

基于 InVEST 模型的广西茅尾海土地利用变化与碳储量评估

吴舒雁, 朱庆林, 翟焕锋

(中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要: [目的] 评估广西壮族自治区茅尾海土地利用与碳储量的时空变化特征, 为促进增碳汇与可持续发展提供科学依据。[方法] 使用监督分类的方法对茅尾海 2009、2015 和 2021 年的 3 期遥感影像数据进行解译提取, 基于 ArcGIS 软件和 InVEST 模型对茅尾海土地利用变化与碳储量演化进行研究。[结果] ① 茅尾海土地类型主要呈现“大聚居, 小杂居”的分布特点, 2009—2021 年耕地、浅海水域和渔业养殖区面积减少, 红树林湿地、建筑用地、林草地、淤泥质滩涂面积增加; ② 茅尾海碳储量呈先下降后上升趋势, 2009—2015, 2015—2021, 2009—2021 年区域碳储量变化量分别为 -1.10×10^5 , 3.77×10^4 , -7.29×10^4 t; 碳固定净值分别为 -1.37×10^8 , 4.66×10^7 , -9.01×10^7 元; ③ 2009—2021 年, 茅尾海主要为渔业养殖区、林草地等高固碳土地利用类型向建筑用地等低固碳类型的转变, 转为建筑用地造成的碳储量损失最大, 达 2.85×10^5 t; 转为渔业养殖区增加的碳储量达 1.81×10^5 t。[结论] 加快推动茅尾海养殖方式转型升级, 加强红树林在宜林区域的增殖及加快森林城市建设, 有利于研究区域固碳与可持续发展。

关键词: 土地利用变化; 碳储量; InVEST 模型; 茅尾海; 广西壮族自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0432-11

中图分类号: P76

文献参数: 吴舒雁, 朱庆林, 翟焕锋. 基于 InVEST 模型的广西茅尾海土地利用变化与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 432-442. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240019.001; Wu Shuyan, Zhu Qinglin, Zhai Huanfeng. Assessment of land use change and carbon storage in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 432-442.

Assessment of Land Use Change and Carbon Storage in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region Based on InVEST Model

Wu Shuyan, Zhu Qinglin, Zhai Huanfeng

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: [Objective] Changes in land use and carbon storage in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region were analyzed in order to provide a scientific basis for increasing its carbon sink capacity and improving its ecological value. [Methods] The supervised classification method was used to interpret and extract remote sensing image data for Maowei Sea in 2009, 2015, and 2021. ArcGIS and the InVEST model were used to analyze spatiotemporal changes in land use and carbon storage in Maowei Sea. [Results] ① The land use types in Maowei Sea mainly showed the distribution characteristics of “large settlement, small mixed residence”. The areas of cultivated land, shallow sea waters, and fishery breeding areas decreased, and the areas of mangrove wetlands, building land, forest grassland, and silty tidal flats increased from 2009 to 2021. ② Carbon storage initially decreased and then increased over time. Changes in net carbon sequestration and its net present value in Maowei Sea were, respectively, -1.10×10^5 tons and -1.37×10^8 yuan, 3.77×10^4 tons and 4.66×10^7 yuan, and -7.29×10^4 tons and -9.01×10^7 yuan in 2009—2015, 2015—2021 and 2009—2021. ③ The conversion from high carbon sequestration land use types (fishery breeding areas and forest and

收稿日期: 2023-05-16

修回日期: 2023-07-13

资助项目: 国家海洋软科学研究课题“海岸带规划与其他规划的关系和协调研究”(OSS2017-04)

第一作者: 吴舒雁(1998—), 女(汉族), 广西壮族自治区玉林市人, 硕士研究生, 研究方向为滨海湿地碳储量。Email: wushuyan@stu.ouc.edu.cn.

通信作者: 朱庆林(1966—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 副教授, 主要从事海洋资源环境管理, 海洋空间规划方面的研究。Email: qinglinzhu@ouc.edu.cn.

grasslands) to low carbon sequestration land use types (building land) in Maowei Sea in 2009—2021 caused the largest carbon storage loss, reaching 2.85×10^5 t. The conversion to fishery breeding areas increased carbon storage by 1.81×10^5 t. [Conclusion] Accelerating the conversion and upgrading of farming methods, increasing the proliferation of mangrove forests in terrestrial and aquatic forested areas, and accelerating the construction of forest cities will promote carbon sequestration and sustainable development in Maowei Sea.

Keywords: land use change; carbon storage; InVEST model; the Maowei Sea; Guangxi Zhuang Autonomous Region

随着人类社会的发展,以二氧化碳为主的温室气体排放量迅速增加,造成全球范围内剧烈的气候变化,甚至威胁到人类社会的生存和可持续发展。目前,气候变化已变成全人类面临的全球性问题。“减排”和“增汇”被认为是应对气候变化、实现“双碳”目标的重要途径^[1-2]。“减排”是指减少化石和生物等燃料的使用,而“增汇”是指通过地表生态系统吸收和存储大气中过量的碳^[3-4],其中陆地生态系统通过光合作用过程固定的二氧化碳称为“绿碳”^[5],海洋生态系统吸收固定的二氧化碳称为“蓝碳”^[4]。通过增加森林、草地、湿地与海洋碳汇等手段,可以有效地控制温室气体的排放,已成为各国应对气候变化的重要战略。茅尾海位于中国钦州湾海域北部,其北部沿岸滩涂生长着大片红树林,同时是中国著名的牡蛎、对虾、青蟹的生产基地,水域资源丰富,具有极大的海洋碳汇能力。同时,茅尾海周边陆域森林繁茂,草地、耕地错落有致,陆域碳固存能力也不可小觑。综上,茅尾海区域同时是强大的海洋碳汇与陆地碳汇资源区,但随着人类社会的快速发展,茅尾海土地利用类型变化剧烈,并对生态系统碳储量产生重要影响。

土地利用变化可通过改变生态系统植被和土壤的固碳能力,进而改变其碳储量,是生态系统碳储量及碳循环的重要决定因素^[6]。现有的围绕土地利用变化对碳储量影响的研究主要分为实地采样分析方法和模型模拟方法这两个方面,而国内外学者多用 InVEST 模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)进行生态系统碳储量的模拟计算。InVEST 模型于 2007 年由斯坦福大学、世界自然基金会(WWF)和大自然保护协会(TNC)联合开发,包括陆地、淡水和海洋 3 类生态系统服务评估模型,以空间数据信息和社会经济数据为输入,可模拟出不同土地利用下的生态系统服务功能,用于评估生态系统服务功能量及其经济价值、支持生态系统管理和决策。目前,InVEST 模型在生态系统服务评价中发挥越来越重要的作用,其中的碳储量模块已被国内外学者熟练应用于评估各种不同类型研究区域碳汇能力^[7-11]。目前对茅尾海的研究主要聚焦在养殖污染风险评价和红树林演变情况等^[12-14],尚未涉及其碳储量资源评估。基于此,本研究基于 InVEST 模

型,结合遥感影像数据、碳密度数据和碳经济数据,量化分析茅尾海土地利用变化与碳储量演化特征,并探究碳储量对土地利用变化的响应,以期优化茅尾海土地利用、促进其碳资源可持续发展提供科学依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

