

基于多源数据的“零碳海岛”测算方法研究

——以长海县为例

李思怡^{1*}, 李 鹏^{1,2#}

¹辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

²辽宁师范大学海洋可持续发展研究院, 教育部人文社会科学重点研究基地, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年10月22日; 录用日期: 2025年11月13日; 发布日期: 2025年11月20日

摘 要

为支撑零碳海岛建设, 本研究基于地表环境数据和海洋养殖数据、船舶交通数据等多源数据, 遥感(RS)和地理信息系统(GIS)为技术支撑, 通过碳图谱模拟实现可视化表达, 以长海县为研究区, 系统探究长海县碳汇量与碳排放量的格局、现状与空间分布规律。研究表明, 长海县碳汇以海洋牧场贝藻类养殖为核心(占比超90%), 空间呈“西高东低”分布; 碳排放以交通类为首要来源, “交通减排”为核心优化方向, 空间呈“西、中、东多中心”格局; 净碳汇整体呈现“中部高、西部波动、东部不稳定”的特征, 系各岛屿碳汇与碳排放综合作用的结果。基于研究成果, 针对性提出推广清洁能源渔船、发展低碳旅游交通等减排措施, 以及加强海草床与森林修复、优化贝类养殖模式等碳汇增强路径。本研究为长海县零碳策略制定提供精准依据, 同时为其他海岛地区碳核算与零碳发展实践提供参考范例, 助力全球海岛可持续发展。

关键词

零碳海岛, 多源数据, 蓝碳, GIS

Research on the Calculation Method for “Zero-Carbon Islands” Based on Multi-Source Data

—Taking Changhai County as an Example

Siyi Li^{1*}, Peng Li^{1,2#}

¹College of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

²Key Research Base of Humanities and Social Sciences, Ministry of Education, Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李思怡, 李鹏. 基于多源数据的“零碳海岛”测算方法研究[J]. 世界生态学, 2025, 14(4): 391-406.

DOI: 10.12677/ije.2025.144046

Abstract

To support the development of zero-carbon islands, this study systematically investigates the patterns, current status, and spatial distribution of carbon sinks and emissions in Changhai County. Utilizing multi-source data including surface environmental data, marine aquaculture data, and vessel traffic data, the research employs Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) as technical foundations. Visualization is achieved through carbon mapping simulation. Findings indicate that Changhai County's carbon sinks are dominated by shellfish and algae cultivation in marine ranches (accounting for over 90%), exhibiting a "high in the west, low in the east" spatial distribution. Transportation-related emissions constitute the primary source, with "transportation emission reduction" identified as the core optimization direction, displaying a "multi-center pattern in the west, central, and east" spatially. The overall net carbon sink exhibits a pattern of "high in the central region, fluctuating in the west, and unstable in the east", reflecting the combined effects of carbon sinks and emissions across various islands. Based on these findings, targeted emission reduction measures are proposed, including promoting clean-energy fishing vessels and developing low-carbon tourism transportation. Additionally, pathways to enhance carbon sinks are suggested, such as strengthening seagrass beds and forest restoration and optimizing shellfish farming models. This study provides precise guidance for developing Changhai County's zero-carbon strategy while serving as a reference model for carbon accounting and zero-carbon development practices in other island regions, contributing to global sustainable island development.

Keywords

Zero-Carbon Island, Multi-Source Data, Blue Carbon, GIS

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2005年8月,浙江省委书记提出了“绿水青山就是金山银山”的科学论断,近20年来,全国各地围绕绿色发展理念,积极践行经济与生态平衡发展。其中,零碳项目的建设和实施是实现区域零碳的重要手段和方法,成为推动绿色经济转型和实现可持续发展目标的重要实践,主要包括零碳园区[1]、零碳城市[2]、零碳港口[3]、零碳社区[4]、零碳乡村[5]、零碳海岛[6]等。

近年来,我国积极与小岛屿国家合作共建低碳示范区,开发并实施一系列减缓和适应项目。然而,由于海岛地区数据获取难度较大等因素,国内外海岛碳相关的研究仅有少量案例可供参考。国外研究对于海岛碳相关的研究主要围绕蓝碳生态系统碳汇研究、海岛碳源研究等,如Duarte [7]等发现海草床单位面积的碳汇能力是热带雨林的10倍以上;McLeod [8]等综合评估了全球红树林、盐沼和海草床的碳汇能力;Atwood [9]等利用遥感技术对加勒比海地区15个岛屿的红树林碳储量进行了空间显式评估;Kuang [10]等发现马尔代夫群岛能源系统中柴油发电占全岛碳排放的65%以上;Gils [11]等开发了一个适用于海岛的能源系统优化模型,证明了能源系统转型可同时实现减排目标 and 经济效益;Rico [12]等分析了海岛能源使用导致的直接排放和间接排放的主要排放源,发现交通碳排放占旅游业碳排放的95%。

在我国明确提出“双碳”目标并深入推进生态文明建设的战略引领下,国内学界围绕海岛碳汇与减

排的研究呈现出鲜明的政策驱动与实践导向特征, 主要集中于以下方面: (1) 蓝碳生态系统碳汇研究。李静[13]、赵云[14]等分析了海洋碳汇的作用机理与发展对策; 于瀚等[15]和刘强[16]等根据海南、广东等沿海地区发展蓝色碳汇的优劣势; 赵贺[17]、[18]等则分别分析了珊瑚礁生态系统和红树林渔业生态系统的碳循环特征和碳汇机制。焦琦斐[19]、张麋鸣[20]、杨林[21]等人基于创新技术与渔业统计数据, 对贝藻类等海洋生物构建了新的海洋渔业碳汇核算体系; 伍良旭[22]等人探讨了南麂岛森林生态系统 2020~2021 年净碳生产力、总初级生产力和生态系统呼吸的变化特征及其影响因素; 妥彬[23]等人研究了中国东部的 4 个海岛森林土壤碳和氮磷养分库的纬度变化特征。(2) 海岛增汇研究。陈思雨[24]、史娴[25]等人通过 PLUS-InVEST 模型和海洋生物碳汇核算方法, 对生态系统碳储量增量进行预估模拟; 韩广轩[26]等人提出了海岸带生态系统蓝碳增汇理念, 为海岸带蓝碳提供了增汇技术体系与途径。(3) 海洋产业碳排放研究。邵桂兰[27]等运用 LMDI 分解法对我国海洋渔业碳排放进行影响因素实证研究。李晨[28]等对渔业全要素碳排放效率的时空差异和演变特征进行了分析; 田鹏[29]、许倩[30]等以海水养殖、海洋捕捞和海产品加工综合测算海洋渔业碳排放量; 邵桂兰[31]等核算了山东省 2003~2016 年海水养殖业生产的碳汇量以及海洋捕捞业产生的碳排放量; 韩增林[32]等运用标准差和变异系数评估海洋渔业生态效率的区域发展差异。

综上所述, 国内外对于海岛碳系统的研究以及低碳发展实践, 为我国海岛的绿色低碳发展作出了积极贡献, 是开展海岛保护与开发综合试验的重要探索, 也为有人岛的零碳、负碳发展提供了可供借鉴的经验与示范。但研究内容多集中于单一碳汇或碳排研究, 对于海岛整体净碳汇系统的探讨尚少, 因此本文以长海县这一县级海岛为研究区域, 积极响应“两山”理念与双碳理念, 对海岛碳汇量与碳排放量展开比较, 分析海岛碳收益状况, 旨在揭示海岛地区不同产业碳源碳汇之间的作用规律, 为今后海岛区域碳收支平衡研究中的空间规划、资源利用、建设“零碳海岛”以及实现可持续发展, 提供坚实的科学基础。

