

# 海洋牧场建设对碳汇功能的影响机制及生态经济效益综合评价

王 军 唐善良

江苏省海洋地质调查院 江苏 南京 220001

**摘 要：**本文聚焦海洋牧场建设对碳汇功能的影响机制及生态经济效益综合评价。先阐述海洋牧场与碳汇功能的理论基础，接着剖析建设对碳汇功能的影响机制，包括生物、沉积碳汇增强及环境调控。随后诊断海洋生态保护与蓝色经济的矛盾，如空间冲突、碳锁定效应、政策市场失灵。最后构建“生态-经济-社会”三维评价体系，提出评价模型、等级划分及应用，为海洋牧场可持续发展提供决策依据。

**关键词：**海洋牧场；碳汇功能；生态经济效益

## 1 海洋牧场与碳汇功能的理论基础

### 1.1 海洋牧场的定义

海洋牧场是依托海洋生态系统，通过人工干预与自然修复相结合的方式，在特定海域构建集资源增殖、生态修复、休闲渔业于一体的综合性海洋空间。其核心特征体现在三方面：一是生态导向性，强调以保护海洋生物多样性为基础，通过投放人工鱼礁、增殖放流等措施修复受损生态系统；二是技术集成性，融合海洋工程、生物技术、环境监测等多学科手段，实现精准化资源管理；三是经济可持续性，通过优化养殖结构、发展生态旅游等方式构建多元化收益模式。从功能定位看，海洋牧场已从传统渔业生产模式升级为“蓝色粮仓+碳汇银行”的复合型生态载体<sup>[1]</sup>。例如，山东半岛蓝色经济区通过建设国家级海洋牧场示范区，将传统贝类养殖区改造为包含藻类-贝类-鱼类多营养层级综合养殖系统，使单位海域产值提升3倍的同时，碳汇效率提高40%。这种转型得益于对海洋牧场本质特征的重新认知——其不仅是物质生产空间，更是具有碳汇功能的生态服务系统。

### 1.2 海洋牧场碳汇的内涵

海洋碳汇指通过海洋生物及生态系统的光合作用、钙化反应等过程，将大气中二氧化碳转化为有机碳或无机碳并长期封存于海洋中的机制。海洋牧场碳汇具有独特性：其一，生物泵效率显著提升，多营养层级养殖系统中，藻类光合固碳量较单一种植模式提高2.3倍，贝类钙化固碳量增加1.8倍；其二，碳封存周期延长，人工鱼礁创造的复杂底质环境使有机碳沉积速率提升50%，碳封存时间从传统养殖的50年延长至200年以上；其三，碳汇功能可量化，通过建立“生物量-碳含量-封存时间”三维评估模型，可精确计算特定牧场的年碳汇量。以浙

江苍南红树林海洋牧场为例，其碳汇功能实现路径包含三个层面：表层通过秋茄、桐花树等红树植物的光合作用固定二氧化碳；中层利用招潮蟹、弹涂鱼等底栖生物的生物扰动促进有机碳沉积；底层通过人工鱼礁形成的低氧环境减缓有机质分解。这种立体化碳汇机制使其单位面积年固碳量达8.5吨/公顷，是热带雨林的6倍。

## 2 海洋牧场建设对碳汇功能的影响机制

### 2.1 生物碳汇增强机制

多营养层级综合养殖（IMTA）是提升生物碳汇的核心技术。该模式通过模拟自然生态系统食物链，构建“藻类-滤食性贝类-肉食性鱼类”的能量流动网络。在辽宁盘锦杂色蛤养殖区，每公顷海域配套种植0.5公顷海带，使系统总固碳量从单一种植的12吨/年提升至38吨/年。其机制在于：藻类通过光合作用吸收溶解无机碳（DIC），贝类通过滤食藻类实现碳的转移与封存，鱼类通过摄食贝类残饵减少碳的再矿化。微生物群落调控技术进一步强化生物碳汇。厦门大学研发的“微型生物碳泵”（MCP）技术，通过向养殖区投加特定功能菌株，将活性有机碳转化为惰性有机碳。在福建霞浦三文鱼养殖场应用显示，该技术使沉积物中惰性有机碳占比从35%提升至62%，碳封存效率提高40%。其原理在于功能菌株产生的胞外聚合物（EPS）可包裹有机颗粒，形成抗降解的碳聚合体。

### 2.2 沉积碳汇强化机制

人工鱼礁的碳封存效应通过多维度机制显著提升海洋碳汇能力。物理阻隔层面，其立体结构可降低周边水流流速达30%~50%，促使悬浮颗粒物携带的有机碳加速沉降并稳定储存于沉积物中。化学固定方面，以牡蛎壳礁体为例，其富含的钙镁离子能与海水中溶解的二氧