茅尾海地处广西壮族自治区(以下简称广西)钦州市南部,北部湾顶部,位于东经 $108^{\circ}28'$ — $108^{\circ}42'$,北纬 $21^{\circ}44'$ — $21^{\circ}54'$,是以钦江和茅岭江为主要入湾径流的河口海滨区,三面环陆,是典型的半封闭海湾,属亚热带海洋性季风气候,日照充足,潮汐类型为不规则全日潮^[15]。茅尾海沿岸径流主要为茅岭江、钦江,河口形成三角洲平原地貌,潮滩广阔,以淤泥质滩涂为主^[16]。茅尾海渔业养殖区资源丰富,是近江牡蛎的全球种质资源保留地和中国最重要的养殖区与采苗区,被誉为“中国大蚝之乡”,同时也是岸基池塘养殖分布较为集中的海湾,主要养殖对虾、青蟹、石斑鱼、鲈鱼等海水养殖产品^[17-18]。但由于长年开展养殖活动,茅尾海浅海水域水质较差,整体为劣 4 类。广西秉持生态优先原则,于 2005 年建立茅尾海红树林自治区级自然保护区,又于 2011 年建立茅尾海国家级海洋公园,保护当地的红树林典型生态系统,红树林湿地面积不断增加。近年来,随着“一带一路”倡议的推进,茅尾海地区因其优越的地理区位获得了新的发展契机,建筑用地面积不断扩大,林草地与耕地面积减少。茅尾海有着独特的河口—海湾—城市湿地多生态系统^[19],地类转移活动较频繁,具有较高的研究价值。本文研究区域为西起钦东高速,东至 G228 国道,北临兰海高速,南至七十二泾为界的范围,结合研究目的与研究区实际情况,将土地利用划分为红树林湿地、浅海水域、淤泥质滩涂 3 类自然湿地类型。渔业养殖区 1 类人工湿地类型,林草地、建筑用地 2 类非湿地类型,以及湿地与非湿地的综合类型耕地。分析其中土地利用变化与碳储量演化特征。

1.2 数据与研究方法

1.2.1 数据来源

(1) 遥感影像数据。遥感影像数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),选取了 2009,

2015 和 2021 年 3 期数据,其中 2009 年数据来自 Landsat4-5 TM 卫星数字产品,2015 和 2021 年数据来自 Landsat 8 OLI_TIRS 卫星数字产品,分辨率均为 30 m。为满足红树林和养殖渔业的观测需求,保证地面特征识别和解译的高精度,每一景数据均选择在 10 月,云覆盖率均 <10%,且潮高相近。

(2) 碳密度数据。钦州红树林生长区域中桐花树占总面积的 60.68%,白骨壤占 23.24%,其余红树林种类占比为 16.08%^[20]。因此,本研究取这两种典型植被的碳密度数据及其所占比例估算茅尾海红树林碳储量。其余植被种类碳密度数据取这两种典型植被的平均值。其中,桐花树和白骨壤的地上、地下和土壤碳密度数据取自何琴飞的研究报告,死亡有机碳密度取自李畅等^[21]的研究。渔业养殖区碳密度来源于潘英等^[22-24]的研究,其他土地利用类型碳密度数据均来自于北部湾或邻近区域研究结果^[25-26],以尽可能精确地计算研究区域碳储量,茅尾海各土地利用类型碳密度数据见表 1。

表 1 广西茅尾海不同土地利用类型碳密度

Table 1 Carbon density of various land use types in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region t/hm²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
红树林湿地	21.42	5.10	47.28	0.49
浅海水域	2.00	1.00	26.00	0.00
淤泥质滩涂	3.20	0.70	15.30	0.20
渔业养殖区	3.40	42.70	69.20	0.00
耕地	13.50	2.70	17.34	5.20
林草地	30.66	14.06	17.87	6.20
建筑用地	1.20	0.93	12.48	0.00

(3) 碳经济数据。①碳税率:本文采用瑞典碳税法,数值为 150 美元/t^[27],以 2003 年人民币与美金的汇率为 1:8.277 4,即为 1 241.6 元/t;②贴现率:贴现率是指将未来支付改变为现值所使用的利率,是国家促使经济扩张或收缩的重要货币政策,反映了相对于未来收益,社会更偏向于当前的直接的好处这一现象。目前文献资源中贴现率一般在 1.95%~6.00% 间^[28],本文取中间值 4%;通货膨胀率:随着社会经济的发展,碳税的价格会随着货币的通货膨胀而产生波动,通货膨胀率反映碳固定价格随时间发生的变化,本文数值参考国家统计局网站多年的平均值 2.40%。

1.2.2 数据处理方法

(1) 遥感影像分类法。遥感影像处理主要包括以下 3 个步骤:①预处理:基于 ENVI 软件对遥感影

像进行预处理,包括辐射定标、大气校正和影像裁剪,以减少影像数据因太阳高度、地形和大气等因素导致光谱信号失真的影响,并裁剪出研究区域。②监督分类:基于 ENVI 软件,结合 Google Earth 等卫星数据,采用最大似然法对影像数据进行监督分类,结合研究目的和研究区实际情况,将其分为红树林湿地浅海水域、淤泥质滩涂、渔业养殖区、耕地、林草地和建筑用地共 7 类土地利用/植被覆盖类型。③精度验证:分类结束后,将分辨率为 30 m 的多光谱影像与分辨率为 15 m 的全色影像进行融合,得到研究区域分辨率为 15 m 的遥感图像。再建立验证样本,对分类后的图像进行精度验证得到混淆矩阵,其中 Kappa 系数均在 0.9 以上,符合试验精度要求。④ ArcGIS 空间分析:基于 ArcGIS 的空间分析空间,对预处理和监督分类后的遥感影像数据进行掩膜提取,并分析提取出土地利用面积和土地利用转移矩阵。

(2) InVEST 模型评估法。传统的碳储量估算方法具有操作成本高、参数复杂的缺点,相比之下,InVEST 模型能实现碳储量空间分布的可视化制图,从而形象地表达碳储量对土地利用变化的响应,并具有操作简便、精度高、运行速度快和数据需求少的优点^[29]。InVEST 模型中 Carbon Storage and Sequestration 模块将生态系统碳储存分为地上生物碳库、地下生物碳库、土壤碳库、死亡有机碳库及第五碳库。由于第五碳库数据难以获取,且影响较小,本研究不做计算。模型计算公式如下:

$$C_t = C_a + C_b + C_s + C_d \quad (1)$$

式中: C_t 为研究区总碳储量(t/hm²); C_a 为地上部分碳储量(t/hm²); C_b 为地下部分碳储量(t/hm²); C_s 为土壤碳储量(t/hm²); C_d 死亡有机碳储量(t/hm²)。

1.2.3 InVEST 模型输出结果

(1) 碳储量。模型运行成功后,可输出当前和未来土地利用/植被覆盖下的每个网格单元碳的总量,这是所有输入碳库的数据,即地上、地下、土壤和死亡有机物碳储量之和。

$$C_t = \sum_{i=1}^n A_i \times (C_{a,i} + C_{b,i} + C_{s,i} + C_{d,i}) \quad (2)$$

式中: C_t 为研究区总碳储量; A_i 为第 i 种土地利用类型的面积; $C_{a,i}$, $C_{b,i}$, $C_{s,i}$, $C_{d,i}$ 分别为第 i 种土地利用类型的地上、地下、土壤与死亡有机碳密度(t/hm²)。

(2) 净碳固定。净碳固定值为基年碳储存累加上一定时间的碳积累,再减去这段时间的碳损失后的碳,最后留下的长期封存的碳。净碳固定为正值,说明从低固碳地类转变为高固碳地类,吸收碳;反之则

