

引用格式:邵桂兰,孔海峥,李晨. 中国海水养殖的净碳汇及其与经济耦合关系[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 277-288. [Shao G L, Kong H Z, Li C. Net amount of mariculture carbon sink and its coupling relationship with economics growth of China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(2): 277-288.] DOI :10.18402/resci.2019.02.07

中国海水养殖的净碳汇及其与经济耦合关系

邵桂兰¹, 孔海峥¹, 李 晨^{1,2}

(1. 中国海洋大学经济学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋发展研究院, 青岛 266100)

摘 要: 中国是世界第一海水养殖大国, 努力促进海水养殖业经济、环境协调发展, 对落实节能减排要求、共谋全球生态文明建设具有重要意义。本文通过估算中国海水养殖净碳汇并评价其与海水养殖经济之间的耦合程度, 探讨中国海水养殖业环境效益与经济效益的协调共生关系。研究结果表明: 2008—2016年全国海水养殖净碳汇保持在43万~49万t, 净碳汇与海水养殖经济耦合程度低, 除2010年短暂达到增长耦合状态, 2009—2014年间其他年份均处于非同步断裂关系, 这一阶段中国海水养殖业仍依赖数量型增长, 2015—2016年进入非同步负断裂阶段, 此时海洋生态文明建设初见成效, 但仍缺少环境效益向经济效益转化的市场机制; 从省际来看, 2008—2016年除冀、琼、津的海水养殖净碳汇为负外, 净碳汇贡献最大的省依次为粤、闽、鲁、辽、桂、浙、苏, 其中闽、浙、苏海水养殖业净碳汇与经济间主要呈现非同步断裂关系, 产业发展仍侧重于经济增长, 辽、鲁则呈现非同步负断裂趋势, 环境效益提升显著快于经济效益增加, 而粤、桂的海水养殖业经济、环境效益则接近平衡。

关键词: 海水养殖业; 净碳汇评估; 环境效益; 经济效益; 耦合关系; 中国

DOI :10.18402/resci.2019.02.07

1 引言

2018年5月18至19日, 全国生态环境保护大会召开, 习近平总书记强调, 生态文明建设是中华民族永续发展的根本大计, 提出人与自然和谐共生、贯彻绿色协调的发展理念, 应加快形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式和生活方式, 建立健全以产业生态化和生态产业化为主体的生态经济体系^[1]。海洋生态系统对全球碳循环具有重要贡献, 近岸贝藻类养殖通过滤食、沉积和光合作用所封存的CO₂是海洋碳汇的重要组成部分, 海水养殖业对大气环境能够产生正的外部效应。海水养殖业是中国主要海洋产业之一, 同时中国亦是世界第一海水养殖大国, 因此, 努力促进中国海水养殖业环境效益与经济效益的协调发展, 对落实“十三五规划”的节能减排要求、建立健全海洋生态经济体系、共谋全球生态文明建设具有重大意义。

2010年唐启升^[2]院士首次提出“渔业碳汇”概念, 将渔业碳汇定义为通过渔业生产活动促进水生生物吸收水体中的CO₂, 并通过收获把这些已经转化为生物产品的碳移出水体的过程和机制, 也指出海水养殖业, 尤其海水贝藻类养殖, 是海洋碳汇的主要来源之一。国外研究一般较少从产业经济视角区分海洋野生与养殖生物, 而倾向于将海洋生态系统视为一个整体, 侧重从生态学视角评估海洋碳汇贡献及其对气候变化的影响, 如Smith^[3]早在1981年已指出海洋大型藻类所产生的碳汇可能对实现全球碳平衡具有重要意义; Alvera等^[4]通过测度世界典型养殖海区贝藻类的固碳系数, 证明贝藻类养殖对近海碳循环有重要贡献; Mitra等^[5]以印度四个典型区域为例, 比较肠浒苔、石莼和红藻在风季来临前、中、后的固碳能力差异, 发现肠浒苔具有最高的固碳能力; Landschuetzer等^[6]测度了1998—2011年

收稿日期: 2018-06-07, 修订日期: 2018-11-14

基金项目: 山东省社会科学规划研究项目(18CSJJ01); 青岛市社会科学规划研究项目(QDSKL1701012); 山东省社会科学规划研究项目(16DJJJ14)。

作者简介: 邵桂兰, 女, 山东青岛人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为渔业资源与经济、水产品国际贸易。E-mail: shaoguilan@126.com

通讯作者: 李晨, E-mail: phd_lichen@126.com

世界海洋碳汇年变化量,发现海洋碳汇相比土地碳汇更稳定;Bakker等^[7]提出海洋碳汇变化率对气候变暖评估及预测是至关重要的;Dan等^[8]认为在海洋碳汇管理时应同时关注碳汇与碳源的稳定与维持,从而保证海洋碳循环有效运行。国内学者早期亦侧重于运用自然科学理论方法评估贝藻类养殖固碳能力,如Zhou等^[9]、张继红等^[10]、宋金明等^[11]分别对世界和中国典型贝、藻养殖区进行抽样实验,测度浅海贝藻类体内碳元素含量并估算碳汇容量,亦证明了养殖贝藻类碳汇为海洋碳循环做出突出贡献。