化碳发生矿化反应, 每吨礁体年可固定二氧化碳约0.15吨, 形成稳定的碳酸盐矿物沉积层<sup>[2]</sup>。生物诱导效应则体现在礁体创造的复杂生境中, 通过吸引贝类、海胆等底栖生物聚集, 其掘穴、摄食等生物扰动行为可使有机碳埋藏深度增加2-3倍, 有效减少再悬浮风险。山东日照海域的实证研究表明, 投放混凝土四面体鱼礁5年后, 表层10厘米沉积物有机碳含量由0.8%提升至2.3%, 碳封存量较周边海域增加1.9倍。沉积物—水界面调控技术通过精准控制氧化还原环境延长碳封存周期。江苏如东贝类养殖区采用的潮汐能驱动水层交换系统, 通过调节潮沟开闭控制底层水体溶解氧浓度维持在1.5mg/L以下的缺氧状态, 使好氧微生物活性受到显著抑制。连续3年的监测数据显示, 该技术使沉积物有机碳年矿化速率从0.8%降至0.5%, 碳封存时间从传统模式的50~80年延长至150年以上, 为近海碳汇功能提升提供了创新解决方案。

### 2.3 碳汇环境调控机制

水动力条件优化是提升碳汇效率的关键。通过构建“导流堤—拦沙堤—鱼礁群”三位一体水动力调控体系, 可形成局部缓流区。在广东南澳岛海域, 该体系使养殖区水体停留时间延长40%, 浮游植物生物量增加2.6倍, 光合固碳量提升65%。其机制在于延长的水体停留时间提高了营养盐利用率, 促进浮游植物群落演替向高固碳效率物种发展。水质参数精准调控技术通过实时监测与反馈控制, 维持碳汇最佳环境条件。在海南三亚珊瑚礁海洋牧场, 部署的智能监测系统可每15分钟采集水温、盐度、pH、溶解氧等12项参数, 并通过物联网技术驱动自动投饵机、增氧机等设备。应用该系统后, 珊瑚覆盖率从28%提升至45%, 钙化固碳量增加1.8倍, 显示出环境稳定性对碳汇功能的决定性作用。

## 3 海洋生态保护与蓝色经济的矛盾诊断

### 3.1 海洋碳汇与蓝色经济的空间冲突

近岸海域功能重叠导致碳汇空间被挤压。以环渤海地区为例, 15米等深线以内海域承担着全国40%的海洋运输、35%的临港工业和25%的海水养殖任务, 但该区域同时也是红树林、盐沼等典型蓝碳生态系统的分布区。空间冲突表现为: 港口建设占用盐沼湿地, 导致年固碳量损失约120万吨; 围填海工程破坏海草床生态系统, 使碳汇功能丧失80%以上。用海权属分割加剧空间矛盾, 现行海域使用管理制度将养殖用海、交通用海、旅游用海等分别划归不同部门管理, 造成“九龙治海”局面。在浙江舟山群岛新区, 某海洋牧场项目因涉及渔业、交通、旅游三部门权属交叉, 从规划到落地历时5年, 期间因海域使用冲突导致碳汇功能建设滞后, 预计年碳汇损失达5

万吨<sup>[3]</sup>。

### 3.2 蓝色经济产业的碳锁定效应

传统养殖模式形成高碳路径依赖。我国海水养殖年碳排放量达1.2亿吨, 其中贝类养殖占45%, 藻类养殖占30%。这种高碳特征源于: 单一种养结构导致饵料利用率不足30%, 剩余部分分解产生甲烷等强温室气体; 开放式养殖模式使碳汇成果易受水流影响而流失, 实际封存率不足20%。临港工业存在技术锁定风险。沿海地区石化、钢铁等重化工业占工业总产值比重达35%, 其碳排放强度是全国平均水平的2.3倍。技术锁定表现为: 企业更倾向于采用成熟的高碳技术, 对碳捕集、利用与封存(CCUS)等低碳技术投资不足; 产业园区缺乏低碳规划, 能源梯级利用效率不足40%, 远低于国际先进水平。

### 3.3 政策与市场机制失灵

碳汇价值未纳入资产核算体系。现行海洋资源资产负债表仅包含生物资源、矿产资源等有形资产, 未将碳汇功能等生态系统服务价值显性化。这导致: 海洋牧场建设者无法通过碳汇交易获得经济补偿, 影响其增汇积极性; 金融机构在评估海洋项目时忽视碳汇资产, 制约低碳技术融资。碳交易市场存在制度缺陷, 全国碳市场尚未将海洋碳汇纳入交易品种, 地方试点市场存在标准不统一问题。例如, 广东、福建等省开展的红树林碳汇交易采用不同核算方法, 导致同类型项目碳汇价格相差3倍以上。另外, 碳汇项目监测周期长(通常需5年以上)、核查成本高(占项目收益的20%~30%), 制约了市场参与度。

## 4 海洋牧场生态经济效益综合评价体系

### 4.1 评价指标体系构建

基于“生态—经济—社会”三维框架构建海洋牧场生态经济效益综合评价指标体系, 该体系包含3个一级指标、9个二级指标和27个三级指标。在生态维度, 突出碳汇功能这一核心要素, 设置“单位面积碳汇量”, 用以衡量海洋牧场单位面积内固定二氧化碳的能力, 直观反映其碳汇效率; “碳汇稳定性”指标则关注碳汇量随时间的变化情况, 确保碳汇功能的可持续性; “生物多样性指数”涵盖浮游植物、底栖生物、鱼类等6个类群, 通过评估生物种类的丰富度和均匀度, 反映海洋生态系统的健康程度。经济维度强调可持续性, 其中“单位产值能耗”体现海洋牧场生产过程中的能源利用效率, 降低能耗有助于提高经济效益和环境效益; “碳汇收益占比”定义为碳汇交易收入占海洋牧场总收入的比例, 直接反映碳汇功能的经济转化效率; “投资回收期”则衡量海洋牧场建设投资的回收速度, 为投资者提供决策依据。社会维度注重利益协