2. 零碳海岛系统总体理论框架与评估方法

2.1. 零碳海岛系统总体理论框架构成

一个具备普适性、综合性和完整性的理论分析框架, 厘清系统形成的内在机理, 清晰界定系统边界与变量, 是科学测算、预测碳系统变化以及进行碳减排与碳汇的基础, 更是学界研究资源利用系统碳效应共同努力的重要方向。本研究聚焦海岛零碳建设, 构建了以碳源-碳汇系统为基础、实施路径为支撑的协同架构, 深度锚定“零碳海岛”的目标导向, 将陆地生态碳循环与海洋蓝碳循环理论相融合。

从系统构成看, 本研究塑造了碳源-海岛-碳汇交互网络。在海岛系统维度, 其划分出海岛陆域、海岸带、近海海域三大功能单元, 陆域关联生态子系统与人文子系统, 是“生态固碳-人为排放”核心交互界面, 海岸带衔接陆海碳循环并兼具碳汇强化与排放管控功能; 碳源系统覆盖海岛生产、生活、生态全场景排放, 海岛碳排放主要聚焦人为碳排放, 涵盖工业能源消耗、旅游服务排放、交通燃油排放与居民生活能耗四大关键领域, 这些活动构成海岛碳排放的核心来源; 碳汇系统以自然生态子系统为载体, 借生物地球化学过程实现碳截留。

在实施路径上, 本研究构建“零碳海岛建设方案”, 方案通过增汇与减排举措, 实现海岛碳汇大于碳源。增汇方面, 推动产业转型, 促使工商业生产等向低碳方向发展, 推动海洋产业低碳化; 优化能源结构, 用可再生能源替代传统能源, 减少传统能源消耗, 发展生态渔业、布局海上新能源; 促进交通与建筑领域零碳化, 降低交通、建筑的碳排放。减排方面则依靠生态保护与修复, 维护森林、农业等生态系统固碳能力, 以及发展新能源碳汇, 严格管控人类活动碳排放, 规范海岸带开发、治理养殖污染, 助力减少碳排放。

整体而言, 该系统突破传统海岛治理碎片化局限, 以系统思维整合陆海空间, 挖掘蓝碳生态固碳潜力, 为海岛实现碳中和目标、探索可持续发展模式, 提供从理论到实践的完整行动框架, 对推动海洋地理单元绿色转型具有重要参考价值(图 1)。

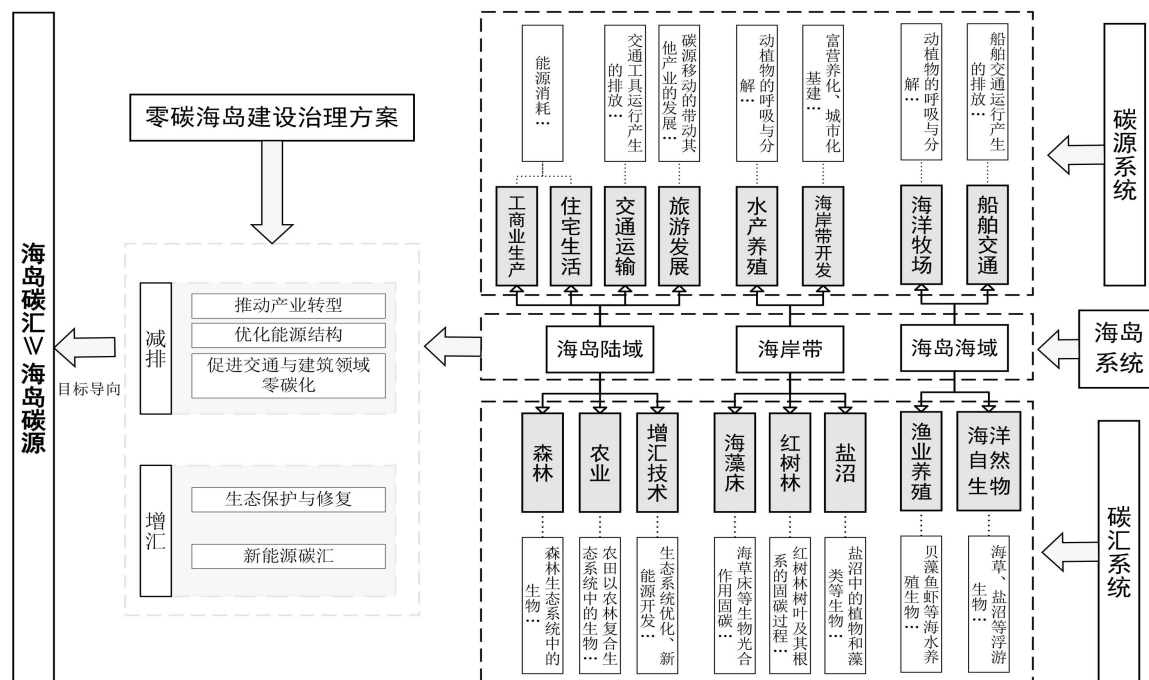


Figure 1. The overall theoretical framework diagram of the zero-carbon island system

图 1. 零碳海岛系统总体理论框架图

2.2. 零碳海岛评估方法与技术路线框架

本研究构建了一套面向海岛碳汇-碳库监测评估的系统性技术流程, 该技术体系贯通“分类-数据-模型-应用”全链条, 融合生态学、地理学、遥感科学与计算机技术, 构建适配海岛生态系统的碳库监测评估系统, 以陆海交互的碳库分类响应海岛生态独特性, 以多维度数据融合与模型驱动为核心逻辑, 实现碳库储量精准核算与空间化表达, 为海岛碳汇管理、碳中和路径设计提供定量化、空间化的决策依据。

(1) 首先基于海岛生态系统的空间异质性, 对碳汇/碳库进行分类, 覆盖海岛陆域、海岸带、近海海域三大地理单元, 构建起契合海岛陆海交互特征的碳库分类体系, 为后续监测评估奠定基础。

(2) 数据支撑维度, 搭建多源异构数据库。整合空间数据、矢量数据、遥感卫星数据及光谱数据、统计数据与样地调查、专家征询等, 多源数据的耦合, 既突破单一数据维度的信息局限, 又通过“遥感宏观监测-地面调查验证-专家知识校准”的三角互证, 提升数据质量与可靠性。

(3) 模型构建环节, 以碳库分类体系为基础, 依据研究涉及的碳库类型与方法学层级, 开展结构搭建与参数估计。结构搭建聚焦多尺度模拟预测功能, 考虑海岛碳循环的复杂性, 构建跨尺度、可嵌套的简便计算模型, 实现从样地尺度到海岛全域的碳库储量推算; 参数估计依托数据库多源信息, 结合海岛地理环境参数, 对模型关键参数(如植被生物量转换系数)进行本地化校准, 增强模型对海岛独特生态过程的适配性。