说明从高固碳地类转变为低固碳地类,释放碳。

(3) 碳固定净现值。碳固定净现值指当前情景时间和未来情景时间之间,净碳固定的生态系统服务价值,即碳的价值。正值说明该生态系统因土地利用变化吸收二氧化碳所产生的效益;负值则说明土地利用变化造成的二氧化碳释放付出的代价。

1.2.4 土地利用变化引起的碳储量变化 由土地利用转移矩阵与不同地类之间的碳密度差距,可计算出土地利用变化对碳储量的影响,土地利用引起的碳储量的变化等于转化面积与地类转移前后碳密度差值的乘积,计算公式为^[30]:

$$T_{ij} = \sum S_{ij} \Delta C_{ij} \quad (3)$$

式中: T_{ij} 表示第*i*种土地利用类型向第*j*种地类转移所引起的碳储量的变化量; S_{ij} 表示第*i*种地类向第*j*种地类转移的面积; ΔC_{ij} 表示第*j*种地类与第*i*种地类的碳密度差值。

2 结果与分析

2.1 茅尾海土地利用变化特征

本文研究目的聚焦于茅尾海土地利用及其碳储量的时空变化特征,并探究碳储量对土地利用变化的响应,以期优化茅尾海土地利用,提高碳汇能力,促进生态经济可持续发展提供科学依据。

由表 2 可见,本文研究区域总面积为 39 048 hm²,2009—2021 年期间发生土地利用转移面积为 14 212 hm²,占研究区面积的 36.4%,土地利用格局变化较大。主要发生的地类转移为耕地→建筑用地、林草地;林草地→建筑用地;浅海水域→淤泥质滩涂、渔业养殖区;渔业养殖区→建筑用地。耕地面积减少 2 782 hm²,红树林湿地面积增加 472 hm²;建筑用地面积增加 4 525 hm²;林草地面积增加 190 hm²;浅海水域面积减少 3 026 hm²;淤泥质滩涂面积增加 659 hm²;渔业养殖区面积减少 38 hm²,转出与转入面积基本持平。

2009—2015 年,土地利用转移面积为 11 977 hm²,占研究区域面积的 30.67%(表 2),土地利用格局变化较大。主要发生的地类转移有耕地→建筑用地、林草地;林草地、淤泥质滩涂→红树林湿地;林草地、渔业养殖区→建筑用地;林草地→耕地;浅海水域→淤泥质滩涂、渔业养殖区。耕地面积减少 1 421 hm²,红树林湿地面积增加 371 hm²,建筑用地面积增加 2 986 hm²,林草地面积减少 653 hm²,浅海水域面积减少 1 354 hm²,淤泥质滩涂面积增加 527 hm²,渔业养殖区面积减少 456 hm²。

2015—2021 年,土地利用转移面积为 10 804 hm²,占研究区域面积 27.67%(表 2),土地利用格局变化较大。主要发生的地类转移有耕地→建筑用地、林草地;红树林湿地→建筑用地;建筑用地→耕地、林草地;林草地→建筑用地;浅海水域→淤泥质滩涂、渔业养殖区;淤泥质滩涂→红树林湿地;渔业养殖区→建筑用地。耕地面积减少 1 360 hm²,红树林湿地面积增加 101 hm²,建筑用地面积增加 1 540 hm²,林草地面积增加 841 hm²,浅海水域面积减少 1 674 hm²,淤泥质滩涂面积增加 131 hm²,渔业养殖区面积增加 421 hm²。

空间布局上,茅尾海各土地利用类型主要呈现“大聚居,小杂居”的分布特点,各土地利用类型整体上相对集中分布,但同时存在相互交错的状态(图 1)。红树林湿地与淤泥质滩涂这两类自然湿地类型主要分布在湾顶,随时间呈增加状态,湾内两侧沿岸红树林则呈减少趋势。渔业养殖区主要分布在湾顶与湾口七十二泾位置,湾顶养殖塘位于人类活动较密集的海陆交互带,易建设成典型的陆基封闭海产养殖系统,而七十二泾是钦江等多条江流的入海口,咸淡水交汇强烈,均为养殖育苗提供了绝佳的自然环境。由于城市化的推进,湾顶养殖塘面积逐年减少,但随着钦州市大蚝特色产业的快速发展,湾口养殖渔业区面积逐年增加。林草地与耕地主要分布在茅尾海两侧与顶部的陆地上,两者相互交错,其中同时参杂着村落等建筑用地。随着社会的发展,茅尾海顶部建筑用地面积不断增加,导致渔业养殖区与林草地面积减少。此外,由于红树林湿地、滩涂和渔业养殖区面积的增加,湾内水域面积呈逐年减少趋势。

2.2 茅尾海碳储量时空变化特征

本文基于 InVEST 模型,利用土地利用/植被覆盖数据与碳密度数据计算得出,茅尾海 2009,2015,2021 年碳储量分别约为 2.00×10^6 , 1.89×10^6 , 1.92×10^6 t。随时间呈先减少后增加的趋势,2009—2015 年减少了 1.10×10^5 t,2015—2021 年增加了 3.77×10^4 t,2009—2021 年则减少了 7.29×10^4 t(表 3)。

空间布局上,茅尾海单位面积碳储量最高值处位于湾顶与七十二泾的渔业养殖区,而单位面积碳储量位居第二的红树林湿地同样位于湾顶,茅尾海湾顶固碳能力强大。但随着湾顶处的渔业养殖区向建筑用地的转变,其固碳能力略有下降,湾口七十二泾处固碳能力则逐渐上升。森林是陆地碳库的重要组成部分,位于茅尾海两侧及顶部的林草地同样是其固碳能力强盛区域,但随着城镇化的发展,林草地面积下降,碳储量也逐渐下降(见图 2)。

表 2 2009—2021 年广西茅尾海土地利用转移矩阵

Table 2 Transfer area matrix of land types in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2009 to 2021 hm^2

土地利用类型	2021 年面积								
	耕地	红树林湿地	建筑用地	林草地	浅海水域	淤泥质滩涂	渔业养殖区	总和	转出总计
耕地	2 396	14	1 869	1 785	0	2	212	6 278	3 882
红树林湿地	58	867	370	146	26	26	93	1 586	719
建筑用地	366	29	3 098	387	4	9	140	4 033	935
林草地	562	79	1 474	8 198	6	0	107	10 426	2 228
浅海水域	9	328	248	6	8 011	1 289	1 538	11 429	3 418
淤泥质滩涂	19	485	171	9	32	60	93	869	809
渔业养殖区	86	256	1 328	85	324	142	2 206	4 427	2 221
总和	3 496	2 058	8 558	10 616	8 403	1 528	4 389	39 048	
转入总计	1 100	1 191	5 460	2 418	392	1 468	2 183		14 212

土地利用类型	2015 年面积								
	耕地	红树林湿地	建筑用地	林草地	浅海水域	淤泥质滩涂	渔业养殖区	总和	转出总计
耕地	3 062	59	1 425	1 499	0	1	231	6 277	3 215
红树林湿地	16	1 045	241	88	36	25	135	1 586	541
建筑用地	429	69	3 013	347	3	10	162	4 033	1 020
林草地	1197	239	1 123	7 753	8	2	104	10 426	2 673
浅海水域	2	38	105	11	9 606	1 016	652	11 430	1 824
淤泥质滩涂	6	289	176	5	30	134	229	869	735
渔业养殖区	144	218	936	70	393	208	2 458	4 427	1 969
总和	4 856	1 957	7 019	9 773	10 076	1 396	3 971	39 048	
转入总计	1 794	912	4 006	2 020	470	1 262	1 513		11 977

