机碳储量的下降, 养殖坑塘及盐田的低效率利用导致湿地、海防林等面积萎缩, 最终使碳汇区转变为碳源区。海南岛东南海岸带碳储量的时空变化与已有研究(胡杰龙等, 2015; 朱美玲等, 2016; 官惠玲等, 2019; 江洪等, 2021) 较为一致。

研究区碳储存功能各等级之间呈现较为聚集的分布特征。等级为差和较差的区域主要分布在建设用地聚集, 开发强度大的区域, 如万宁市和乐镇、三公坡等区域; 等级为优和好的区域主要分布于内陆林草地、滩涂湿地及近海海防林等地, 如陵水彝族自治县光坡村、赤岭村等区域、三亚市南部凤凰岛周边区域。针对这种聚集性特征, 提出了相应的修复措施, 如恢复适宜本地环境生长的林木或灌丛的同时对外来物种进行调查, 防止外来物种侵占本地生物生境, 此方法能为滨海生物提供栖息地, 遏制生境的持续破碎与扰动, 维持区域生态平衡; 利用人工辅助的手段, 通过对养殖坑塘, 河道, 岸线的改善及整治, 类似修复策略能连通区内生态斑块, 恢复海岸带生态系统基础功能。然而本研究仅

基于碳储存对生态修复提供策略, 对于开展完善的生态修复措施, 还需要进一步开展实地调查, 获取更多当地资料进而制定生态修复总体方案。

InVEST模型的运用能直观地展现和定量地分析地类转换和土地利用强度对碳储量的影响, 可以为区域兼顾经济发展和生态系统保护提供新思路, 然而模型模拟过程中会存在许多不确定性(Clerici et al., 2019)。InVEST模型碳储量模块假设生态系统碳密度数据在时间尺度上保持不变, 但实际碳密度受多种因素的影响容易发生变化(Zhou et al., 2020), 因此采用不变的碳密度数据可能会使研究区生态系统碳储量估算存在误差。此外, 土地数据因其分辨率及解译过程, 也会产生一定的误差, 对碳储量模拟结果也存在一定影响。未来, 应对研究区不同土地利用类型碳密度进行连续监测, 并提高土地利用数据的准确度及分辨率, 从而提高碳储量模拟精度。

4.2 结论

本文基于InVEST模型估算2000、2010、2020年海南岛东南海岸带碳储量, 评价其碳储存功能。依据生态修复原则及双碳、国土空间规划思想等, 制定有针对性的海岸带生态修复措施。主要得到以下结论:

1) 2000—2020年, 耕地、林地始终是研究区主要土地利用类型, 为优势地类。20 a来, 耕地面积先减少后增加, 林地面积持续减少, 建设用地面积持续增长明显。自然因素和社会因素的综合影响造成土地利用的转变, 发生变化的土地利用面积占总面积的19.09%, 变化也较为剧烈。建设用地及盐沼的转入趋势显著, 多为耕地、林地、草地等转变而来。

2) 2000—2020年, 栅格碳储量最高的是林地, 最低的是建设用地; 碳储量最多的为林地, 其次为耕地, 分别为0.137、0.096 1 Gt。从空间上看, 碳储量低的区域沿着海岸带环线向内陆延伸, 万宁市区域单位栅格碳密度值最低, 三亚市区域单位栅格碳密度降低最多。2000、2010、2020年碳储存总量分别为2.87、2.85、2.76 Gt。碳源区面积始终大于碳汇区面积, 碳源区面积持续增长且向内陆发展趋势明显, 碳汇区面积在10 a间迅速减少, 部分区域碳储存功能被损坏。

3) 依据碳储存功能与陆地生态系统服务价值的叠加结果, 划分4个修复单元(自然修复区、人工辅助区、重建修复区和适度开发区)。针对不同

的修复区，在国土空间规划及碳中和碳达峰思想指导下，有针对性、差异化地提出包括退养还湿、岸线修复、湿地重建、加强监管等生态修复策略。

参考文献 (References):