(4) 数据整合与输出阶段, 运用数学软件编程开发集成处理工具, 将模型运算与多源数据处理流程化、自动化(图 2 和图 3)。

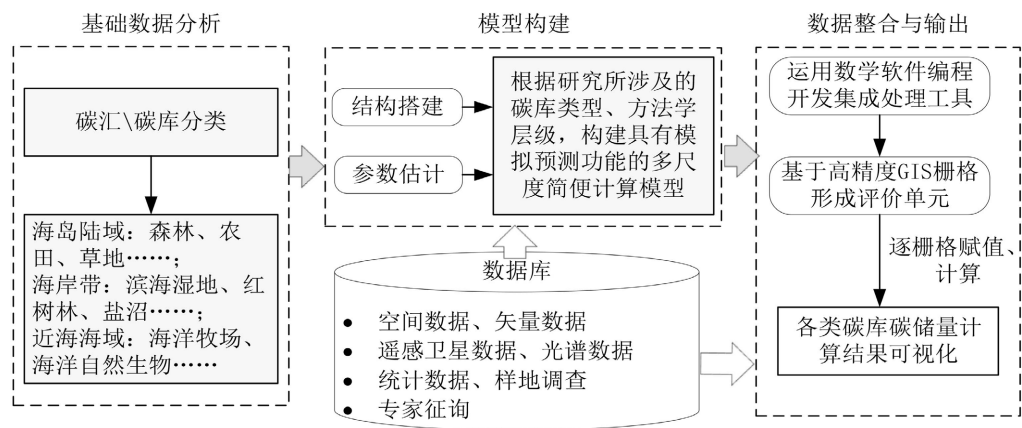


Figure 2. Evaluation methods and technical roadmap for zero-carbon islands
图 2. 零碳海岛评估方法与技术路线图

3. 案例分析

3.1. 研究区概况与数据来源

3.1.1. 研究区概况

长海县地处辽宁省辽东半岛东侧的黄海北部海域，介于东经 122°17′~123°13′，北纬 38°55′~39°35′之间，是东北地区唯一的海岛边境县。长海县属暖温带季风气候，年平均气温在 10℃左右，夏季凉爽宜人，冬季相对温和，森林覆盖率较高，风力资源较为丰富。周边海域生物多样性高，是多种海洋生物的栖息地和繁殖地，海岛周边的海草床、海藻场等海洋生态系统在海洋碳循环中发挥着重要作用。但近年来，随着旅游业和渔业的发展，海岛生态环境也面临着一定压力，如海水污染、过度捕捞等问题对海洋生态系统造成了一定破坏，因此，本文选择长海县作为零碳海岛研究的典型，探析其碳排放与碳汇之间的互动响应关系。

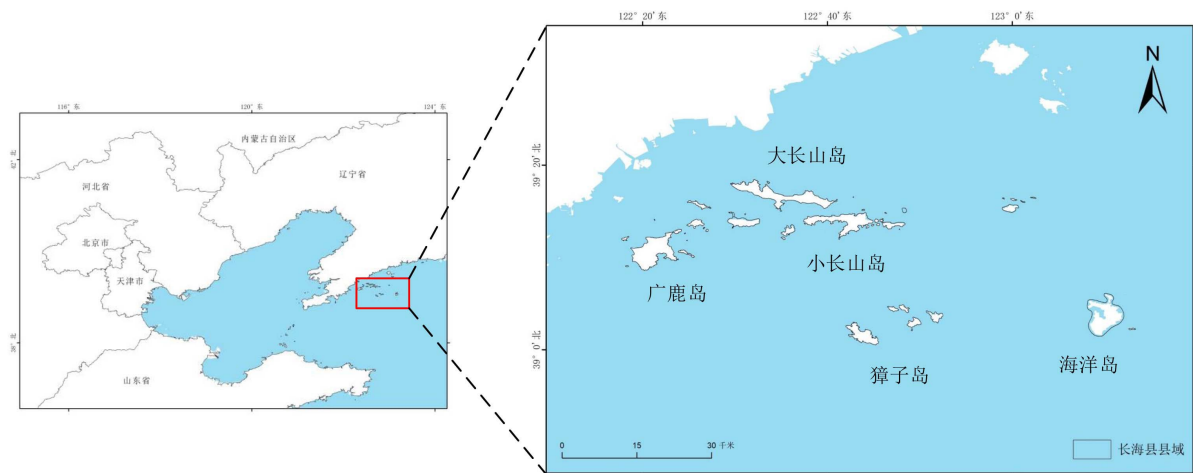


Figure 3. Overview of the study area
图 3. 研究区概况

3.1.2. 数据来源

本研究数据主要包括：地表环境数据(研究区行政边界、土地利用数据、长海县 POI 数据)和海洋养殖

数据、船舶交通数据。

(1) 地表环境数据。研究区行政边界数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.Resdc.cn/Default.aspx>)；土地利用数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)，空间分辨率为 1 km，将该数据重分类为林地、耕地、草地、水域、建设用地和未利用地六类；长海县 POI 数据来源于水经微图，获取时间为 2023 年 1 月，涵盖餐饮、住宿、交通设施等数据，包含名称、坐标(经纬度)、类别标签、地址等属性信息。数据已通过去重、坐标纠偏、剔除无效值等处理，确保空间位置精度与属性完整性。

(2) 海洋养殖数据。本文以 Sentinel-2 高分辨率卫星影像为基础数据，数据来自 ESA 欧洲航空局官网。数据预处理利用 SNAP 软件，将数据按最近邻法重采样后导入 ENVI5.3 软件中进行波段合并、裁剪、影像融合等处理，针对养殖区建立样本集进行训练和测试，利用建立好的样本集通过支持向量机(SVM)分类法对遥感影像数据进行信息分类。

(3) 统计数据。长海县统计年鉴(2022~2023 年)，提供了各产业的产值、从业人员、能源消耗等基础数据；长海县海洋与渔业局工作报告，包含了渔业养殖面积、产量等信息；长海县文旅局资料，涉及旅游接待人数、民宿数量等数据；长海县交通局统计数据，涵盖了客船、渔船数量及运营情况等。

3.2. 研究方法

长海县在面积上属于较小尺度的空间范围，借鉴刘锴[33]、柯丽娜[34]、王信[35]、李莹[36]等的研究过程与结果，本研究区的测算范围主要分为海岛陆地区域与海洋区域，并根据长海县海岛地理环境，选取测算参数，基于图 2 的技术路线进行测算和分析。长海县碳汇测算主要涵盖森林、农业用地、湿地等土地利用类型以及海洋牧场，其中森林进一步细分为乔木林、其他林地类型进行碳汇测算，农业用地进一步细分为粮食作物用地和经济作物用地，根据长海县藻类与贝类养殖产值比重占当地渔业总产值的 90%的特点，同种贝类身体组织和贝壳中的碳含量占自身重量的比重基本不会随海域与环境的改变发生明显差异，海水养殖的大型藻类通过光合作用将海水中的无机碳转化为有机碳的过程能够形成碳汇，因此海洋牧场碳汇进一步细分为藻类碳汇和贝类碳汇。而长海县碳排测算则主要采用“自下而上”的思路和 LCA 法，主要聚焦于人为碳排放，将碳排放区域分为为生活居民碳排放、生产碳排放、旅游碳排放三个部分。生活居民碳排放主要测算居民交通碳排放和日常生活能源消耗碳排放，生产碳排放主要测算工业碳排放和渔业碳排放，旅游碳排放主要测算旅游交通碳排放、旅游住宿碳排放、旅游活动碳排放。综合碳源碳汇两方面结果，对长海县进行净碳汇结果可视化与分析，进而研究探讨长海县零碳海岛策略与措施，测算方法如下：

乔木碳汇估算：

$$CF_a = F_a \times C_c, F_a = aV_a \times bA_a \quad (1)$$

其他林地碳汇估算：

$$CF_b = W_b \times \theta_b \quad (2)$$

农业用地碳汇估算：

$$CA_e = \sum_{e=1}^m c_e \times Y_e \times W_e / H_e \quad (3)$$

贝类碳汇估算：

$$CS_w = Y_w \times d_w \times (m_{w1} \times c_{w1} + m_{w2} \times c_{w2}) \quad (4)$$