土地利用类型	2021 年面积								
	耕地	红树林湿地	建筑用地	林草地	浅海水域	淤泥质滩涂	渔业养殖区	总和	转出总计
耕地	2 498	9	872	1 356	0	0	121	4 856	2 358
红树林湿地	55	1 300	326	167	10	36	63	1 957	657
建筑用地	505	81	5 369	613	28	24	398	7 018	1 649
林草地	398	12	877	8 431	5	0	52	9 775	1 344
浅海水域	1	28	149	5	7 819	837	1 238	10 077	2 258
淤泥质滩涂	6	290	82	3	288	518	209	1 396	878
渔业养殖区	33	338	883	41	253	112	2 309	3 969	1 660
总和	3 496	2 058	8 558	10 616	8 403	1 527	4 390	39 048	
转入总计	998	758	3 189	2 185	584	1 009	2 081		10 804

a 2009年

b 2015年

c 2021年

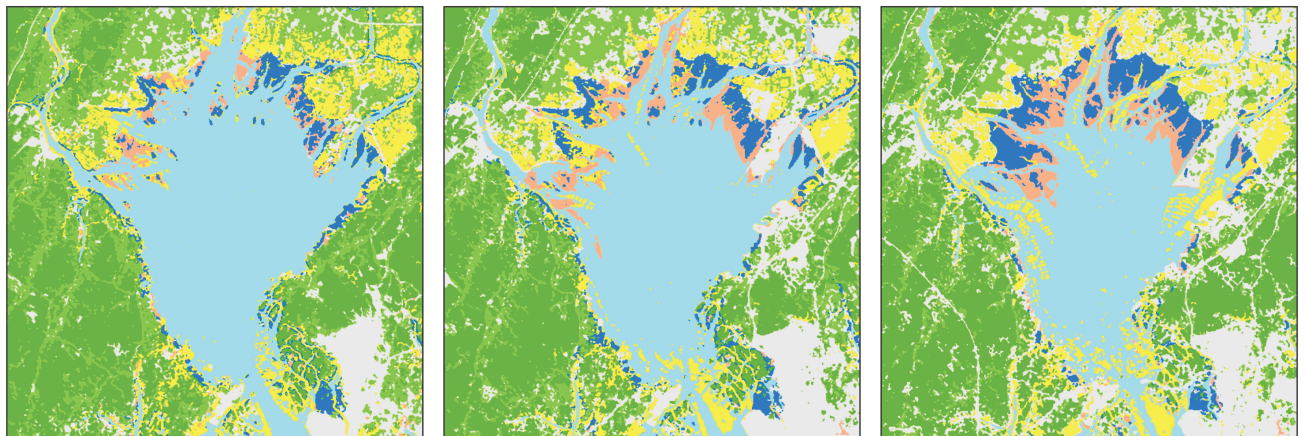


图 1 2009—2021 年广西茅尾海不同土地利用类型分布

Fig.1 Distribution of different land use types in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2009—2021

表 3 2009,2015,2021 年广西茅尾海不同土地利用类型碳储量
Table 3 Carbon storage of different land use types in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region in 2009, 2015 and 2021

年份	不同土地利用类型碳储量/t							总碳储量/t
	红树林湿地	浅海水域	淤泥质滩涂	渔业养殖区	耕地	林草地	建筑用地	
2009	117 823.94	331 441.00	16 858.60	510 433.10	243 209.72	717 204.54	58 922.13	1 995 893.03
2015	145 385.53	292 233.00	27 082.40	457 625.70	188 121.44	672 422.25	102 532.98	1 885 403.30
2021	152 888.82	243 687.00	29 623.80	506 167.00	135 435.04	730 274.64	125 032.38	1 923 108.68

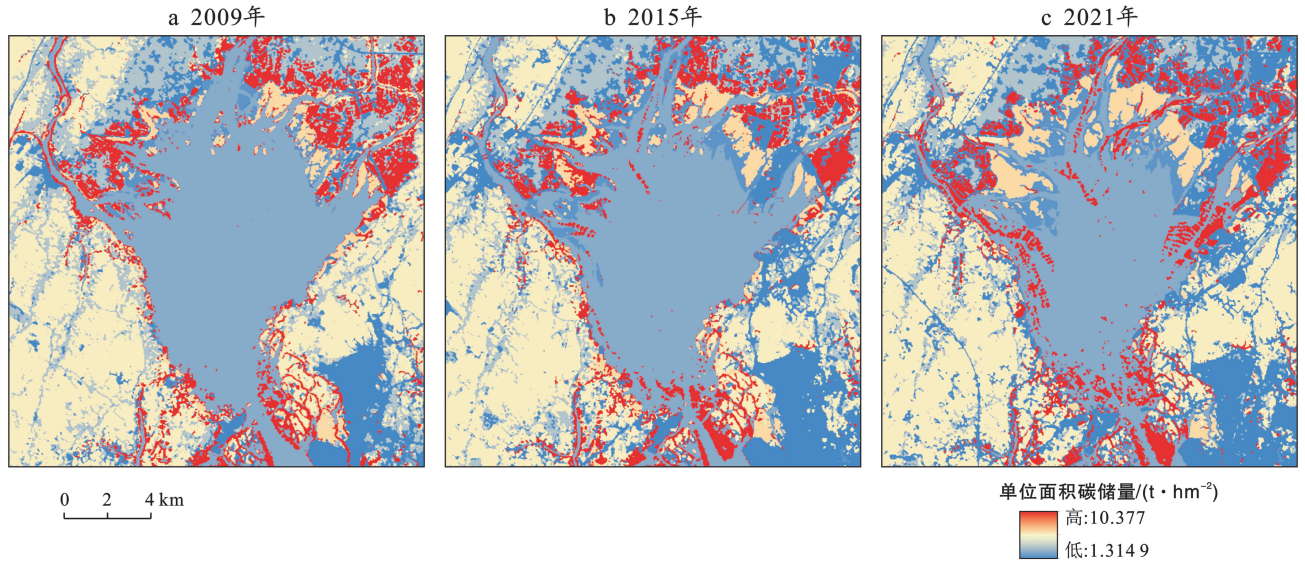


图 2 2009,2015,2021 年广西茅尾海单位面积碳储量空间分布
Fig.2 Spatial distribution of carbon storage per unit area in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region in 2009, 2015 and 2021

2.3 碳储量对土地利用变化的响应

结合 2009—2021 年土地利用转移矩阵与不同地类转换后碳密度的变化,得到碳储量转移矩阵(表 4),从而分析土地利用的变化引起的碳储量变化。从土地利用转出方向来看,渔业养殖区转换为其他地类造成的碳储量损失最大,达到约 1.96×10^5 t,其中渔业养殖区转为建筑用地损失的碳储量达到约 1.34×10^5 t,转为红树林湿地、浅海水域、淤泥质滩涂造成的碳储量损失分别约为 1.05×10^4 t, 2.80×10^4 t,

1.36×10^4 t。其次是林草地的转出,造成的碳储量损失约为 9.16×10^4 t,其中转出为建筑用地损失约 7.99×10^4 t,转出为耕地损失约 1.69×10^4 t。红树林转为其他地类损失造成的碳储量损失约 2.37×10^4 t,其中转为建筑用地损失约 2.21×10^4 t。而浅海水域转为其他高固碳地类,碳储量增加了约 1.32×10^5 t,其中转为渔业养殖区增加了约 1.33×10^5 t,耕地、建筑用地、淤泥质滩涂向其他地类转变,碳储量增加分别约为 2.52×10^4 , 4.57×10^4 , 3.58×10^4 t。