- Christopher J Crossland, Dan Baird, Jean-Paul Ducrot, Han Lindeboom, Robert W Buddemeier, William C Dennison, Bruce A Maxwell, Stephen V Smith, and Dennis P Swaney. 2005. The Coastal Zone: A Domain of Global Interactions. *Coastal Fluxes in the Anthropocene*. ISBN: 978-3-540-25450-8.
- Clerici N, Cote-Navarro F, Escobedo F J, Rubiano K, and Villegas J C. 2019. Spatio-Temporal and Cumulative Effects of Land Use-Land Cover and Climate Change on Two Ecosystem Services in the Colombian Andes. *Science of the Total Environment*, 685: 1181-1192.
- 曹军, 张懿铨, 刘燕华. 2002. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. *地理研究*, 21 (5): 551-560. [Cao Jun, Zhang Yili, and Liu Yanhua. 2002. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in Hainan Island over the Last 20 Years. *Acta Geographical Research*, 21(5): 551-560.]
- 段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 刘铁冬, 邱新彩, 张阳阳. 2022. 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. *水土保持通报*, 42 (5): 301-311. [Duan Xuanyu, Gong Wenfeng, Sun Yuxin, Liu Tiedong, Qiu Xincai, and Zhang Yangyang. 2022. Land Use Change and Its Impaction Temporal and Spatial Evolution of Carbon Storage in Coastal Zone of Hainan Island. *Acta Bulletin of Soil Andand Water Conservation*, 42(5): 301-311.]
- 官惠玲, 樊江文, 李愈哲, 钟华平. 2019. 海南岛天然草地有机碳分布格局及碳储量估算. *生态环境学报*, 28 (6): 1092. [Guan Huiling, Fan Jiangwen, Li Yuzhe, and Zhong Huaping. 2019. Organic Carbon Distribution Pattern and Carbon Storage Estimation of Natural Grassland in Hainan Island. *Acta Journal of Ecological Environment*, 28(6): 1092.]
- Herr D, and Landis E. 2016. *Coastal Blue Carbon Ecosystems*. Washington D C: The Nature Conservancy.
- 海南省统计局, 国家统计局, 海南调查总队. 2021. 2020 年海南省国民经济和社会发展统计公报. (2021-02-10) [2022-09-10]. <https://www.hainan.gov.cn/hainan/tingju/202102/b8b6c0a3294b4502b08c08b3ba5e6822.shtml>. [Hainan Provincial Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics, Hainan Survey Corps. 2021. Statistical Bulletin of National Economic and Social Development of Hainan Province in 2020. (2021-02-10) [2022-09-10]. <https://www.hainan.gov.cn/hainan/tingju/202102/b8b6c0a3294b4502b08c08b3ba5e6822.shtml>.]
- 洪华生, 丁原红, 洪丽玉, 熊小京. 2003. 我国海岸带生态环境问题及其调控对策. *环境工程学报*, (1): 89-94. [Hong Huasheng, Ding Yuanhong, Hong Liyu, and Xiong Xiaojing. 2003. The Problems of Coastal Eco-Environment in China and Its Countermeasures. *Acta Journal of Environmental Engineering*, (1): 89-94.]