藻类碳汇估算：

$$CS_s = Y_s \times d_2 \times c_s \quad (5)$$

湿地碳汇估算:

$$CW_s = V_w \times C_w \quad (6)$$

居民交通能源碳排放:

$$RC_a = \sum_{a=1}^n E_a \times D_a \quad (7)$$

生活能源消耗碳排放:

$$RC_b = N_b \times \beta \quad (8)$$

工业碳排放:

$$IC = \sum_{i=1}^n E_i \times D_i \quad (9)$$

渔业碳排放:

$$FC = P \times \varepsilon \times C_f \times O_f \times \frac{44}{12} \quad (10)$$

旅游交通碳排放:

$$TC_g = \sum_{g=1}^3 N_g \times \beta_g \quad (11)$$

旅游住宿碳排放:

$$TC_b = G_b \times Q_b \times \theta \quad (12)$$

旅游活动碳排放:

$$TC_c = \sum_{c=1}^5 N_c \times K_c \quad (13)$$

公式(1)~(2)参考曹辉[37]等、Fang 等[38]、Tang 等[39]的研究方法, C_c 为含碳系数, F_a 为乔木树种的生物量, a 和 b 为生物量与积蓄量转换模型的参数, V_a 为树木的总蓄积量(m^3), A_a 为树种的面积(hm^2), W_b 为第 b 种林地的生物量, θ_b 为第 b 种林地的碳汇系数, 疏林地碳汇系数取 $0.5800 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其他林地碳汇系数取 $0.2327 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 公式(3)参考谭秋美等[40]的研究方法, c_e 为第 e 种农作物的碳吸收率, Y_e 为第 e 种农作物的实际产量, W_e 为第 e 种农作物干重比, H_e 为第 e 种农作物经济系数; 公式(4)~(5)参考的研究方法岳冬冬等[41]、纪建悦等[42], Y_w 为第 w 种贝类养殖产量, d_w 为第 w 种贝类干湿比, m_{w1} 为第 w 种贝类软体质量比, c_{w1} 为第 w 种贝类软体含碳率, m_{w2} 为第 w 种贝类贝壳质量比, c_{w2} 为贝壳含碳率, Y_s 为藻类养殖产量, d_2 为藻类干湿比, c_s 为第 s 种藻类含碳率; 公式(6)参考孔东升[43]等的研究方法, V_w 为湿地面积(公顷), C_w 为区域平均固碳速率, 红树林 $0.5 \sim 2.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 沿海滩涂 $1.57 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 草本沼泽 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 公式(7)~(9)参考周年兴等[44]、IPCC [45]的研究方法, E_a 为居民交通中第 a 种能源消耗量, D_a 为第 a 种消耗能源的碳排放因子, N_b 为居民人数(个), β 为日常生活能源碳排放系数, E_i 为工业中第 i 种能源消耗量, D_i 为第 i 种消耗能源的碳排放因子; 公式(10)参考岳冬冬等[46]的研究方法, P 为渔船功率(kw), ε 为渔船油耗转换系数($\text{t} \cdot \text{kw}$), C_f 为柴油的含碳量($\text{GJ} \cdot \text{t}$), O_f 为柴油的碳氧化率($\text{kg} \cdot \text{GJ}^{-1}$); 公式(11)~(13)参考刘军等[47]的研究方法, g 为运输方式(即航空、公路、水路), N_g 是运输方式 g 的游客量, β_g 表示交通方式 g 的单位 CO_2 排放($\text{g} \cdot \text{pkm}^{-1}$), G_b 为酒店床位总数, Q_b 为酒店年出租率, θ 为酒店每

晚排放量, N_e 为表示游客选择活动类型 e 的人数, K_e 单位活动类型 e 二氧化碳排放量。

3.3. 长海县零碳海岛估算结果分析

本文基于土地数据、海洋数据、统计数据等以及估算公式(1)~(13), 对长海县海岛各类型碳汇量、碳排放量进行详细计算; 其次基于高精度 GIS 栅格技术, 将海岛全域划分为评价单元, 通过不同色度, 实现对长海县的空间要素碳值的精准标注, 通过对长海县海岛进行碳值标定, 在空间表达上反映出海岛碳汇量以及碳排放量的空间格局与现状。并从长海县海岛碳汇量碳排放量的类型和空间尺度两种角度展开深入分析, 旨在为长海县的生态保护和碳管理提供科学依据。

3.3.1. 长海县海岛碳汇结果分析

(1) 长海县碳汇类型分析

本研究基于土地数据、海洋影像提取数据以及碳汇估算方法公式(1)~(6), 对长海县海岛碳汇量进行详细计算, 计算结果显示(表 1): ① 海洋牧场中贝类与藻类养殖的碳汇量区间分别为 4.11 万~10.26 万 t 与 6.66 万~11.03 万 t, 两类养殖碳汇量合计 10.77 万~21.29 万 t, 占全县碳汇总量的 90%以上。海洋牧场内部碳汇呈现“藻类主导、贝类补充”的结构, 藻类碳汇优势源于藻类通过光合作用直接固定大气 CO_2 的效率, 且养殖过程中无需额外投入高碳能源, 具有生态与经济双重价值。贝类养殖则通过滤食浮游植物间接参与碳循环, 其碳汇量波动可能与养殖面积、品种结构及海域环境相关。② 相比之下, 陆地生态系统碳汇规模显著偏低, 长海县陆地生态系统碳汇以林地或幼林为主, 多为农业用地零星分布, 碳汇能力尚未充分发育。林地碳汇林龄偏低、树种单一等因素影响存在较大优化空间, 湿地由于湿地面积萎缩或生态功能退化, 碳汇量(0.8 t)极低, 农用地由于长海县多为山地、土壤条件不佳, 限制了农业碳汇的释放。③ 碳汇类型结构组成与长海县作为海岛县的地理属性高度契合, 海洋生态系统的碳汇潜力得到充分释放, 而陆地生态系统因面积限制及植被类型单一性, 碳汇量较低, 通过开展造林绿化、优化林分结构、实施森林抚育、湿地保护与修复工程、推广低碳种植技术(如秸秆还田、精准施肥)等措施, 可显著提升单位面积碳汇量。

长海县碳汇体系呈现以综上所述, 长海县碳汇体系呈现海洋牧场碳汇为绝对核心、陆地生态系统碳汇为补充的显著特征。海洋牧场中藻类与贝类养殖碳汇量占全县碳汇总量 90%以上, 是碳汇核心支柱, 且具备通过品种优化与布局调整提升的潜力, 通过优化养殖布局、扩大高碳汇品种(如海带、裙带菜)养殖规模, 可进一步提升碳汇潜力, 陆地生态系统碳汇规模有限, 林地碳汇为主要贡献者, 农用地碳汇存在较大提升空间。

Table 1. Types and quantities of carbon sinks in Changhai County Islands

表 1. 长海县海岛碳汇量类型与碳汇量

碳汇类型	森林		农用地		湿地	海洋牧场	
	乔木	其他林地	经济作物	粮食作物		贝类	藻类
碳汇量(t)	1.2万~15.1万	0.29~0.7	3818.2	827.5	0.8	4.11万~10.26万	6.66万~11.03万

(2) 长海县碳汇分布格局分析

本研究通过对长海县海岛 4 种空间要素的(森林、农用地、湿地、海洋牧场)碳值标定, 在空间表达上反映出海岛碳排放的空间格局与现状, 生成整个海岛的碳汇量图谱(图 4)。