在渔业碳汇概念提出后,国内学者们逐渐从社会科学视角探讨渔业碳汇扩张的影响因素及路径,如岳冬冬等^[12]、纪建悦等^[13]运用LMDI因素分解法,分别对海水贝、藻类养殖碳汇进行分解,将碳汇能力主要影响因素分解为产量因子和养殖结构因子;林光纪^[14]指出中国作为世界水产养殖大国,扩张海水养殖渔业碳汇具有国际示范效应;唐启升等^[15]提出应尽快查明中国海洋渔业碳汇能力及动态机制;孙吉亭等^[16]认为实行立体化、生态化养殖模式和建立渔业碳汇交易市场是扩张渔业碳汇的关键;邵桂兰等^[17,18]认为应同时加强以碳汇渔业为主体的海水养殖业供应链信息化管理,从而为渔业碳汇扩张提供有力保障,并尝试运用B-S期权定价法评估贝藻类养殖渔业碳汇价值;沈金生等^[19]通过建立蓝色碳汇净现值与其他渔业活动收益方程的方法构建海洋牧场蓝色碳汇定价机制,于梦璇等^[20]则运用博弈理论和数值模拟方法测算出中国渔业碳汇潜力,均进一步探讨了海洋渔业碳汇市场交易机制运行的可行性。由此可见,海洋碳汇以及渔业碳汇已成为较受关注的研究领域,目前的研究文献主要集中在碳汇能力核算、影响因素分析、碳汇扩张策略及碳汇交易机制构建等方面,且学者们就海洋渔业碳汇在国民经济、海洋经济低碳化发展过程中所发挥的重要作用基本达成了共识。

目前,碳排放与渔业经济、海洋经济之间的相互关系是学者们的关注焦点之一,如王泽宇等^[21]通过计算Tapio脱钩指数,发现2006—2014年间海洋经济逐渐实现与海洋资源消耗的脱钩式增长;李晨等^[22]等基于脱钩理论分析2011—2013年中国远洋渔业处于增长负脱钩状态,减排措施势在必行;岳

冬冬等^[23]亦根据碳排放与渔业经济间的脱钩关系,将低碳渔业划分为无脱钩、相对脱钩、绝对脱钩和零碳排放四个发展阶段。然而,却鲜有对海洋碳汇与海洋经济的交互关系、海洋经济效益与环境贡献协调统一等问题的研究。事实上,田云等^[24]所指出的,对于同样具有碳汇和碳排放双重效应的农业来说,分析其净碳汇水平是深入研究农业生产碳排放问题的重要前提。如杨果等^[25]和王劼等^[26]分别运用脱钩理论分析全国农业源碳汇和碳排放与农业经济增长之间的关系,结果表明碳排放与农业经济增长之间已呈现明显的较乐观的脱钩趋势,然而当考虑碳汇因素的时候,却发现同期的若干年份中碳汇扩张滞后于经济增长,从宏观角度看并不认为农业生产过程得到了改善。在其他碳汇源研究领域,碳汇扩张与经济增长之间的作用关系也已得到一定关注,李鹏等^[27]对森林碳汇与国民经济及林业经济增长间的长期与短期关系进行了计量检验,李虹等^[28],在评价有效经济增长与净碳排放关系时也考虑了碳汇的影响。据此,为更准确评价渔业经济、海洋经济在产业发展过程中经济贡献与环境外部性之间的相互关系,本文拟基于海洋碳循环视角将贝藻类海水养殖所产生的碳汇作为海水养殖业环境效益,运用干物质质量法和脱钩理论,估算海水养殖业净碳汇,分析其与海水养殖经济之间的耦合关系及其动态变化,并探讨其背后所反映的中国海水养殖业发展健康程度及产业发展方式合理性。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 净碳汇估算方法

2.1.1 碳汇总量估算模型

中国海水养殖主要品种中,贝类、藻类、鱼类、甲壳类等均可通过自身生长或捕食活动进行直接或间接固碳。其中,贝藻类养殖不投放饵料,通过直接固碳方式可获得大量可移出碳汇,是中国海水养殖碳汇的主要品种,故本文估算碳汇量主要来源于海水贝藻类养殖。从碳汇机制上看,贝类在生长过程中一方面通过利用海水中溶解 CO_2 后形成的 HCO_3^- ,形成贝壳的主要成分 CaCO_3 ,另一方面通过滤食海水中的有机碳颗粒促进自身软组织生长,从而形成碳汇;藻类则通过光合作用吸收水体中的 CO_2 ,将碳留存于自身植株中。此外,大型藻类的初级生产力可通过复杂的生物过程以颗粒有机碳

2019年2月

(POC)和可溶性有机碳(DOC)的形式迁移至海水,POC和DOC与海水养殖生物的生长和初级生产密切相关;然而,现有相关研究对POC、DOC占藻类初级生产力的比重测度研究较少,目前尚难以评估藻类以POC和DOC形式产生的碳汇量,故本文仅考虑藻类自身封存的可移出的碳汇量。

基于贝藻类碳汇机理,构建海水养殖碳汇总量估算模型如下:

$$\begin{aligned} C_{\text{total}} &= \sum C_{\text{sh}} + \sum C_{\text{al}} \\ \sum C_{\text{sh}} &= \sum_{j=1,2} Q_i \cdot \alpha_{ij} \cdot \omega_{ij} \\ \sum C_{\text{al}} &= \sum Q_k \cdot \alpha_k \cdot \omega_k \end{aligned} \quad (1)$$

式中: C_{total} 表示碳汇总量; C_{sh} 、 C_{al} 分别表示由贝类和藻类产生的碳汇量; Q 表示产量; α 表示干重系数; ω 表示固碳系数; i, k 分别表示贝、藻类种类; $j=1, 2$ 分别表示贝壳和软体组织。