- 胡杰龙, 辛琨, 李真, 高春, 颜葵. 2015. 海南东寨港红树林保护区碳储量及固碳功能价值评估. *湿地科学*, 13 (3): 338-343. [Hu Jielong, Xin Kun, Li Zhen, Gao Chun, and Yan Kui. 2015. Carbon Storage and Sequestration Function Evaluation in Dongzhaigang Mangrove Reserve of Hainan. *Acta Wetland Science*, 13(3): 338-343.]
- 胡忠文, 徐月, 尹玉蒙, 张康永, 邬国锋, 王晨, 崔丽娟. 2021. 18°N 以北中国滨海滩涂湿地分布数据集 (1989-2020). (2021-10-06) [2022-07-02]. https://www.geodoi.ac.cn/WebCn/HTML_INFO.aspx?Id=78031c84-30c2-45df-8eab-d9bdf5a953b. [Hu Zhongwen, Xu yue, Yin Yumeng, Zhang Kangyong, Wu Guofeng, Wang Chen, and Cui Lijuan. 2021. Data Set of Distribution of Coastal Wetlands in China North of 18° N (1989-2020). (2021-10-06) [2022-07-02]. https://www.geodoi.ac.cn/WebCn/HTML_INFO.aspx?Id=78031c84-30c2-45df-8eab-d9bdf5a953b.]
- 江洪, 虞嘉玮, 蒋世豪, 黄贝莹, 李玉洁. 2021. 基于 CASA 模型和 SEVI 指数的福建省植被 NPP 遥感估算与分析. *海南大学学报 (自然科学版)*, 39 (4): 372-382. [Jiang Hong, Yu Jiawei, Jiang Shihao, Huang Beiyin, and Li Yujie. 2021. Estimation and Analysis of Vegetation Net Primary Productivity of Fujian Province Using CASA Model and SEVI Information. *Journal of Hainan University (Natural Science Edition)*, 39(4): 372-382.]
- Lavery Paul S, Mateo Miguel- Ángel Mateo, Serrano Oscar and Rozaimi Mohammad. 2013. Variability in the Carbon Storage of Seagrass Habitats and Its Implications for Global Estimates of Blue Carbon Ecosystem Service. *PLoS ONE*, 8(9):73748.
- Liu Qing, Yang Dongdong, Cao Lei and Anderson Bruce. 2022. Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in The Tropics: A Case Study of Hainan Island, China. *Land*, 11(2): 244.
- 李刚, 万荣胜, 陈泓君, 唐江浪, 李波. 2018. 海南岛南部海岸线变迁及其成因. *海洋地质前沿*, 34 (1): 48-54. [Li Gang, Wang Rongsheng, Chen Hongjun, Tang Jianglang, and Li Bo. 2018. Coastline Changes and Their Origin in the Southern Hainan Island. *Acta Marine Geological Frontier*, 34(1):48-54.]
- 李杨帆, 向枝远, 杨奕, 王泉力, 李艺. 2020. 基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用. *自然资源学报*, 35 (1): 130-140. [Li Yangfan, Xiang Zhiyuan, Yang Yi, Wang Quanli, and Li Yi. Planning Method and Application of Coastal Ecological Restoration Based on the Concept of Resilience. *Acta Journal of Natural Resources*, 35(1): 130-140.]
- 刘旷勋, 郝清玉, 黄星. 2008. 海南省海防林的概况及思考. *消费导*