从各岛屿的具体碳汇量分布上看, 广鹿岛的碳汇优势极为突出, 全岛大部分区域被深绿色覆盖, 是长海县碳汇能力最强的岛屿, 其碳吸收和封存的效率与规模较强, 广鹿岛拥有更为丰富的森林资源、海

草床和滨海湿地, 这些生态系统在固碳方面发挥着关键作用; 大长山岛和小长山岛的碳汇量次之, 陆地碳汇能力略低于广鹿岛, 但由于大小长山岛的贝藻类资源丰富, 因此两岛的海洋碳汇区域连片分布, 整体碳汇水平仍处于较高层级; 獐子岛的碳汇区域呈零散的浅绿色斑块状分布, 碳汇量明显不足; 海洋岛的绿色区域最为稀疏, 仅在局部有少量浅绿色覆盖, 碳汇能力在长海县各岛屿中处于较低水平。

从长海县整体碳汇量分布上看, 碳汇分布呈现出明显的空间差异, 且具备一定的空间层次性——从大岛到小岛, 从陆地到海域, 碳汇能力逐渐减弱, 呈现西高东低的显著空间特征。西部的广鹿岛、大长山岛、小长山岛构成了碳汇高值区, 碳汇能力强且分布集中; 东部的獐子岛、海洋岛属于碳汇低值区, 碳汇能力较弱且分布稀疏。这种西高东低的空间分异, 使得长海县碳汇在地域上形成了清晰的梯度差异, 西部岛屿成为区域碳汇的核心区域, 东部岛屿碳汇贡献相对有限。这种分布特征直观反映了长海县不同岛屿在生态系统碳汇功能上的差距, 为后续针对不同区域制定差异化的碳汇提升策略、优化生态保护布局提供了明确的空间指引, 也为深入研究海岛生态系统碳循环机制、评估区域碳汇潜力奠定了可视化的基础。



Figure 4. The distribution of carbon sink quantities in Changhai County
图 4. 长海县碳汇量分布

3.3.2. 长海县海岛碳排放结果分析

(1) 长海县碳排放类型分析

基于统计数据、船舶数据、以及地表环境数据, 以及碳排放估算方法公式(6)~(12), 对长海县海岛碳排放量进行详细计算, 计算结果显示(表 2): ① 全县总碳排放量由生活领域、生产领域、旅游领域三部分组成, 总排放量为 62200 t。其中, 生活领域碳排放占全县总碳排放量的比例最高, 为 41.1%, 旅游部分次之(33.7%), 生产部分最低(25.2%), 形成以生活领域为核心、生产与旅游领域为重要补充的格局, 此碳排放结构特征符合长海县“海岛居民生活 + 渔业生产 + 滨海旅游”的产业生态。② 生活碳排放中居民交通碳排放占生活领域总排放量的 88.9%, 是生活领域碳排放的核心因素, 旅游碳排放由于游客交通与住宿需求, 整体排放量高于生产部分, 生产排放量部分因海岛工业规模较小, 整体排放贡献相对有限。其中, 生活碳排放内部, 由于海岛居民生活用能结构相对低碳, 交通出行依赖机动工具成为高排放环节, 居民交通碳排放是居民生活碳排放的 8.0 倍; 旅游碳排放方面, 旅游交通碳排放占比高达 76.6%, 旅游住宿与旅游活动占比分别为 23.3%、0.1%, 碳排放集中于交通环节; 生产碳排放, 由于长海县“轻工业、重

渔业”的产业结构特点, 渔业养殖碳排放占总生产碳排放比例为 86.4%, 工业碳排放仅占总生产碳排放的 13.6%。③ 从具体排放类型来看, 交通相关碳排放是长海县最主要的排放源, 海岛居民日常出行、旅游客群往返均高度依赖船舶、汽车等交通工具, 单位人次碳排放强度较高, 居民交通与旅游交通合计为 38779 t, 占全县总碳排放的 62.3%。生产领域中, 长海县作为海洋渔业大县, 渔业养殖过程中渔船燃油消耗、设备用电等成为生产端主要排放路径, 渔业养殖碳排放占生产领域总排放的 86.4%, 远高于工业排放。

综上, 长海县总碳排放约 6.22 万吨, 呈现“生活领域主导、交通类排放核心、产业特色鲜明”的特征, 居民与旅游交通因海岛出行特性成主要排放源, 渔业养殖凸显产业属性。生活领域占比 41.1%, 其中居民交通占生活领域 88.9%; 旅游领域占 33.7%, 76.6%来自旅游交通; 生产领域占 25.2%, 86.4%为渔业养殖排放。

Table 2. Types and quantities of carbon emissions in Changhai County Islands

表 2. 长海县海岛碳排放量类型与碳排放量

碳排放量类型	生活		生产		旅游		
	居民交通	居民生活	工业	渔业养殖	旅游交通	旅游住宿	旅游活动
碳排放量(t)	22739	2833	2141	13535	16040	4890	22

(2) 长海县碳排放空间分析

本研究通过对长海县海岛 7 种空间要素的(居民交通能源消耗、生活能源消耗、工业、渔业、旅游交通、旅游住宿、旅游活动)碳排放值标定, 在空间表达上反映出海岛碳排放的空间格局与现状, 生成整个海岛的碳排放量图谱(图 5), 在长海县海域碳排放量分布示意图中, 碳排放分布呈现出显著的空间差异, 且与碳汇分布截然不同且极具特点的格局。

从岛屿维度分析, 广鹿岛、大长山岛、小长山岛的碳排放相对突出, 是长海县范围内人为活动密集、能源消耗集中或特定产业(如养殖、旅游、居民生活)排放强度大的核心区域, 海洋岛、獐子岛的碳排放区域相对零散且规模较小。① 广鹿岛人口相对密集, 居民日常出行和家庭能源(如电力、燃气)消耗量大, 一定的渔业加工、海洋装备制造等产业, 工业生产和渔业作业产生大量碳排放, 且作为旅游开发较早的岛屿, 旅游交通(游客往返的车船能源消耗)、旅游住宿(海岛酒店餐饮民宿、空调等能源消耗)、旅游活动(如观光项目的设施运营)等环节的碳排放集中且突出。② 大长山岛、小长山岛作为区域内人口集聚度较高的岛屿, 居民日常交通和生活用能的碳排放基数大, 且工业产业和渔业生产规模较大, 生产过程中能源消耗和废气排放显著, 此外, 大长山岛、小长山岛是长海县旅游核心区域之一, 旅游交通、旅游住宿、旅游活动等旅游要素密集, 碳排放贡献突出。③ 海洋岛渔业生产是主导产业, 渔船燃油消耗和渔业加工能源需求较高, 同时居民生活能源消耗也形成一定碳排放, 其中海洋岛虽旅游开发程度不如西部岛屿, 但游客往返的交通能源消耗仍构成碳排放的重要部分。④ 獐子岛的渔业生产规模相对较小, 且人口密度较低, 居民交通、生活能源消耗以及工业生产的碳排放基数小。旅游交通、住宿、活动的布局较稀疏, 旅游相关碳排放贡献有限, 因此整体碳排放处于较低水平。

从长海县整体碳排放量来看, 整体呈现西、中、东多中心分布的格局。西部的广鹿岛, 中部的大长山岛、小长山岛, 东部的海洋岛构成了碳排放的主要集中区, 而獐子岛则处于相对的碳排放低值区。这种多中心分布的特征, 使得长海县的碳排放在地域上形成了多个相对独立的高值点, 不同区域的碳排放强度和范围各有不同。