2.1.2 碳排放与碳汇净量估算模型

海水养殖业碳排放可以分解为两层:第一层,来源于能源燃烧的直接碳排放,主要指养殖渔船消耗的柴油经过燃烧产生的 CO_2 排放;第二层,来源于使用电力导致的间接碳排放,主要指对海水池塘及工厂化养殖进行供氧、通电而造成的 CO_2 排放^[29]。估算公式如下:

$$C_{\text{em}} = P \cdot \mu \cdot \theta_1 + \sum (Q_i \cdot \rho_i + S_i \cdot \eta_i) \cdot \theta_2 \quad (2)$$

式中: C_{em} 表示海水养殖碳排放量; P 表示海水养殖渔船功率; Q_i 表示池塘、工厂化养殖产量; S_i 表示池塘、工厂化养殖面积或体积; θ_1 、 θ_2 分别表示柴油和电力碳排放系数; μ 、 ρ 、 η 为对应的能源消耗转化系数。据此,海水养殖净碳汇估算公式如下:

$$C_s = C_{\text{total}} - C_{\text{em}} \quad (3)$$

式中: C_s 表示海水养殖碳汇净量。

2.2 净碳汇与经济耦合关系评价方法

脱钩理论研究的是经济变量与环境变量之间的连接与阻断关系^[30]。通常,学者们选取碳排放、能源消耗等指标作为环境变量,计算脱钩指数评价经济增长与环境压力之间的动态脱钩变化过程。与其他多数产业经济不同的是,海水养殖业生产过程除产生温室气体排放外,亦会吸收、固定大气和水体中的 CO_2 ,且通常海水养殖过程会产生净碳汇,此时用传统脱钩理论已无法准确判定海水养殖业经

济与环境关系的变化趋势。因此,本文以海水养殖业净碳汇替换碳排放量,作为环境变量加入传统脱钩理论模型,此时的模型不仅能够体现传统脱钩评价模型所选取的环境压力,亦包含环境承载指征,能够更加明晰的反映产业发展过程中的总体生态环境外部效应。用传统脱钩理论以得到经济增长与环境压力间从耦合到脱钩的变化过程,扩展后的脱钩评价模型则可以得到海水养殖净碳汇所代表的环境效益与经济效益从断裂到逐渐实现同步耦合的动态过程。基于Tapio脱钩指数模型,构建海水养殖净碳汇与海水养殖经济耦合关系评价模型如下:

$$\varepsilon = \frac{(C_{s_{t+1}} - C_{s_t})/C_{s_t}}{(A_{q_{t+1}} - A_{q_t})/A_{q_t}} = \frac{\Delta C_{s_t}/C_{s_t}}{\Delta A_{q_t}/A_{q_t}} \quad (4)$$

式中 ε 为耦合指数; C_{s_t} 、 A_{q_t} 分别为 t 期海水养殖净碳汇净量和海水养殖经济产值; $\frac{\Delta C_s}{C_s}$ 、 $\frac{\Delta A_q}{A_q}$ 分别表示海水养殖净碳汇与海水养殖业产值的年增长率。

Tapio将经济增长与环境压力的脱钩状态划分为脱钩、负脱钩和连接三个状态^[31],脱钩指经济增长速度相对高于环境压力增加速度的一种较为理想的状态,负脱钩则指经济增长速度相对低于环境压力增加速度的状态,连接则指经济增长和环境压力增加速度较为同步的状态。净碳汇由碳汇总量减去碳排放量而得,当用净碳汇作为环境承载变量替代碳排放量加入模型时,一定程度上可以将净碳汇视为“负碳排放”,从这一视角对评价标准进行转换:此时原本模型中的“连接”状态转为经济增长与环境承载提升速度同步的理想状态,而原本模型中较为理想的“脱钩”状态则转为经济效益抛离环境效益快速增长的相对消极状态,原模型中的“负脱钩”则体现了环境效益改善快于经济效益增加的失衡状态。因此,本文在应用以净碳汇为环境变量的扩展脱钩模型进行评价时,为避免与传统脱钩理论混淆,对Tapio脱钩评价标准进行重新表述:参照杨果等^[25]用“耦合”一词表述“农业产值增加与农业源碳汇增加之间的连接关系”,将原脱钩评价标准中的“连接(coupling)”状态译为“耦合”,同时,将“脱钩(decoupling)”译为“断裂”,将“负脱钩(negative decoupling)”译为“负断裂”。具体海水养殖净碳汇

与海水养殖经济发展关系评价标准,见表1。

(1)同步耦合状态。海水养殖业的经济效益与环境效益相协调:①扩张耦合状态下,海水养殖业的净碳汇扩张与产值增加同步,产业经济效益和环境效益协调统一,是海水养殖业发展的理想状态;②衰退耦合状态下,海水养殖净碳汇减少,海水养殖经济负增长,产业整体处于衰退状态。

(2)非同步断裂状态。海水养殖净碳汇扩张落后于海水养殖经济增长:①强断裂状态下,海水养殖业产值增加的同时净碳汇量减少,经济效益与环境效益呈两极化;②弱断裂状态下,海水养殖业的净碳汇和产值均增加,但净碳汇增加速度显著落后于经济增长;③衰退断裂状态下,海水养殖经济萎缩,同时海水养殖净碳汇迅速减少,是海水养殖业发展过程中的最恶劣状态。

(3)非同步负断裂状态。海水养殖业经济增长落后于净碳汇扩张:①强负断裂状态下,海水养殖业增汇的同时产值降低,产业发展过度侧重环境效益,从长期来看可能出现产业发展动力不足的问题;②扩张负断裂状态下,海水养殖净碳汇增加速度高于产值增加速度,环境改善无法驱动经济效益同步增加;③弱负断裂状态下,海水养殖净碳汇减少的同时,海水养殖业经济迅速衰退,恶化的海洋生态环境已不足以支撑海水养殖业经济。