- 刊, (19): 205. [Liu Kuangxun, Hao Qingyu, and Huang Xing. 2008. The General Situation and Thinking of Coastal Defense Forest Inin Hainan. *Acta Province Consumer Guide*, (19): 205.]
- 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 石洪, 欧金沛. 2019. 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. *热带地理*, 39 (3): 397-409. [Liu Xiaojuan, Ni Li Xia, Liang Xun, Shi Hong, and Ou Jingpei. 2019. Simulating the Change of Terrestrial Carbon StroageStorage in China Based on the FLUS-In VEST Model. *Tropical Geography*, 39(3): 397-409.]
- 刘子刚. 2004. 湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究. *地理科学*, 24 (5): 634-639. [Liu Zigang. 2004. Carbon Stock and GHG Emission of Wetland Ecosystem. *Acta Geographical Science*, 24(5): 634-639.]
- 梅雪英, 张修峰. 2007. 长江口湿地海三棱蔗草 (*Scirpus mariqueter*) 的储碳、固碳功能研究——以崇明东滩为例. *农业环境科学学报*, 26 (1): 360-363. [Mei Xueying, and Zhang Xiufeng. 2007. Carbon Storage and Fixation Function of *Scirpus Mariqueter* in Changjiang River Estuary: A Case Study of Chongming Dongtan Wetland. *Acta Journal of Agricultural Environmental Science*, 26(1): 360-363.]
- Nemani and Running Steven W. 1995. Satellite Monitoring of Global Land Cover Changes and Their Impact on Climate. *Climatic Change*, 31(2/4): 395-413.
- 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫, 郑华, 张琰, 肖焱. 2013. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. *生态学报*, 33 (21): 6747-6761. [Ouyang Zhiyun, Zhu Chunquan, Yang Guangbin, Xu Weihua, Zheng Hua, Zhang Yan, and Xiao Yi. 2013. Gross Ecosystem Product: Concept, Accounting Framework and Case Study. *Acta Ecologica Sinica*, 33(21): 6747-6761.]
- 全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程编写组. 1986. 全国海岸带和海涂资源综合调查简明规程. 北京: 海洋出版社. [Compilation Group of the Concise Rules for the Comprehensive Survey of Coastal Zone and Tideland Resources in China. 1986. *Concise Rules for the Comprehensive Survey of Coastal Zone and Tideland Resources in China*. Beijing: Ocean Press.]
- Sun Wanlong and Liu Xuehua. 2020 Review on Carbon Storage Estimation of Forest Ecosystem and Applications in China. *Forest Ecosystems*, 7(1): 14.
- 隋玉正, 孙大鹏, 李淑娟, 徐永臣, 吴晶晶. 2021. 碳储存变化背景下东营市海岸带生态系统保护修复. *生态学报*, 41 (20): 8112-8123. [Sui Yuzheng, Sun Dapeng, Li Shujuan, Xu Yongchen, and Wu Jingjing. 2021. Study of Coastal Zone Ecosystem Restoration in the Context of Carbon Storage Change: A Case Ofof Dongying City. *Acta Ecological Science*, 41(20): 8112-8123.]
- Tang Yao, Zhu Weipin, Zhang Hui, and Song Yu. 2015. A Review on Principle and Application of the Invest Model. *Ecol. Sci.*, 34: 204-208.
- Wang Jinzhu, Zhang Qian, Gou Taoji, Mo Jianbing, Wang Zifang and Gao Ming. 2018. Spatial-Temporal Changes of Urban Areas and Terrestrial Carbon Storage in The Three Gorges Reservoir in China. *Ecological Indicators*, 95(12): 343-352.
- 王法明, 唐剑武, 叶思源, 刘纪化. 2021. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策. *中国科学院院刊*, 36 (3): 241-251. [Wang Faming, Tang Jianwu, Ye Siyuan, and Liu Jihua. 2021. Blue Carbon Sink Function of Chinese Coastal Wetlands and Carbon Neutrality Strategy. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 36(3): 241-251.]
- 王金华, 黄华梅, 贾后磊, 郑淑娴, 赵明利, 陈绵润, 张晓浩, 庄铎. 2020. 粤港澳大湾区海岸带生态系统保护和修复策略. *生态学报*, 40 (23): 8430-8439. [Wang Jinghua, Huang Huamei, Jia Houlei, Zheng Shuxian, Zhao Mingli, Chen Mianrun, Zhang Xiaohao, and Zhuang Duo. 2020. Discussion on the Strategies of Coastal Ecosystem Protection and Restoration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Ecologica Sinica*, 40 (23): 8430-8439.]
- 吴协保, 曾晖, 谢邦雄, 刘伟, 卢立, 杨克仁, 林新军, 寇峰. 2020. 海南陵水新村潟湖滩涂红树林生态修复关键技术研究. *湿地科学与管理*, 16 (1): 60-63. [Wu Xiebao, Zeng Hui, Xie Bangxiong, Liu Wei, Lu Li, Yang Keren, Lin Xingjun, and Kou Feng. 2020. Key Technologies for Ecological Restoration of Mangrove Forest in Lagoon Tidal-Beach of Xincun Town, Lingshui County in Hainan. *Acta Wetland Science & Management*, 16(1): 60-63.]
- 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 2015. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37 (9): 1740-1746. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changsun, Xiao Yu, and Lu Caixia. 2015. The Value of Ecosystem Services in China. *Acta Resource Science*, 37(9): 1740-1746.]
- 邢庆会, 于彩芬, 廖国祥, 雷威, 卢伟志, 徐雪梅, 刘长安. 2022. 浅析我国海岸带蓝碳应对气候变化的发展研究. *海洋环境科学*, 41 (1): 1-7. [Xing Qinhui, Yu Caifen, Liao Guoxiang, Lei Wei, Lu Weizhi, Xu Xuemei, and Liu Chang'an. 2022. A Brief Analysis on The Development of Coastal Blue Carbon in Response to Climate Change in China. *Acta Marine Environmental Science*, 41(1): 1-7.]
- 徐新良, 刘纪远, 张增祥, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正. 2017. 中国5年间隔陆地生态系统空间分布数据集内容与研发. *全球变化数据学报*, 1 (1): 52-59. [Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhang Zhenxiang, Zhou Wancun, Zhang Shuwen, Li Rendong, Yan Changzhen, Wu Shixin and Shi Xuezheng. 2017. Content and Research and Development of Spatial Distribution Data Set of Terrestrial Ecosystems in China at