表 4 广西茅尾海 2009—2021 年碳储量转移矩阵

Table 4 Transfer matrix of carbon storage in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2009 to 2021 t

土地利用类型	2021 年碳储量							转出总量
	耕地	红树林湿地	建筑用地	林草地	浅海水域	淤泥质滩涂	渔业养殖区	
耕地	0.00	497.70	-45 098.97	53 639.25	0.00	-38.68	16 230.72	25 230.02
红树林湿地	-2 061.90	0.00	-22 081.60	-803.00	-1 177.54	-1 427.14	3 813.93	-23 737.30
建筑用地	8 831.58	1 730.72	0.00	20 967.66	57.56	43.11	14 096.60	45 727.23
林草地	-16 888.10	434.50	-79 861.32	0.00	-238.74	0.00	4 976.57	-91 577.10
浅海水域	87.66	14 855.12	-3 568.72	238.74	0.00	-12 374.40	132 729.40	131 967.80
淤泥质滩涂	367.46	26 621.65	-819.09	444.51	307.20	0.00	8 918.70	35 840.43
渔业养殖区	-6 584.16	-10 498.56	-133 716.32	-3 953.35	-27 961.20	-13 617.80	0.00	-196 331.00
转入总量	-16 247.46	33 641.13	-285 146.02	70 533.81	-29 012.70	-27 414.90	180 765.90	-72 880.30

从土地利用转入方向来看,除红树林湿地外,其他高固碳地类转为建筑用地造成的碳储量损失最大,达 2.85×10^5 t,其中从渔业养殖区转入造成的碳储量损失约为 1.34×10^5 t;其他低固碳土地利用类型转为渔业养殖区增加的碳储量约为 1.81×10^5 t,其中 1.33×10^5 t 为浅海水域转入;此外,其他高固碳地类转入为耕地、浅海水域、淤泥质滩涂造成的碳储量损失分别约 1.62×10^4 , 2.90×10^4 , 2.74×10^4 t;低固碳地类转入为红树林湿地、林草地增加的碳储量分别约为 3.36×10^4 , 7.05×10^4 t。

综上所述,茅尾海 2009—2021 年更多的是高固碳土地利用类型向低固碳类型的转变(图 3),导致茅尾海碳储量减少,损失约达 7.29×10^4 t。研究年限

内,茅尾海主要发生的地类转移为:林草地→建筑用地与耕地;浅海水域→淤泥质滩涂、渔业养殖区与红树林湿地;淤泥质滩涂→红树林湿地;渔业养殖区→建筑用地;耕地→建筑用地与林草地。如图 3 所示,湾口区域主要为浅海水域向淤泥质滩涂、淤泥质滩涂向红树林湿地、浅海水域向红树林湿地的转变,红树林湿地面积不断增加。湾顶、湾内两侧沿岸与湾口七十二泾处渔业养殖区面积不断增加,主要由浅海水域转化而来。湾顶的陆域部分主要为渔业养殖区向建筑用地的转变,尤其在 2009—2015 年,大量养殖塘转变为建筑用地。林草地、耕地向建筑用地的转变,以及林草地与耕地的互相转变发生在两侧与顶部的陆地区域,使建筑用地面积不断增加。

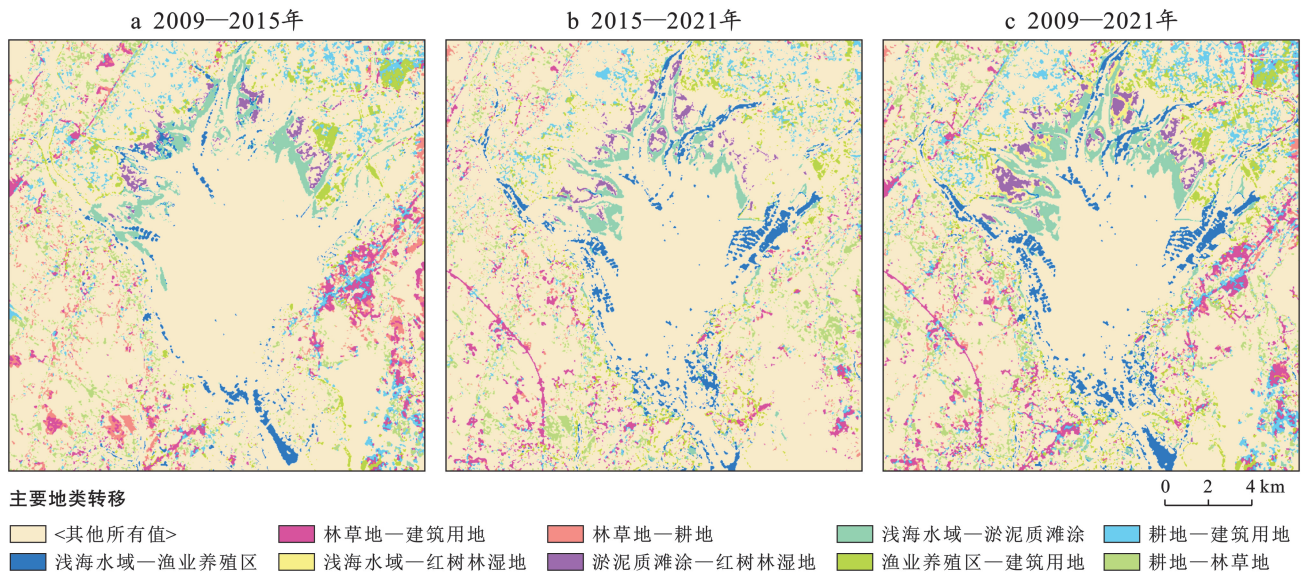


图 3 2009—2021 年广西茅尾海主要土地利用类型转移空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the main land use types transfer in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2009 to 2021

茅尾海 2009—2015, 2015—2021, 2009—2021 年净碳固定值分别为 -1.10×10^5 , 3.77×10^4 , -7.29×10^4 t, 表示随着土地利用的变化, 研究区域碳储量增加或减少的值, 碳储量增加区称为碳汇区, 否则为碳源区。如图 4 所示, 单位面积净碳固定最大值约为 9.06 t/hm², 为建筑用地→养殖渔业区的单位面积碳收入数值; 单位面积净碳固定最小值约为 -9.06 t/hm², 为养殖渔业区→建筑用地时单位面积损失的碳储量。浅海水域→渔业养殖区、浅海水域→红树林湿地、淤泥质滩涂→红树林湿地、林草地→建筑用地的单位面积净碳固定值分别为 7.77 , 4.07 , 4.94 , -5.37 t/hm²。空间布局上, 碳汇区主要集中在湾顶、湾内两侧沿岸与湾口七十二泾处, 均为低固碳地类向高固碳地类转变的区域; 碳源区主要为湾顶东侧陆域, 主要为高固碳类型渔业养殖区向低固碳地类建筑用地转变区域。