2.3 数据来源

本文选用2008—2016年全国及10个沿海省份与直辖市(由于数据获取困难,本次研究不包括香港、台湾、澳门和上海)海水养殖业作为研究样本。目前农业农村部渔业渔政管理局在数据统计时,将海水养殖贝类分为牡蛎、贻贝、扇贝、蛤、鲍、蛭、螺、

蚶、江珧共9种,海水养殖藻类分为海带、裙带菜、紫菜、江蓠、羊栖菜、石花菜、麒麟菜、苔菜共8种,其中2008—2016年间牡蛎、贻贝、扇贝、蛤产量占总产量的79.1%~85.1%,海带、裙带菜、紫菜、江蓠产量占总产量的75.1%~96.8%,可视为主要养殖贝类和藻类品种,据此,本文在碳汇总量估算时将贝类划分为牡蛎、贻贝、扇贝、蛤及其他贝类,将藻类划分为海带、裙带菜、紫菜、江蓠及其他藻类。估算海水养殖净碳汇时所用到的产量、养殖渔船功率、池塘及工厂化养殖面积等数据来源于《中国渔业统计年鉴》^[32]。在计算2008—2016年海水养殖业经济实际产值时,以2008年为基期,采用《中国统计年鉴》^[33]中“海水养殖产品生产价格指数”作为价值指数,其中2009年、2010年价格指数使用2011—2016年均值作为替代。

固碳系数确定方面,虽然养殖贝藻类的固碳能力受养殖密度、养殖方式、海水营养盐结构等因素影响,但过往研究结论表明不同海区中贝藻类的固碳系数、软硬组织质量比重、干湿重比重并不存在显著差异^[34-36]。故借鉴已有研究结果,参照GAO等^[36]研究结果确定藻类干湿重比重,参照张继红等^[10]研究结果确定贝类与藻类固碳系数、贝类软组织与贝壳质量比重及干湿重比重,其中,因裙带菜同属海带目,故取文献中海带属下各品种系数均值作为其固碳系数,蛤与江蓠相关系数取文献中所涉及的同属下各品种系数均值,其他贝类和其他藻类相关系数分别取主要贝类、主要藻类品种系数均值。碳排放系数确定方面,根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[37]计算柴油和电力的碳排放因子,根据《国内机动渔船油价补助用油量测算参考标准》^[38]确

表1 海水养殖净碳汇与海水养殖经济耦合关系评价标准

Table 1 Evaluation criterion of the coupling relationship between net carbon sink and mariculture economy

	耦合状态	$\Delta C_s/C_s$	$\Delta A_q/A_q$	耦合指数 ε
同步耦合	增长耦合	+	+	$0.8 \leq \varepsilon < 1.2$
	衰退耦合	-	-	$0.8 \leq \varepsilon < 1.2$
非同步断裂	强断裂	-	+	$\varepsilon < 0$
	弱断裂	+	+	$0 \leq \varepsilon < 0.8$
	衰退断裂	-	-	$\varepsilon \leq 1.2$
	强负断裂	+	-	$\varepsilon < 0$
非同步负断裂	扩张负断裂	+	+	$\varepsilon \geq 1.2$
	弱负断裂	-	-	$0 \leq \varepsilon < 0.8$

注:根据Tapio脱钩模型评价标准^[31]整理,“+”表示相较上一年增加,“-”表示相较上一年减少。

2019年2月

定海洋养殖渔船油耗转化系数,参考徐皓等^[29]研究结果确定海水池塘养殖和工厂化养殖的能耗转化系数。

3 结果及分析

3.1 全国海水养殖净碳汇估算

运用公式(1)—公式(3),估算2008—2016年全国海水养殖碳汇总量、贝类及藻类固碳量、碳排放量、净碳汇量结果见表2。

表2显示,中国海水养殖碳汇总量在2008—2016年表现出稳定的增长态势,贝类养殖固碳是海水养殖碳汇的主要来源,且变化趋势与海水养殖碳汇总量变化趋势一致。海水养殖碳排放量亦呈现稳定的递增趋势,2013年前池塘养殖面积和工厂化养殖规模均逐年扩大,碳排放量以年均近10%的速率增加,至2014年后碳排放量增加速度减缓至4%,这是由于2014—2016年池塘养殖面积连续三年减少,海水养殖逐渐走向深海,一定程度减少了生产过程中的碳排放量。在碳汇总量和碳排放量总体均呈现增加态势的基础上,2008—2016年中国海水养殖净碳汇量存在一定波动,但总体水平较为稳定,维持在43.170万~48.830万t,说明从全国范围来看海水养殖生产过程创造了净的环境收益,且海水养殖业碳排放与碳吸收过程保持了较高的同步性。

3.2 省际海水养殖净碳汇估算

将全国海水养殖净从省际层面进行分解,估算2008—2016年沿海10个省、直辖市的碳汇总量、碳排放量和碳汇净量结果见表3及图1。

表3显示,中国海水养殖净碳汇的省际分布差

异较大,尽管从全国范围看中国海水养殖业获得了净碳汇,但从省际层面则可根据碳汇净量的正负情况,将中国沿海省(市)分为两大类,一是净碳汇为正、即在海水养殖生产过程中碳汇量大于碳排放量的省份,根据固碳贡献依次为广东、福建、山东、辽宁、广西、浙江和江苏;二是净碳汇为负、即在海水养殖生产中抵消碳汇量后仍产生额外碳排放的省份,根据净碳汇数量大小依次为天津、海南和河北。