- 5-Year Intervals. *Journal of Global Change Data*, 1 (1): 52-59.]
- 薛杨. 2017. 海南岛东北部沿海防护林生物量与碳储量监测与评价研究——海南省林业科学研究所森林生态科研团队. 科技成果管理与研究, (11): 59. [Xue Yang. 2017. Monitoring and Evaluation of Biomass and Carbon Storage of Coastal Shelter Forests in the Northeast of Hainan Island: Forest Ecological Research Team of Hainan Forestry Research. *Acta Institute Management and Research of Scientific and Technological Achievements*, (11): 59.]
- Yang Jie and Huang Xin. 2021. The 30 M Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China From 1990 To 2019. *Earth System Science Data*, 13(8): 13-3907-2021.
- 严格, 葛振鸣, 张利权. 2014. 崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布. 应用生态学报, 25 (1): 85-91. [Yan Ge, Ge Zhenming, and Zhang Liqun. 2014. Distribution of Soil Carbon Storage in Different Saltmarsh Plant Communities in Chongming Dongtan Wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(1): 85-91.]
- 叶有华, 林珊玉, 何玉琳, 王丹丹, 陈晓意, 倪广艳. 2021. 粤港澳大湾区海岸带生态系统修复框架. 生态学报, 41 (23): 9186-9195. [Ye Youhua, Lin Shanyu, He Yulin, Wang Dandan, Chen Xiaoyi, and Ni Guangyan. 2021. Restoration Framework of Coastal Ecosystems in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Ecologica Science*, 41(23): 9186-9195.]
- Zhou Junju, Zhao Yaru, Huang Peng, Zhao Xi, Feng Wei, Li Qiaoqiao, Xue Dongxiang, Dou Jiao, Shi Wei, Wei Wei, Zhu Guofeng, Liu Chunfang. 2020. Impacts of Ecological Restoration Projects on the Ecosystem Carbon Storage of Inland River Basin in Arid Area. *Ecological Indicators*, 118(11): 106803.
- 张固成, 傅杨荣, 何玉生, 杨奕, 郭跃品, 张家友, 马荣林, 李随云. 2011. 海南岛土壤有机碳空间分布特征及储量. 热带地理, 31 (6): 554-558. [Zhang Gucheng, Fu Yangrong, He Yusheng, Yang Yi, Guo Yueping, Zhang Jiayou, Ma Ronglin, and Li Suiyun. 2011. Distribution and Storage of Soil Organic Carbon in Hainan Island. *Tropical Geography*, 31(6): 554-558.]
- 张国桥. 2013. 连云港海岸带土地资源利用研究. 北京: 中国地质大学(北京). [Zhang Guoqiao. 2013. *Study on Land Resources Utilization in Lianyungang Coastal Zone*. Beijing: China University Of Geosciences (Beijing).]
- 张丽, 廖静娟, 袁鑫, 穆晓东, 宋茜茜, 毕京鹏. 2020. 1987—2017年海南岛海岸线变化特征遥感分析. 热带地理, 40 (4): 659-674. [Zhang Li, Liao Jingjuan, Yuan Xin, Mu Xiaodong, Song Xixi, and Bi Jingpeng. 2020. Remote Sensing Analysis of Coastline Changes in Hainan Island during 1987-2017. *Tropical Geography*, 40(4): 659-674.]
- 张书齐. 2019. 海南岛海岸带土地利用/覆被变化及其对碳储量的影响研究. 海口: 海南大学. [Zhang Shuqi. 2019. *Land Use/Cover Change and Its Impact on Carbon Storage in the Coastal Zone of Hainan Island*. Haikou: Hainan University.]
- 张懿铨, 张玮, 丁明军. 2004. 基于土地利用/覆被分类系统估算碳储量的差异——以海南岛森林为例. 地理科学进展, (6): 63-70. [Zhang Yili, Zhang Wei, and Ding Mingjun. 2004. The Difference of Carbon Storage Estimated Based on Land Use/Cover Classification System: Take Hainan Island Forest as an Example. *Progress in Geographical Science*, (6): 63-70.]
- 中华人民共和国自然资源部. 2010. 海南省土地利用总体规划(2006—2020年)(2010-01-08) [2022-09-10]. https://www.mnr.gov.cn/gk/ghjh/201811/t20181101_2324787.html. [Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2010. Overall Land Use Plan of Hainan Province (2006-2020)]
- 朱丽亚, 胡克, 孙爽, 刘禹含, 梁佳欣. 2022. 基于InVEST模型的辽宁省海岸带碳储量时空变化研究. 现代地质, 36 (1): 96-104. [Zhu Liya, Hu Ke, Sun Shuang, Liu Yuhuan, and Liang Jiabin. 2022. Study on Spatiotemporal Variation of Carbon Storage in Coastal Zone of Liaoning Province Based on InVEST Model. *Acta Modern Geology*, 36(1): 96-104.]
- 朱美玲, 王旭, 王帅, 王文蕾, 邹耀进, 梁卿雅. 2016. 海南儋州橡胶树、桉树人工林碳储量及其动态变化. 生态科学, 35 (3): 43-51. [Zhu Meiling, Wang Xun, Wang Shuai, Wang Wenlei, Zhou Yaojin, and Liang Qinya. 2016. Carbon Storage and Distribution of Rubber and Eucalyptus Plantations in Danzhou, Hainan Island. *Acta Ecologica Science*, 35(3): 43-51.]