这种分布特征直观反映了长海县不同岛屿在人类活动、产业布局等方面的差异对碳排放的影响, 西部和中部岛屿的人口相对密集、产业活动(如渔业加工、旅游服务等)较为集中, 导致碳排放较高, 东部的

海洋岛因海岛特色产业及其能源消耗模式, 也形成了一定规模的碳排放, 而獐子岛因产业分布稀疏、人口活动较少, 碳排放较低。



Figure 5. Distribution of carbon emissions in Changhai County
图 5. 长海县碳排放量分布

3.3.3. 长海县海岛净碳汇空间分析

长海县净碳汇数值基于空间形态要素以及长海县碳汇量、碳排放量进行计算, 此时其碳排放总量计算由公式(1)~(12)转化为:

$$C_{\text{净}} = C_{\text{汇}} - C_{\text{排}} \tag{13}$$

式中, $C_{\text{净}}$ 表示长海县全域净碳汇量, $C_{\text{汇}}$ 表示长海县全域碳汇量, $C_{\text{排}}$ 表示长海县全域碳排放量。

根据计算结果(图 6), 本研究将长海县海岛分为低值区、波动区、稳定区。① 低值区包括小长山岛、大长山岛等岛屿, 此区域岛屿植被覆盖率更高, 森林、灌丛等植物群落更丰富, 农田生态系统完善, 这些生态系统的碳封存能力较强, 碳汇能力较强, 但旅游和产业较活跃的岛屿, 工业生产、旅游交通、住宿等碳排放集中, 在碳排放高值区, 整体净碳汇能力较弱。② 波动区包括广鹿岛等岛屿, 此区域林地和湿地有一定碳汇能力, 海洋养殖以传统渔业为主, 碳汇效益有限, 整体碳汇能力不足以稳定抵消碳排放, 其中渔业生产、旅游交通等碳排放与碳汇量相互制衡。③ 稳定区包括獐子岛、海洋岛等岛屿, 此区域的海洋生态条件相对较差, 海洋碳汇贡献有限, 且生态系统类型相对单一, 碳汇途径较少, 与此同时岛屿人口密度较低, 居民交通、生活能源消耗以及工业生产的碳排放基数小, 因此岛屿在生态保护措施上更完善, 人类活动对生态系统的干扰相对较小, 生态系统的碳汇功能得以较好维持。

从长海县整体净碳汇分布特征上看, 长海县净碳汇整体呈现“中部高、西部波动、东部不稳定”的格局。中部的小长山岛、大长山岛部分区域构成了净碳汇高值区, 净碳汇能力强劲且分布集中, 西部的广鹿岛净碳汇表现波动, 高值与低值区域并存, 东部的海洋岛净碳汇能力不稳定, 獐子岛则呈分散的中等净碳汇分布。这种分布特征直观反映了长海县不同岛屿碳汇与碳排放的综合作用结果。中部岛屿因碳汇能力强且碳排放相对可控, 形成了净碳汇高位区; 西部广鹿岛受碳汇与较高碳排放的共同影响, 净碳汇表现波动; 东部海洋岛则因碳汇与碳排放相互制衡, 净碳汇能力不稳定。这一分布情况为长海县制定差异化的碳管理策略提供了空间依据, 有助于在净碳汇高值区强化生态保护, 在波动或不稳定区域针对性优化产业结构与生态布局, 从而整体提升区域净碳汇水平。

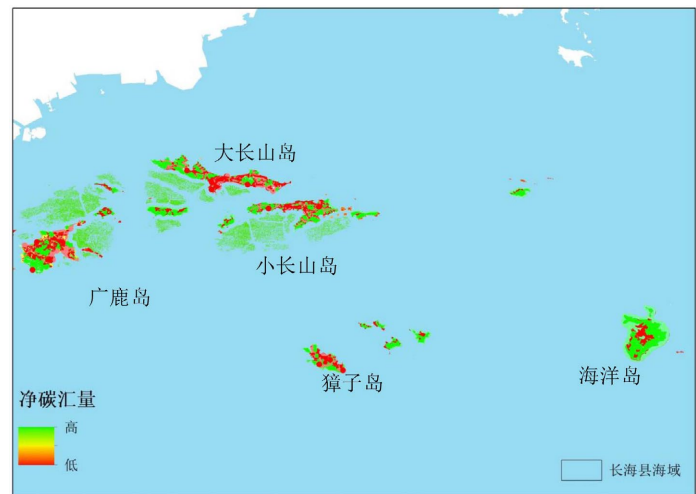


Figure 6. Distribution of net carbon sinks in Changhai County
图 6. 长海县净碳汇分布

4. 结论与政策建议

4.1. 结论

本研究以遥感(RS)、地理信息系统(GIS)为技术支撑,探究长海县的碳排放格局、现状以及空间特征,通过碳图谱模拟示意,实现可视化表达,并对长海县的碳排放空间形态以及空间变化规律进行直观解析,有利于对长海县零碳优化的相关内容进行及时调整。

(1) 碳汇方面:长海县碳汇以海洋牧场贝藻类养殖为绝对核心,合计碳汇量占比超 90%,呈“藻类主导、贝类补充”结构,而陆地生态系统碳汇规模偏低,林地为主要贡献者,湿地及农用地碳汇潜力受限。空间分布上,碳汇呈现显著西高东低的梯度差异,广鹿岛碳汇能力最强,大长山岛、小长山岛紧随其后,共同构成西部高值区;獐子岛、海洋岛为东部低值区,碳汇量少且分布稀疏。这种分布特征直观反映各岛屿生态碳汇功能差距,为制定差异化碳汇提升策略、优化生态保护布局提供空间指引,也为海岛碳循环机制研究与碳汇潜力评估奠定可视化基础。

(2) 碳排放方面:从碳排放量类型来看,交通类排放最高,源于海岛居民出行、旅游客群往返对机动工具的强依赖;渔业养殖排放次之凸显海洋渔业大县定位,而工业排放低则反映产业轻型化特点。同时,生活领域内居民交通与生活能源碳排放差 8 倍、旅游领域 76.6%排放来自交通,均指向“交通减排”为核心方向,渔业养殖与旅游住宿则为次要优化领域,这为长海县结合海岛特色制定低碳策略提供了精准依据。空间分布上呈西、中、东多中心格局,广鹿岛及大、小长山岛因人口密集、产业与旅游活动集中成为排放核心区,海洋岛受渔业生产驱动形成一定排放规模,獐子岛因人口少、产业活动弱处于排放低值区。该分布为制定针对性减排策略、优化产业布局提供了空间依据。

(3) 净碳汇方面:长海县整体呈现“中部高、西部波动、东部不稳定”的分布格局。中部小长山岛、大长山岛虽碳汇能力强,但受产业和旅游集中排放影响,整体净碳汇较弱;西部广鹿岛碳汇能力有限,碳排放与碳汇相互制衡,净碳汇状态不稳定;东部獐子岛、海洋岛碳汇途径少,但人口与产业活动弱、生态保护好,碳汇功能得以维持。该分布是各岛屿碳汇与碳排放综合作用的结果,中部因碳汇强、排放可控成高值区,西部受高排放影响呈波动状,东部因碳汇与排放制衡显不稳定,为制定差异化碳管理策略、优化区域生态与产业布局提供了空间依据。