结合各省海水养殖碳汇总量及碳排放量水平,分析各省净碳汇状况的成因。广东省是净碳汇贡献最高的省份,年均约11.973万t,广东省海水养殖碳汇总量仅位列沿海各省的第四位,但低工厂化养殖密度大大减少了养殖过程中的碳排放,最终产生较高的净碳汇。同样低排放的省份还有广西,尽管广西在碳汇总量上与江苏、浙江相近,均属于中低水平,但广西陆基养殖规模和养殖渔船功率水平均远低于上述两省,因此在海水养殖过程中做出了更高的净碳汇贡献。

山东是典型的“高吸收-高排放”省份,海水养殖碳汇总量年均约33.876万t,超出第二位福建省约10.070万t,但高陆基养殖规模、高养殖密度与高渔船功率的集约化养殖方式也要求更大的能源消耗作为支撑,最终导致净碳汇贡献仅位列第三位。

福建省从总量来看,是2008—2016年碳汇净贡献第二高的省份,但呈现较为显著的减少趋势,这是由于自2009年起福建陆基养殖规模持续扩张,尤其2012年后工厂化养殖体积年增长12%~15%,养殖密度也以23%的年均增长率增大,集约化养殖发展进程中大幅增加碳排放,但碳汇总量并未以同等

表2 2008—2016年中国海水养殖净碳汇

Table 2 Net amounts of carbon sink of mariculture in China from 2008 to 2016

(万t)

年份	碳汇总量	贝类碳汇	藻类碳汇	碳排放量	碳汇净量
2008年	95.661	87.471	8.190	48.952	46.709
2009年	99.940	91.356	8.584	56.771	43.170
2010年	105.851	96.757	9.093	59.043	46.807
2011年	109.916	100.468	9.447	63.335	46.581
2012年	115.654	105.261	10.393	71.267	44.387
2013年	121.728	110.802	10.926	77.800	43.928
2014年	126.679	114.697	11.982	81.729	44.950
2015年	130.851	118.366	12.484	85.804	45.047
2016年	136.686	123.739	12.947	87.856	48.830

表3 2008—2016年沿海省(市)海水养殖净碳汇

Table 3 The net amounts of mariculture carbon sink of coastal provinces in China from 2008 to 2016 (万t)

	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
天津	-0.529	-0.650	-0.717	-0.849	-0.942	-0.944	-0.998	-0.733	-0.736
河北	-2.892	-2.467	-1.863	-2.160	-2.145	-2.096	-2.551	-3.589	-3.784
辽宁	6.191	4.371	5.535	5.056	6.592	7.496	8.278	8.894	9.502
江苏	1.973	2.266	1.579	1.655	2.179	1.740	1.117	0.554	0.478
浙江	4.699	4.176	4.358	4.018	4.083	3.154	2.641	3.321	3.767
福建	13.029	10.749	11.208	12.279	9.853	9.740	9.834	9.493	9.496
山东	9.983	10.360	10.441	10.100	7.997	7.138	9.282	9.706	11.989
广东	10.846	11.217	11.750	12.141	12.142	12.695	12.334	12.111	12.525
广西	4.108	4.262	4.989	5.759	5.444	5.378	5.989	6.366	6.741
海南	-0.699	-0.808	-0.781	-0.796	-0.815	-0.839	-0.978	-1.077	-1.155