碳固定净现值基于土地利用/植被覆盖数据、碳密度数据和碳经济数据计算得出, 碳固定净现值随时间呈先减少后增加趋势, 2009—2015 年减少了约 1.37×10^8 元, 2015—2021 年增加约 4.66×10^7 元, 2009—2021 年共减少约 9.01×10^7 元。如图 5 所示, 单位面积碳固定净现值最大值约为 1.12×10^4 元, 表示从建筑用地→渔业养殖区所产生的碳收益; 单位面积碳固定净现值最小值约为 -1.12×10^4 元, 表示从渔业养殖区→建筑用地需要处理释放的二氧化碳所产生碳损失。同理, 浅海水域→渔业养殖区、浅海水域→红树林湿地、淤泥质滩涂→红树林湿地、林草地→建筑用地的单位面积碳固定净现值分别约为 $9\ 610$, $5\ 043$, $6\ 112$, $6\ 033$ 元。空间布局上, 碳收益区主要集中在湾顶、湾内两侧沿岸与湾口七十二泾处; 碳损失区主要集中在湾顶东侧陆域, 与地类转移及净碳固定空间分布相对应。

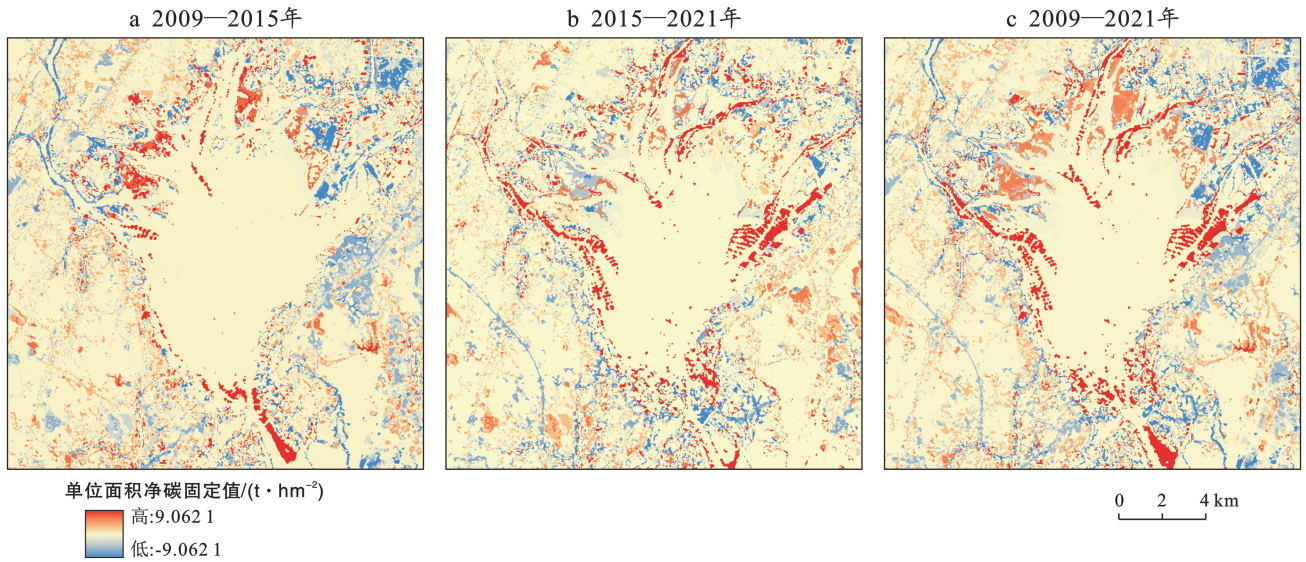


图 4 2009—2021 年广西茅尾海单位面积净碳固定空间分布

Fig.4 Spatial distribution of net carbon sequestration per unit area in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2009 to 2021

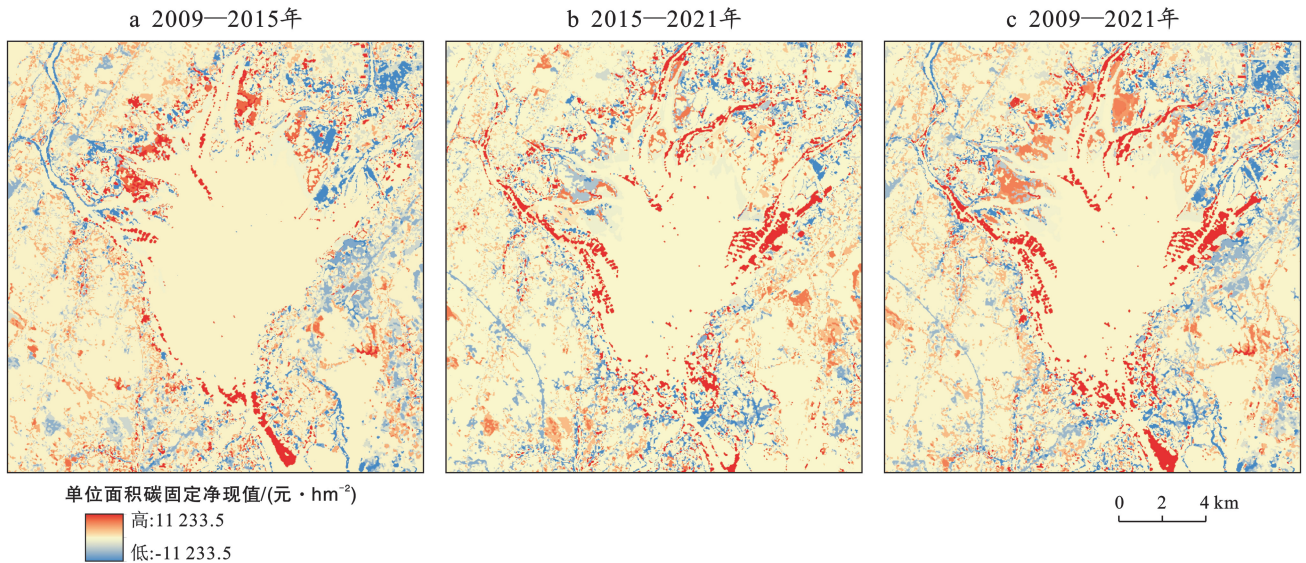


图 5 2009—2021 年广西茅尾海单位面积碳固定净现值空间分布

Fig.5 Spatial distribution of net present value per unit area in Maowei Sea of Guangxi Zhuang Autonomous Region from 2009 to 2021

3 讨论与建议

3.1 讨论

土地利用类型的变化可通过改变区域生态系统的物种组成、生物量等结构,以及生态多样性、碳循环等功能,从而影响区域生态系统的碳储量^[31]。2009—2021 年,茅尾海土地利用的变化使其碳储量呈现先下降后上升趋势。随着社会的快速发展,北部湾城市化、沿海工业和港口建设逐渐兴起,围填海建设造成湾顶处渔业养殖区、林草地和耕地等高固碳地类生存空间被大量挤占,不断地向建筑用地转变,茅尾海碳储量大幅下降。其中,渔业养殖区→建筑用地、林草地→建筑用地、耕地→建筑用地转变的面积

分别为 1 328,1 474,1 869 hm^2 ,造成的碳储量损失分别为 1.34×10^5 , 7.99×10^4 , 4.51×10^4 t。同时,由于湾口养殖渔业的增加,湾内海水流动减缓,营养物质减少,使湾内两侧沿岸红树林湿地减少,降低红树林湿地碳储量的增加速率。此外,湾口七十二泾处养殖方式以浮筏吊养为主,极易受台风等极端天气环境的破坏,2014 年 7 月“威马逊”、“海鸥”超强台风的接连登陆,使茅尾海浮筏吊养几乎覆没,渔业养殖遭受严重损失,渔业养殖区碳储量大量减少。