本研究的成果对长海县零碳海岛建设具有重要指导意义。明确了海岛碳排放的主要来源,为制定针

对性的减排策略提供了方向, 针对渔业生产碳排放, 可推广清洁能源渔船、优化养殖设备能源利用效率, 对于工业碳排放, 需推动产业升级, 采用低碳生产技术, 针对旅游业碳排放, 可发展低碳旅游交通和绿色旅游设施。在碳汇方面, 研究揭示了藻类养殖、贝类养殖和森林碳汇的能力, 为制定科学的碳汇增强措施提供了方向, 重点加强海草床和森林生态系统的保护与修复, 优化贝类养殖模式, 提高养殖密度和碳汇效率。同时, 本研究成果对其他海岛也具有借鉴价值, 为其他海岛在碳排-碳汇核算方法选择、模型构建以及结果分析等方面提供了参考范例, 有助于推动海岛地区在零碳发展领域的研究与实践, 促进全球海岛可持续发展。

4.2. 政策建议

低能耗、低排放、低污染的低碳经济转型, 是海岛地区经济发展的必然趋势, 建设零碳海岛是实现区域可持续发展的重要路径, 需要系统性构建多维度协同推进的实施框架。根据本文研究结果及长海县零碳发展现状, 针对上述结论, 对研究区为例的零碳海岛建设提出如下建议:

(1) 优化能源结构, 构建零碳能源系统

积极发展海上风电和分布式光伏等零碳能源。通过推进深远海漂浮式风电示范, 因地制宜建设分散式风电、屋顶光伏等复合型能源项目, 实现能源清洁替代。以长海县为例, 可加快推动花园口I海上风电场及广鹿岛南部海域风电场建设。随着相关技术日益成熟和投资成本下降, 此类项目具备规模化开发条件, 不仅有助于吸引社会资本参与, 还能带动本地装备制造、安装运维等产业链发展, 乡村与海岛地区的分布式能源建设也可与电网改造同步推进, 具有较高的投入产出效益。

(2) 推动产业转型, 实现零碳产业发展

推动传统产业绿色化与新兴产业低碳化。对渔业加工、小型制造业等传统行业, 通过制定节能降碳标准与配套补贴政策, 推动企业实施电气化改造和节能设备应用。在园区层面推动集聚发展和循环化改造, 打造零碳园区。新兴产业方面, 可设立专项资金扶持“风光氢储”装备制造、航天科技等潜力领域, 并依托海岛资源优势发展“海洋 + 旅游”“海洋 + 文化”等低碳业态, 推动旅游向高端化转型。传统产业改造可依托现有基础与政策支持降低转型成本, 园区集聚则有利于设施共享和能效提升, 而氢能、航天等新兴产业市场前景广阔, 低碳旅游也契合消费趋势, 具备良好的经济可行性(图 7)。

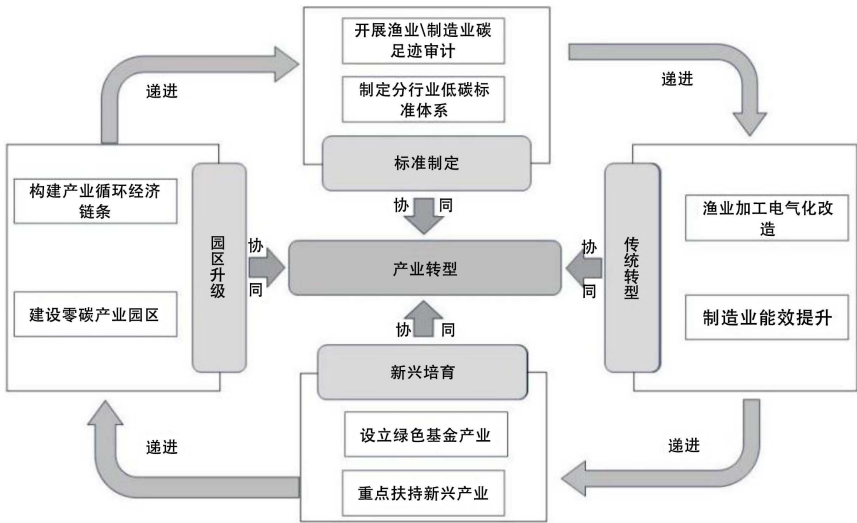


Figure 7. The development diagram of island zero-carbon industries
图 7. 海岛零碳产业发展图

(3) 加强生态保护与修复, 提升海洋零碳碳汇能力

强化海陆生态系统保护与修复。通过严格生态法规明确红树林、珊瑚礁、海草床等蓝碳生态系统的保护范围, 设立专项资金推进海草床修复、珊瑚礁种植等工程, 提升海洋碳汇能力。推进海洋牧场建设, 科学规划贝藻类养殖方式与密度, 增强生物固碳功能。陆地方面应持续开展植树造林, 提高森林覆盖率, 构建海陆协同的固碳体系。蓝碳修复与海洋牧场兼具生态与经济双重效益, 既可增强海岸防护、减少灾害损失, 也能提供可持续海产品, 促进渔业发展。

(4) 促进交通与建筑领域零碳化, 打造绿色宜居零碳环境

推进全面零碳化。交通方面制定清洁能源替代计划, 推广新能源汽车与电动船舶, 完善充电桩、加氢站等配套设施, 发展多式联运以提升整体能效。建筑领域应全面实施绿色建筑标准, 推广光伏建筑一体化、地热能等技术, 推动用能电气化与设计低碳化。同时, 打造低碳清凉社区, 优化建筑布局与通风设计, 应用环境降温技术, 提升居民居住舒适度, 营造绿色宜居的零碳海岛环境。交通工具电气化可有效降低燃料成本, 提升运行经济性; 绿色建筑在全生命周期中具备成本优势, 有助于改善居住环境, 具备广泛实施条件(图 8)。

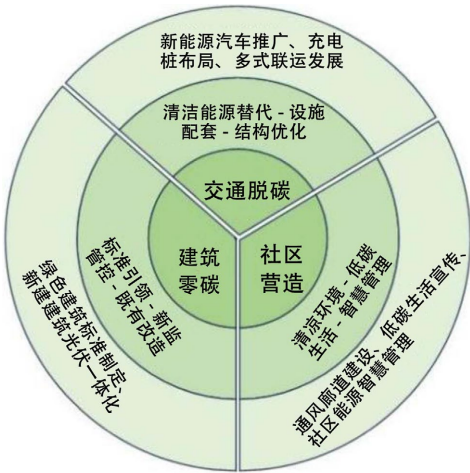


Figure 8. The planning diagram of island transportation energy transition
图 8. 海岛交通能源转型规划图

基金项目

项目编号: 220802313192612; 项目名称: 产教深度融合下的网络 GIS 课程体系改革与建设。项目名称: 海岸与海洋工程全国重点实验室开放基金项目(LP2518)。

参考文献

[1] 陈艳波, 张宁, 李嘉祺, 等. 零碳园区研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5496-5517.
[2] 周伟铎, 庄贵阳. 雄安新区零碳城市建设路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 122-134.
[3] 封学军, 王海鹏, 王慧茹, 等. 近零碳视角下港口混合可再生能源系统建设效果评估方法[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(5): 99-110.
[4] 刘培, 汤灿. 零碳社区建设的现实价值、典型案例与实施路径研究[J]. 生态经济, 2024, 40(9): 91-96.
[5] 雷小苗, 何继江, 杨守斌, 等. 能源转型视域下“零碳乡村”的可行性和环保性——以陕西关中 C 县 F 村为例[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2020, 22(5): 32-41.
[6] 慕溯, 王宏伟, 马知乐. “零碳”之问, 长岛作答[N]. 烟台日报, 2024-08-17(002).