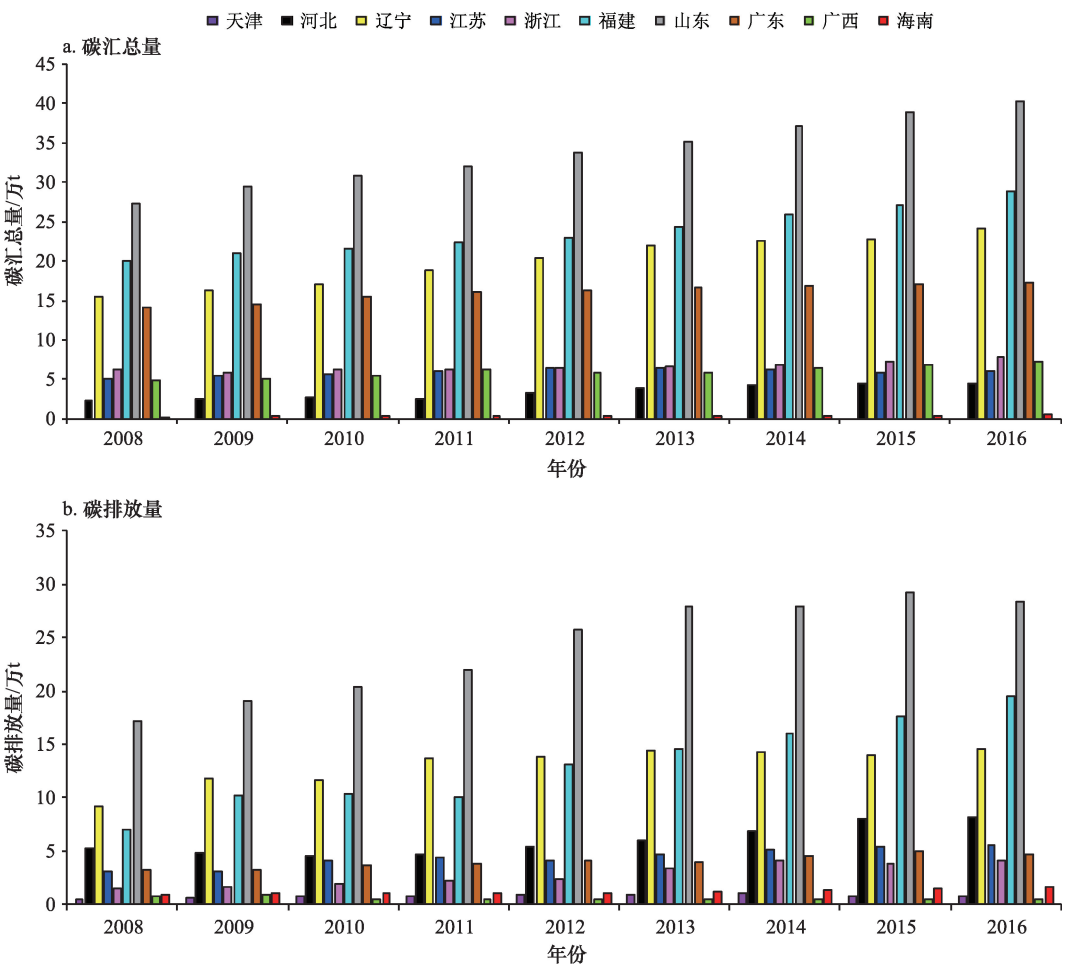


图1 2008—2016年沿海省(市)海水养殖碳汇总量与碳排放量

Figure 1 Themaricultural carbon sink capacitiesand carbon emissions of coastal provinces in China from 2008 to 2016

速度扩张,导致福建海水养殖净碳汇量显著减少。

辽宁省与福建相反,海水养殖净碳汇在2008—2016年总体呈显著递增趋势,这是由于自2009年起

辽宁省工厂化养殖体积及密度、池塘养殖面积与养殖渔船功率均得以控制,在海水养殖碳汇总量保持5%的年均增加率的同时,碳排放量增加速度显著放

2019年2月

缓,实现净碳汇贡献的显著提升。

2008—2016年间河北、海南、天津在海水养殖中对大气产生了额外的净碳排放。数据显示,天津市海水养殖主要品种为南美白对虾、鲆鱼和石斑鱼,难以产生碳汇,因此产生净的碳排放;河北、海南则均是因陆基养殖规模和养殖渔船功率较大,造成海水养殖过程中的碳排放超过其固碳量,最终导致负的环境外部性。

3.3 全国海水养殖净碳汇与海水养殖经济耦合关系评价

运用公式(4)、公式(5),计算2009—2016年全国海水养殖净碳汇与海水养殖经济发展的耦合指数并确定耦合状态,结果见表4。结果表明,2009—2016年间海水养殖业净碳汇与经济增长耦合程度低,除2010年短暂达到增长耦合状态外,其余年份均处于非同步断裂或负断裂状态,产业经济效益与环境效益发展极不同步。根据耦合状态,可大致将全国海水养殖业发展划分为两个阶段:2009—2014年,净碳汇与经济总体呈现非同步断裂关系,经济效益总体高于环境效益;2015—2016年,发展重心由经济增长转向环境改善,净碳汇与经济呈非同步负断裂关系。

(1)除2010年外,2009—2014年海水养殖业净碳汇与经济均保持非同步断裂关系。2009年,海水养殖经济增长的同时净碳汇以较大幅度减少,碳汇与经济呈强断裂关系。2010年,海水养殖经济和环境效益均出现显著提升,短暂达到共同繁荣的增长耦合状态。2011—2013年,随着渔民“转产”政策和集约化养殖策略的落实,海水养殖业生产要素充沛且丰富,经济继续保持中高速增长速率,然而养殖

规模扩大造成碳排放总量增加、净碳汇持续减少,经济与碳汇恢复强断裂关系,经济与环境效益呈两极化演变趋势,产业内部压力较大。2014年,海水养殖净碳汇与经济的耦合关系转为弱断裂,在经济继续保持增长的同时净碳汇也有所增加,但环境改善速度仍明显落后于经济增长。海水养殖净碳汇与经济增长间总体保持非同步断裂关系,意味着在2009—2014年间中国海水养殖业仍处于数量化、规模化的外延式增长阶段,海水养殖业生产方式、海水养殖品种结构、海洋空间资源利用效率等方面均有待优化。

(2)2015—2016年,海水养殖净碳汇扩张与经济增长进入非同步负断裂状态,净碳汇保持增加的同时,海水养殖业实际产值呈负增长或低速增长,表现出侧重环境效益的发展趋势。这表明,随着“十八大”海洋生态文明建设的提出以及随后《关于促进海洋渔业健康发展的若干意见》^[39]的出台,海水养殖业的正环境外部性得以提高,碳汇能力和净碳汇贡献持续提升。然而,这一时期经济增长相对滞后,表明目前环境效益改善更多仍依赖于政策驱动而非市场激励,海水养殖碳汇交易机制缺失,使碳汇作为一种公共物品的正外部性得不到补偿,进而导致环境效益与经济效益间的联动路径断裂。同时,海水养殖业可能出现供需失衡,碳汇品种可能已过度养殖超过市场需求,难以转换为经济效益,养殖品种与养殖方式的结构存在不合理。

纵观2009—2016年全国海水养殖净碳汇与经济耦合关系变化轨迹,尽管目前尚处于非同步阶段,但2009—2014年和2015—2016年两个阶段均总体表现向同步耦合趋近的趋势。第一阶段呈现

表4 2009—2016年全国海水养殖净碳汇与海水养殖经济耦合关系

Table 4 Coupling relationship between net carbon sink of mariculture and its growth nationwide in China from 2009 to 2016