随着钦州大蚝特色产业的快速发展及政府对红树林湿地、林草地的愈发重视,茅尾海碳储量逐步增加。钦州市大蚝特色产业的快速发展使湾口及湾内两侧沿岸的浅海水域不断向渔业养殖区转变,2009—

2021 年转变面积约为 $1\,538\text{ hm}^2$, 增加的碳储量为 $1.33 \times 10^5\text{ t}$, 七十二泾逐渐成为茅尾海大蚝天然养殖基地, 其以筏式吊养为主, 蚝排遍布, 错落有致。茅尾海红树林湿地面积不断增加, 主要得益于党委政府越来越重视对红树林的保护工作, 使钦州市钦南区天然红树林休养生息得到保障, 自然生长恢复不断扩大, 同时加强沿海滩涂的红树林人工造林和退化林人工修复, 通过实施红树林种苗保障与红树林有害生物防控工程, 宜林滩涂造林和宜林养殖塘退塘还林的红树林营造工程, 对被破坏的红树林进行占补平衡, 异地造林修复, 并严厉打击破坏红树林的违法行为, 使茅尾海红树林面积实现稳步增加。浅海水域→红树林湿地、淤泥质滩涂→红树林湿地转变的面积分别约为 $328,485\text{ hm}^2$, 增加碳储量分别为 1.49×10^4 , $2.67 \times 10^4\text{ t}$ 。此外, 随着“绿水青山就是金山银山”理念逐渐深入人心, 钦州市政府愈发重视对林草地的保护与恢复, 使其面积增加约 190 hm^2 。

虽然 InVEST 模型能直观地展示研究区土地利用的变化对区域碳储量的影响, 然而, 其运行模拟仍存在一定问题, InVEST 模型碳固存模块运行时假定生态系统碳密度数据保持不变, 但实际碳密度因受气候、水文和土壤类型的多种影响而处于不断变化状态^[32], 因此假定不变的碳密度可能会导致研究区碳储量存在误差。此外, 由于遥感影像数据分辨率问题, 解译过程也可能产生误差, 从而对碳储量模拟结果产生影响。因此, 未来研究中应进一步加强对不同土地利用类型的监测与调查, 获取长期的动态的碳密度数据, 优化相关模型, 并提高更高分辨率遥感影像的获取技术, 以进一步提高区域碳储量的模拟精度。

3.2 建议

(1) 推动养殖方式的转型升级。2009—2015 年茅尾海养殖渔业区面积减少 456 hm^2 , 2015—2021 年增加 421 hm^2 , 2009—2021 年养殖渔业区碳储量因土地利用变化减少约 $4\,266\text{ t}$ 。主要原因在于茅尾海海域养殖区以筏式养殖为主, 易受沿海工业建设活动与台风等灾害的影响。因此, 建议切实保护茅尾海渔业繁殖与栖息地生态环境, 推动其养殖方式的转型升级, 推进以离岸抗风浪筏式养殖的新模式。

(2) 加强红树林在宜林区域的增殖。红树林湿地固碳能力仅次于渔业养殖区。2009—2021 年, 红树林湿地面积的不断增长使其碳储量增加约 $3.51 \times 10^4\text{ t}$, 是茅尾海生态系统重要的碳汇资源区。因此, 建议加强红树林在宜林区域的增殖, 强化红树林保护修复技术, 发挥土地政策红利鼓励社会资本参与红树

林的营造与修复等, 以充分发挥红树林在维持生物多样性、防灾减灾和促进经济发展的重要作用。

(3) 加快森林城市建设。茅尾海林草地单位面积碳储量仅略低于渔业养殖区和红树林湿地, 而远高于其他土地利用类别。2009—2021 年, 大量林草地转为其他低固碳地类, 其中转出为建筑用地损失约 $7.99 \times 10^4\text{ t}$ 。因此, 建议贯彻落实《广西钦州市国家森林城市建设总体规划(2020—2030 年)》, 加快钦州市森林城市建设, 实现城市绿色、循环和低碳发展。

4 结论

(1) 空间尺度上, 茅尾海生态系统 2009—2021 年土地利用类型存在较大变化, 耕地、浅海水域和渔业养殖区面积减少, 红树林湿地、建筑用地、林草地、淤泥质滩涂面积增加。主要发生的地类转移为: 林草地→建筑用地与耕地; 浅海水域→淤泥质滩涂、渔业养殖区与红树林湿地; 淤泥质滩涂→红树林湿地; 渔业养殖区→建筑用地; 耕地→建筑用地与林草地。空间布局上, 自然湿地主要分布在湾顶沿岸、人工湿地主要分布在湾顶陆域、湾内两侧沿岸与湾口七十二泾处, 非湿地地类主要分布在两侧陆域, 主要呈现“大聚居, 小杂居”的分布特点。

(2) 时间尺度上, 茅尾海生态系统区域碳储量于 2009, 2015, 2021 年分别约为 2.00×10^6 , 1.89×10^6 , $1.92 \times 10^6\text{ t}$, 随时间呈先减少后增加的趋势。2009—2015, 2015—2021, 2009—2021 年区域碳储量变化量分别为 -1.10×10^5 , 3.77×10^4 , $-7.29 \times 10^4\text{ t}$; 碳固定净现值分别为 -1.37×10^8 , 4.66×10^7 , $-9.01 \times 10^7\text{ 元}$, 随时间呈先减少后增加趋势。空间布局上, 碳储量及其变化量及碳净现值最高值均位于湾顶、湾内两侧沿岸与湾口七十二泾处, 最低值位于湾顶与两侧陆域。

(3) 区域单位面积碳储量最大为渔业养殖区, 其次是红树林湿地与林草地, 最低为建筑用地, 因此, 这几种地类的转变是区域碳储量变化的主要原因。2009—2021 年, 其他地类→建筑用地造成的碳储量损失最大, 达 $2.85 \times 10^5\text{ t}$, 其中渔业养殖区→建筑用地损失约 $1.34 \times 10^5\text{ t}$, 林草地→建筑用地损失约 $7.99 \times 10^4\text{ t}$; 其他地类→养殖渔业区、红树林湿地增加的碳储量分别约为 1.81×10^5 , $3.36 \times 10^4\text{ t}$, 其中浅海水域→渔业养殖区增加约 $1.33 \times 10^5\text{ t}$ 。综合看来, 茅尾海 2009—2021 年更多地为渔业养殖区、林草地等高固碳土地利用类型向建筑用地等低固碳类型的转变, 导致茅尾海碳储量减少。

[参 考 文 献]