- [7] Duarte, C.M., Kennedy, H., Marbà, N. and Hendriks, I. (2013) Assessing the Capacity of Seagrass Meadows for Carbon Burial: Current Limitations and Future Strategies. *Ocean & Coastal Management*, **83**, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.09.001>
- [8] Mcleod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M., *et al.* (2011) A Blueprint for Blue Carbon: Toward an Improved Understanding of the Role of Vegetated Coastal Habitats in Sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **9**, 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- [9] Atwood, T.B., Connolly, R.M., Almahasheer, H., Carnell, P.E., Duarte, C.M., Ewers Lewis, C.J., *et al.* (2017) Global Patterns in Mangrove Soil Carbon Stocks and Losses. *Nature Climate Change*, **7**, 523-528. <https://doi.org/10.1038/nclimate3326>
- [10] Kuang, Y., Zhang, Y., Zhou, B., Li, C., Cao, Y., Li, L., *et al.* (2016) A Review of Renewable Energy Utilization in Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **59**, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.014>
- [11] Gils, H.C. and Simon, S. (2017) Carbon Neutral Archipelago—100% Renewable Energy Supply for the Canary Islands. *Applied Energy*, **188**, 342-355. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.023>
- [12] Rico, A., Martínez-Blanco, J., Montlleó, M., Rodríguez, G., Tavares, N., Arias, A., *et al.* (2019) Carbon Footprint of Tourism in Barcelona. *Tourism Management*, **70**, 491-504. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.09.012>
- [13] 李静, 温国义, 杨晓飞, 等. 海洋碳汇作用机理与发展对策[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(12): 11-15.
- [14] 赵云, 乔岳, 张立伟. 海洋碳汇发展机制与交易模式探索[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 288-295.
- [15] 于瀚, 孙涛. 海南发展蓝色碳汇经济的政策建议[C]//中国海洋学会, 中国太平洋学会. 第九届海洋强国战略论坛论文集. 2018: 103-105.
- [16] 刘强, 张洒洒, 杨伦庆, 等. 广东发展蓝色碳汇的对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(12): 74-79.
- [17] 赵贺, 张峻菱, 王浩, 柯景召, 等. 两种造礁石珊瑚固碳能力初步研究[J]. 热带海洋学报, 2024, 43(3): 146-154.
- [18] 杨慧荣, 曾泽乾, 刘建新. 红树林渔业碳汇功能及其影响研究进展[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2023, 62(2): 10-16.
- [19] 焦琦斐, 李鹏, 吴昕浩, 等. 海洋渔业碳汇估算方法与应用研究——以环渤海地区为例[J]. 地理研究, 2024, 43(6): 1611-1626.
- [20] 张麋鸣, 颜金培, 叶旺旺, 等. 福建省贝藻类养殖碳汇及其潜力评估[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(1): 53-59.
- [21] 杨林, 郝新亚, 沈春蕾, 等. 碳中和目标下中国海洋渔业碳汇能力与潜力评估[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 716-729.
- [22] 伍良旭, 邹慧敏, 陈威, 等. 国家自然保护区海岛森林碳汇潜力评估及驱动因素分析[J]. 海洋学研究, 2023, 41(1): 96-109.
- [23] 妥彬, 田文斌, 郭超, 等. 中国东部海岛森林和灌丛土壤碳氮磷养分库的纬度变化[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2631-2638.
- [24] Chen, S., Xu, M., Lin, H., Tang, F., Xu, J., Gao, Y., *et al.* (2024) A Spatial-Temporal Analysis and Multi-Scenario Projections of Carbon Sequestration in Sea Islands: A Case Study of Pingtan Island. *Journal of Marine Science and Engineering*, **12**, Article 1745. <https://doi.org/10.3390/jmse12101745>
- [25] 史娴, 聂堂哲, 熊千, 等. 基于 InVEST 与 MaxEnt 模型的海南岛红树林生态系统碳储量增量预估[J]. 热带生物学报, 2023, 14(3): 298-306.
- [26] 韩广轩, 宋维民, 李远, 等. 海岸带蓝碳增汇: 理念、技术与未来建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 492-503.
- [27] 邵桂兰, 孔海峥, 于谨凯, 等. 基于 LMDI 法的我国海洋渔业碳排放驱动因素分解研究[J]. 农业技术经济, 2015(6): 119-128.
- [28] 李晨, 冯伟, 邵桂兰. 中国省域渔业全要素碳排放效率时空分异[J]. 经济地理, 2018, 38(5): 179-187.
- [29] 田鹏, 汪浩瀚, 李加林, 等. 中国海洋渔业碳排放时空变化特征及系统动态模拟[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 1074-1090.
- [30] 许倩, 翁绍捷, 李严. 海南省机动渔船能耗及碳排放量的调查与研究[J]. 热带农业工程, 2017, 41(3): 20-25.
- [31] 邵桂兰, 褚蕊, 李晨. 基于碳排放和碳汇核算的海洋渔业碳平衡研究——以山东省为例[J]. 中国渔业经济, 2018, 36(4): 4-13.
- [32] 韩增林, 计雪晴, 胡盈, 等. 基于 SBM 模型的我国海洋渔业生态效率的时空演变[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(12): 3-8.
- [33] 刘锴, 卞扬, 王一尧, 等. 海岛地区海洋碳汇量核算及碳排放影响因素研究——以辽宁省长海县为例[J]. 资源开发与市场, 2019, 35(5): 632-637.

- [34] 柯丽娜, 孔晓佳, 刘威. 旅游型海岛碳排放演变及其与旅游经济互动响应[J]. 生产力研究, 2024(1): 103-107.
- [35] 王信, 于涵, 施雨, 等. 基于多要素耦合的舟山农业空间低碳评估与规划[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 168-177.
- [36] 李莹. 基于深度学习的长海县海水养殖区提取及时空演变分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2024.
- [37] 曹辉, 吴慧珍, 沈珊珊, 等. “国家的碳源”抑或“国家的碳汇”?——基于武夷山国家公园碳均衡分析[J]. 自然资源学报, 2023, 38(4): 934-950.
- [38] Fang, J.Y., Chen, A., Peng, C., Zhao, S. and Ci, L. (2001) Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**, 2320-2322. <https://doi.org/10.1126/science.1058629>
- [39] Tang, C., Zhong, L. and Ng, P. (2017) Factors That Influence the Tourism Industry's Carbon Emissions: A Tourism Area Life Cycle Model Perspective. *Energy Policy*, **109**, 704-718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.050>
- [40] 谭美秋, 崔耀平, 马晓哲, 等. 河南省农田生态系统碳汇核算研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(9): 1129-1137.
- [41] 岳冬冬, 王鲁民. 基于直接碳汇核算的长三角地区海水贝类养殖发展分析[J]. 山东农业科学, 2012, 44(8): 133-136.
- [42] 纪建悦, 王萍萍. 我国海水养殖藻类碳汇能力及影响因素研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2014(4): 17-20.
- [43] 孔东升, 张灏, 张掖. 黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 972-983.
- [44] 周年兴, 黄震方, 梁艳艳. 庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4134-4145.
- [45] IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- [46] 岳冬冬, 王鲁民, 王茜, 等. 我国海洋捕捞渔业温室气体排放量估算与效率分析[J]. 山西农业科学, 2013, 41(8): 873-876.
- [47] 刘军, 问鼎, 童昀, 等. 基于碳排放核算的中国区域旅游业生态效率测度及比较研究[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1979-1992.