	$\Delta C_s/C_s$		$\Delta A_q/A_q$		耦合指数 ε	耦合状态
	值	较上一年情况	值	较上一年情况		
2009年	-0.076	-	0.031	+	-2.435	强断裂,非同步断裂
2010年	0.084	+	0.096	+	0.874	增长耦合,同步耦合
2011年	-0.005	-	0.052	+	-0.093	强断裂,非同步断裂
2012年	-0.047	-	0.057	+	-0.822	强断裂,非同步断裂
2013年	-0.010	-	0.068	+	-0.152	强断裂,非同步断裂
2014年	0.023	+	0.049	+	0.480	弱断裂,非同步断裂
2015年	0.002	+	-0.016	-	-0.137	强负断裂,非同步负断裂
2016年	0.084	+	0.007	+	12.726	扩张负断裂,非同步负断裂

注:“+”表示相较上一年增加,“-”表示相较上一年减少。

由强断裂转为弱断裂的总体趋势,而第二阶段则从强负断裂转为扩张负断裂,海水养殖业发展均在向经济与环境协调平衡的方向趋近。

3.4 省际海水养殖净碳汇与海水养殖经济耦合关系评价

去除天津、河北、海南三个未产生净碳汇省(市)对其他沿海7个省份的海水养殖净碳汇及其海水养殖经济增长的耦合关系进行评价(表5)。表5显示,从省际层面来看,中国海水养殖净碳汇与海水养殖经济耦合程度低,除在个别省份的个别年份偶尔达到同步耦合外,多数时间和省份的海水养殖业经济与环境发展均不同步,这与全国层面的结果较为一致。同时,省际间的海水养殖业净碳汇与经济增长之间的耦合程度也差异较大。根据耦合指数及其变化趋势,可大致划分为三类:

(1)在2009—2016年间,广东、广西两省海水养殖净碳汇与海水养殖经济的耦合指数总体呈现围绕“增长耦合”波动的变化趋势,并分别于2014年和2016年短暂达到增长耦合关系,表明广东、广西两省海水养殖业经济与环境效益接近平衡,海水养殖业发展较为健康。

(2)福建、浙江、江苏在2009—2016年间的多数年份中,海水养殖业净碳汇与经济处于非同步断裂发展关系,产业发展的环境效益显著落后于经济效

益,海水养殖业发展可持续性低。其中,福建除2011年外均处于非同步断裂状态,海水养殖业环境效益长期落后于经济效益,相比浙江、江苏两省,海水养殖业未来发展存在更高的不稳定性。

(3)在研究期内的多数年份中,辽宁、山东海水养殖业的净碳汇增加与经济增长处于非同步负断裂状态,表明经济效益增加落后于环境效益提升。其中,辽宁除在2012年短暂达到增长耦合之外,2010—2016年其余年份均处于非同步负断裂状态,海水养殖业环境效益持续增加的同时经济效益不足,这可能会造成渔民福利损失以及未来产业发展的激励缺失。山东在2013年之前的多数年份处于非同步断裂状态,2013年后则持续出现非同步负断裂,体现其海水养殖业发展重心从经济增长转向环境提升的趋势。

3.5 讨论

通过评估海水养殖净碳汇与海水养殖业经济之间的耦合关系,不仅能从经济、环境效益相均衡视角,探讨中国及各省海水养殖业发展存在的问题,事实上,这种耦合关系可能一定程度上与海水养殖业发展阶段也是相适应的。若将海水养殖业发展划分为起步、增长、转型和成熟四个阶段,则在起步期由于生产方式较为原始,海水养殖业创造经济效益和改变环境的能力都较低,从长期来看净碳

表5 2009—2016年沿海省份海水养殖净碳汇与海水养殖经济耦合关系

Table 5 Coupling relationship between net carbon sink of mariculture and its growth of different provinces from 2009 to 2016

		2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
辽宁	ε	-2.531	2.513	0.355	0.836	2.014	4.994	-0.762	-12.105
	状态	强断裂	扩张负	弱负断裂	增长耦合	扩张负	扩张负	强负断裂	强负断裂
江苏	ε	-22.848	2.991	-0.689	2.257	-0.404	-99.458	10.457	-2.233
	状态	扩张负	衰退断裂	强负断裂	扩张负	强断裂	强断裂	衰退断裂	强断裂
浙江	ε	2.650	0.328	0.298	0.053	-12.127	-5.239	-16.843	-0.981
	状态	衰退断裂	弱断裂	弱负断裂	弱断裂	强断裂	强断裂	强负断裂	强负断裂
福建	ε	4.701	0.375	-0.384	-0.402	-0.260	0.326	-1.679	0.003
	状态	衰退断裂	弱断裂	强负断裂	强断裂	强断裂	弱断裂	强断裂	弱断裂
山东	ε	0.502	0.451	0.184	-0.384	-1.763	4.866	-5.044	-2.730
	状态	弱断裂	弱断裂	弱负断裂	强断裂	强断裂	扩张负	强负断裂	强负断裂
广东	ε	-14.782	0.174	-0.097	0.000	-45.383	-0.384	-1.135	1.003
	状态	强负断裂	弱断裂	强负断裂	弱断裂	强负断裂	强断裂	强断裂	增长耦合
广西	ε	0.784	2.454	-0.709	-0.135	0.434	0.925	4.896	0.732
	状态	弱断裂	扩张负	强负断裂	强断裂	弱负断裂	增长耦合	扩张负	弱断裂