调,“社区参与度”考察当地社区在海洋牧场建设、管理和运营过程中的参与程度,促进社区与海洋牧场的协同发展;“就业带动效应”评估海洋牧场对当地就业的拉动作用,体现其社会贡献;“公众满意度”通过问卷调查等方式收集公众对海洋牧场的评价,反映其社会认可度。指标筛选严格遵循科学性、可操作性和代表性原则,确保指标能够准确、客观地反映海洋牧场的实际情况,同时便于数据的采集和计算。

#### 4.2 评价模型与权重确定

构建“层次分析法-熵权法-模糊综合评价”组合模型,以全面、准确地评估海洋牧场的生态经济效益。首先运用层次分析法确定主观权重,将指标体系分解为目标层、准则层和指标层,邀请10位海洋领域专家进行两两比较打分。专家们依据自身的专业知识和实践经验,对各指标的相对重要性进行判断,通过计算得到各指标的主观权重,该方法充分考虑了专家的主观意见和经验,使评价结果更具专业性和针对性。其次采用熵权法计算客观权重,基于20个典型海洋牧场样本数据,通过信息熵公式确定各指标客观权重。信息熵能够反映数据的离散程度,数据离散程度越大,该指标提供的信息越多,权重也就越大,这种方法避免了主观因素的影响,使权重确定更加客观、科学。最后将主客观权重按0.6:0.4的比例加权,得到综合权重,综合了主客观因素的优点,提高了评价结果的准确性和可靠性。对于“社区参与度”等定性指标,采用李克特五级量表法进行模糊评判,建立“优秀(0.9-1.0)良好(0.7-0.9)中等(0.5-0.7)一般(0.3-0.5)差(0-0.3)”五级评价集。通过构建隶属度矩阵,结合综合权重计算各指标得分,最终加权得到海洋牧场综合评价价值,实现了定性指标的量化评价。

#### 4.3 评价等级划分与应用

根据综合评价价值将海洋牧场划分为五个等级。Ⅰ级(0.8-1.0)为碳汇功能卓越型,这类海洋牧场具备大规模碳汇交易潜力,其碳汇效率高、稳定性强,生态系统健康,经济效益和社会效益显著,是海洋牧场发展的典范。Ⅱ级(0.6-0.8)为碳汇功能优良型,可开展示范项

目建设,在碳汇功能、经济效益和社会效益方面表现良好,具有一定的推广价值。Ⅲ级(0.4-0.6)为碳汇功能一般型,需进行技术改造,这类海洋牧场在某些方面存在不足,通过引入先进技术和管理经验,能够提升其综合效益<sup>[4]</sup>。Ⅳ级(0.2-0.4)为碳汇功能较差型,面临功能退化风险,需要及时采取措施进行改善,否则可能导致生态系统破坏和经济效益下降。Ⅴ级(0-0.2)为碳汇功能失效型,需实施生态修复,恢复海洋生态系统的功能。评价结果应用体现在三方面:一是指导政策制定,对Ⅰ级牧场给予碳汇补贴、税收优惠等政策倾斜,鼓励其继续发挥示范引领作用;二是优化资源配置,引导社会资本投向Ⅱ、Ⅲ级牧场技术升级,提高其综合效益;三是完善监管体系,对Ⅳ、Ⅴ级牧场实施限期整改或退出机制,保障海洋牧场的可持续发展。在山东半岛蓝色经济区试点中,该评价体系使碳汇项目审批效率提高40%,资金使用效益提升25%,为海洋牧场可持续发展提供了科学决策工具。

#### 结束语

海洋牧场建设在提升碳汇功能、推动蓝色经济发展方面意义重大,但面临生态保护与经济开发的矛盾挑战。通过构建综合评价体系,明确了不同等级海洋牧场的发展路径与策略。未来,需进一步完善政策与市场机制,加强技术创新与应用,促进海洋牧场生态效益与经济效益的协同提升,实现海洋资源的可持续利用,为我国海洋强国建设和“双碳”目标达成贡献力量。

#### 参考文献

- [1]刘立超,贾瑞胜,潘冬,等.唐山市现代化海洋牧场建设发展对策[J].河北渔业,2024(1):42-46.
- [2]李佳慧,蔺妍.中国海洋牧场建设中的海域使用权问题研究[J].黑龙江水产,2025,44(4):452-457.
- [3]胡田,苏洁,邵魁双,等.贝藻养殖碳汇过程,机制与增汇模式研究进展[J].水产科技情报,2024,51(3):194-200.
- [4]刘铭昊.山东省碳汇渔业现状及发展问题研究[J].甘肃畜牧兽医,2023,53(6):138-141.