- [1] Canadell J G, Raupach M R. Managing forests for climate change mitigation [J]. *Science*, 2008, 320 (5882):1456-1457.
- [2] IPCC. AR5 Climate Change 2014: Mitigation of climate change [R]. Copenhagen: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [3] Canadell J G, Schulze E D. Global potential of biospheric carbon management for climate mitigation [J]. *Nature Communications*, 2014(5):5282.
- [4] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C, et al. Blue carbon: a rapid response assessment [M]. Grid-Arendal: United Nations Environment Programme, 2009.
- [5] Mackey B G, Keith H, Berry S L, et al. Green Carbon: the role of natural forests in carbon storage [M]. Canberra: ANU Press, 2008.
- [6] Meena V S, Mondal T, Pandey B M, et al. Land use changes; strategies to improve soil carbon and nitrogen storage pattern in the mid-Himalaya ecosystem, India [J]. *Geoderma*, 2018,321:69-78.
- [7] Babbar D, Arendran G, Sahana M, et al. Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,278:123333.
- [8] Nel L, Boeni A F, Prohászka V J, et al. InVEST soil carbon stock modelling of agricultural landscapes as an ecosystem service indicator [J]. *Sustainability*, 2022,14 (16):9808.
- [9] Lyu Rongfang, Mi Lina, Zhang Jianming, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model [J]. *Ecological Research*, 2019,34(3):380-393.
- [10] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响:以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J].*自然资源学报*,2020,35(4):826-844.
Deng Yuanjie, Yao Shunbo, Hou Mengyang, et al. Assessing the effects of the Green for grain program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(4):826-844.
- [11] 张影,谢余初,齐姗姗,等.基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J].*资源科学*,2016,38(8):1585-1593.
Zhang Ying, Xie Yuchu, Qi Shanshan, et al. Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on InVEST model [J]. *Resources Science*, 2016,38(8):1585-1593.
- [12] 胡义强,杨骥,荆文龙,等.茅尾海入海河口池塘养殖污染状况遥感调查[J].*测绘通报*,2022(7):12-17.
Hu Yiqiang, Yang Ji, Jing Wenlong, et al. Remote sensing investigation on water pollution of pond aquaculture in estuary of Maowei Sea [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(7):12-17.
- [13] 罗新正,孟宪伟.基于相对海平面变化的广西茅尾海红树林面积稳定性评估[J].*海洋环境科学*,2022,41(6):881-887.
Luo Xinzheng, Meng Xianwei. Assessment of mangrove area stability based on relative sea level change in Maowei Sea, Guangxi [J]. *Marine Environmental Science*, 2022,41(6):881-887.
- [14] 蒙良莉,凌子燕,蒋卫国,等.基于 Sentinel 遥感数据的红树林信息提取研究:以广西茅尾海为例[J].*地理与地理信息科学*,2020,36(4):41-47.
Meng Liangli, Ling Ziyang, Jiang Weiguo, et al. Mangrove information extraction based on the sentinel remote sensing data: A case study of Maowei Bay of Guangxi [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020,36(4):41-47.
- [15] 潘良浩,韦江玲,陈元松,等.茅尾海荻茆及沉积物有机碳、全氮、全磷分布特征与季节动态[J].*湿地科学*, 2012,10(4):467-473.
Pan Lianghao, Wei Jiangling, Chen Yuansong, et al. Distribution characteristics and seasonal dynamics of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus of cyperus malaccensis and sediments in Maowei Bay [J]. *Wetland Science*, 2012,10(4):467-473.
- [16] 赵薛强.海湾综合整治研究:以茅尾海为例[D].福建 厦门:国家海洋局第三海洋研究所,2011.
Zhao Xueqiang. A study on the comprehensive improvement of the bay: A case study of Maowei Sea [D]. Xiamen, Fujian: third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2011.
- [17] 杨斌,方怀义,许丽莉,等.钦州湾水质污染时空变化特征及驱动因素[J].*海洋环境科学*,2017,36(6):877-883.
Yang Bin, Fang Huaiyi, Xu Lili, et al. Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of water pollution in Qinzhou Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2017,36(6):877-883.
- [18] 钟方杰,严雪瑜,高扬,等.广西茅尾海牡蛎天然种苗种类鉴定和群体组成的初步分析[J].*海洋科学*,2014,38 (3):91-97.
Zhong Fangjie, Yan Xueyu, Gao Yang, et al. Species identification species group structure analysis of the common oysters from the Maowei Sea in Guangxi [J]. *Marine Sciences*, 2014,38(3):91-97.
- [19] 韦重霄,赵爽,宋立荣,等.钦州湾内湾茅尾海营养状况分析与评价研究[J].*环境科学与管理*,2017,42(9):148-153.

- Wei Chongxiao, Zhao Shuang, Song Lirong, et al. Analysis and assessment of nutrient status in Maowei Sea of inner Qinzhou Bay [J]. *Environmental Science and Management*, 2017, 42(9):148-153.
- [20] 马云梅, 吴培强, 任广波. 基于高分影像光谱特征的广西海岸带红树林精细分类与制图[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(12):2292-2304.
- Ma Yunmei, Wu Peiqiang, Ren Guangbo. Fine classification and mapping of mangroves in Guangxi coastal zone based on spectral characteristics of GF images [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(12):2292-2304.
- [21] 李畅, 赵瑞斌, 王福, 等. 广西滨海湿地现状及红树林湿地碳储量分析[J]. *华北地质*, 2022, 45(3):29-35.
- Li Chang, Zhao Ruibin, Wang Fu, et al. Current situation of the coastal wetlands in Guangxi and analysis of carbon storage in the mangrove wetland [J]. *North China Geology*, 2022, 45(3):29-35.
- [22] 潘英, 李坚明, 黄伟德, 等. 广西牡蛎产业现状分析及发展策略[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(9):2608-2618.
- Pan Ying, Li Jianming, Huang Weide, et al. Analysis of current situations, existing problems of oyster industry and its developmental suggestions in Guangxi [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(9):2608-2618.
- [23] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3):359-365.
- Zhang Jihong, Fang Jianguang, Tang Qisheng. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(3):359-365.
- [24] 李海晏, 陈涛, 张海燕, 等. 中国贝类养殖对海洋碳循环的贡献评估[J]. *海洋科学*, 2014, 38(5):39-45.
- Li Haiyan, Chen Tao, Zhang Haiyan, et al. Evaluation of contribution of shellfish culture to ocean carbon cycle in China [J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(5):39-45.
- [25] 孙天成, 马梓程, 黄赞慧, 等. 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[J]. *热带地理*, 2023, 43(3):443-458.
- Sun Tiancheng, Ma Zicheng, Huang Zanhui, et al. Coastal ecosystem restoration strategy based on carbon storage change: A case study of the southeast coastal zone of Hainan Island [J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(3):443-458.
- [26] 赵胤程, 覃盟琳, 庞雅月, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3):345-355.
- Zhao Yincheng, Qin Menglin, Pang Yayue, et al. Evolution simulation and driving factors of eco-spatial carbon sinks in beibu gulf urban agglomeration based on FLUS-InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3):345-355.
- [27] 王珊珊, 徐明伟, 韩宇, 等. 杭州湾南岸滩涂湿地多年蓝碳分析及情景预测[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(9):4380-4388.
- Wang Shanshan, Xu Mingwei, Han Yu, et al. Analysis and scenario prediction of multi-year blue carbon in intertidal wetland on the south bank of Hangzhou Bay [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9):4380-4388.
- [28] 刘昌义. 气候变化经济学中贴现率问题的最新研究进展[J]. *经济学动态*, 2012(3):123-129.
- Liu Changyi. The latest research progress of discount rate in the economics of climate change [J]. *Economic Perspectives*, 2012(3):123-129.
- [29] Houghton R A. Counting terrestrial sources and sinks of carbon [J]. *Climatic Change*, 2001, 48(4):525-534.
- [30] 任玺锦, 裴婷婷, 陈英, 等. 基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. *生态科学*, 2021, 40(4):66-74.
- Ren Xijin, Pei Tingting, Chen Ying, et al. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4):66-74.
- [31] Chen Dima, Lan Zhichun, Hu Shuijin, et al. Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 89:99-108.
- [32] Zhou Junju, Zhao Yaru, Huang Peng, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 118:106803.