作者贡献声明:

孙天成: 论文撰写、论文修改、研究总体框架设计;

马梓程: 碳密度数据收集、整体实验设计;

黄赞慧: 论文质量把控、图表制作;

王照翻: 生态修复策略撰写;

陈思: 土地利用数据收集、流向分析;

肖瑶: 碳储量估算研究;

谢翠容: 生态修复相关数据资料收集;

岳常海: 完善实验思路、论文修改;

贾凤鸣: 部分数据处理;

张倩: 图表精修。

Coastal Ecosystem Restoration Strategy Based on Carbon Storage Change: A Case Study of the Southeast Coastal Zone of Hainan Island

Sun Tiancheng^{1,2}, Ma Zicheng^{2,3}, Huang Zanhui^{1,3}, Wang Zhaofan¹, Chen Si², Xiao Yao²,
Xie Cuirong², Yue Changhai², Jia Fengming², and Zhang Qian²

[1. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China; 2. Hubei Institute of Land and Mapping, Wuhan 430034; 3. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China]

Abstract: Carbon peak and neutralization, land space ecological restoration, and sustainable management of sea areas and islands are all important components of national development strategies. In recent years, owing to the impact of natural factors, human interference, and global climate change, the ecosystem of the southeast coast of Hainan has been seriously damaged, and its carbon sink function has decreased significantly. This decline in the ecological quality of the southeast coast of Hainan is inconsistent with the positioning requirements of the Hainan Free Trade Port and the National Ecological Civilisation Construction Pilot Zone. Thus, ecosystem restoration based on carbon storage needs to be urgently explored. Using the southeast coast of Hainan Island as an example, the carbon storage module based on the InVEST model, combined with the land use data of the study area in 2000, 2010, and 2020, the carbon storage of the study area was estimated. The carbon sink and carbon source areas were divided, and the carbon storage function was evaluated. Over the past two decades, carbon loss in the study area has been identified, and areas with serious carbon loss were identified, with the ecological restoration functional area divided. The results showed that the ecosystem in the study area was damaged to varying degrees, decreasing by 1.11 Gt over 20 years. Traditionally, the area of the carbon source is always larger than that of the carbon sink. Areas with poor and extremely poor carbon storage functions were 39.84 and 27.31 km², respectively. According to the superposition results of the carbon storage function and terrestrial ecosystem service value, four restoration units (natural restoration area, artificial auxiliary area, reconstruction restoration area, and moderate development area) were selected. In light of the different restoration areas and under the guidance of land space planning and the idea of carbon neutral and carbon peaks, ecological restoration strategies, including rehabilitation and restoration of wetlands, shoreline restoration, wetland reconstruction, and strengthening supervision, have been proposed in a targeted and differentiated manner. The research results have important reference value for strengthening the protection of the restoration area in the southeast coastal zone of Hainan, stabilizing the carbon storage capacity, reversing the trend of carbon loss, and realizing effective protection and restoration of the damaged ecosystem. Furthermore, the ecological service function and quality of coastal zones, and the marine ecological compensation mechanism, can be further improved.

Keywords: carbon storage; carbon assessment; ecological restoration; InVEST model; southeast coastal zone of Hainan Island