注:“状态”指净碳汇与经济的耦合状态。

2019年2月

汇与经济保持同步耦合发展;在增长期,通过扩大要素投入促进海水养殖经济迅速增长的同时,碳排放量增加进而导致净碳汇减少或缓慢增加,净碳汇与经济保持非同步断裂关系;而当海水养殖业经济发展到一定水平,要素边际产出递减与环境恶化共同驱动养殖生产方式转型,转型对环境外部性带来的改善可能是即期的,而由于生态补偿制度、碳汇交易机制等制度机制不完备,生产方式转型对经济效益的提升可能是滞后的,因此在转型期净碳汇与经济增长倾向于保持非同步负断裂关系;当产业进入成熟期,海水养殖经济效益与环境效益达成长期的同步耦合发展。从这个角度来看,根据本文研究结论,全国总体海水养殖业可能已从“侧重经济”的第二阶段迈入了“侧重环境”的第三阶段,辽宁、山东亦进入了海水养殖业的转型阶段,福建、浙江、江苏海水养殖业则尚处于侧重经济效益的增长阶段,广东、广西所处的发展阶段则需要结合产业技术效率等其他指标进行进一步判断。

目前,渔业经济及海洋经济增长阶段多通过判别全要素生产率或要素贡献的变化拐点来进行划分,多数研究仍从经济增长视角对产业发展情况进行评判;尽管已有学者采用考虑了污染、能耗的绿色全要素生产率替代一般全要素生产率,但环境因素在效率评价及阶段划分中始终仅起次要作用,且绿色全要素生产率的测算中也甚少考虑海洋及渔业碳汇的积极作用。海洋及渔业经济以资源、生态、环境为重要依托,产业经济发展与资源、生态、环境之间存在紧密的协同关系与反馈机制,因此未来在进一步探讨海水养殖业、渔业经济、海洋经济转型轨迹与优化发展时,“净环境外部性与经济效益耦合增长”或可成为一个新研究视角或思路。

4 结论与对策

4.1 结论

(1)在碳汇干物质质量核算方法的基础上,考虑海水养殖过程中的碳排放,估算2008—2016年全国及沿海地区海水养殖业净碳汇。①从全国范围来看,海水养殖业每年均能够对大气环境产生正的外部性,2008—2016年每年净碳汇保持在43万~49万t,贝类养殖是海水养殖业碳汇的主要贡献者,全国海水养殖总碳汇量的增长与贝类养殖固碳量的增长趋势相吻合,而陆基养殖规模则是限制净碳汇持续

扩张的主要因素。②净碳汇在省际间则存在很大差异,根据是否产生正的净碳汇将沿海省(市)划分为两类,净碳汇为正的省份依次为广东、福建、山东、辽宁、广西、浙江和江苏,年均净碳汇量分别约为11.973、10.631、9.666、6.879、5.448、3.802、1.505万t,净碳汇为负的依次为河北、海南、天津,年均净碳汇量分别约为-2.616、-0.883、-0.789万t。其中,广东省在总碳汇量仅列全国第四的前提下获得了最多的净碳汇,这主要是得益于碳排放量较低,而总碳汇量位列全国前三位的山东、福建、辽宁则是典型的“高固—高排”模式,净碳汇量最低的河北则是“低固—高排”。

(2)以“净碳汇”替代“碳排放”作为环境指标加入Tapio脱钩指数模型,计算2009—2016年全国及沿海省份海水养殖净碳汇与海水养殖经济的耦合指数。①从全国范围看,目前海水养殖业环境效益与经济效益发展不同步,除在2010年短暂达到增长耦合状态外,其余年份均处于非同步状态,海水养殖业经济贡献与环境外部性发展不平衡,产业内部压力大;根据耦合状态可大致划分为两个阶段:2009—2014年非同步断裂时期,海水养殖业经济效益显著高于环境效益,这一时期中国海水养殖业仍处于数量化、规模化发展阶段,养殖方式、养殖结构及养殖效率均有待优化;2015—2016年进入非同步负断裂时期,海水养殖经济效益增加落后于环境效益提升,说明目前海洋生态文明建设初见成效,但尚缺少环境效益向经济效益转化的路径机制。②海水养殖业净碳汇扩张与经济增长的耦合程度存在很大省际差异,广东、广西净碳汇与经济的耦合指数基本围绕“增长耦合”区间来回波动,经济、环境效益接近平衡,产业发展较为健康;福建、浙江、江苏在多数年份中净碳汇与经济均处于非同步断裂关系,环境效益长期显著落后于经济效益,海水养殖业可持续性较差;辽宁在多数年份里净碳汇与经济为非同步负断裂关系,而山东则表现出明显的由非同步断裂转向非同步负断裂的趋势,辽宁、山东海水养殖业发展重心已向环境提升方面倾斜,未来需尽快搭建海水养殖业环境效益向经济效益转化的通路。

4.2 对策建议

为进一步推进中国海水养殖业经济、资源、环

境可持续协调发展,提出以下对策建议:

(1)在全国范围加快海水养殖业及海洋渔业经济新旧动能转换,实现从数量规模型向质量效益型经济增长模式的转型,不能单纯依靠生产要素的投入增加,而要以技术创新、结构创新和制度创新作为产业发展的新动力。

(2)对辽宁、山东、广东等海水养殖环境效益较高、净碳汇扩张相对速度明显快于经济效益的省份来说,加快渔业碳汇产权交易试点建设,以水产企业、渔民合作社及个体渔户为申报单位申请渔业碳汇产权认证,尽快建立健全中国渔业碳汇交易方法与碳交易市场进入机制,开通大型养殖企业参与清洁管理机制(CDM)项目,同时鼓励养殖户经由中间商或合作社代理的方式参与渔业碳汇交易。

(3)对福建、江苏、浙江、河北、海南等环境效益长期落后于经济效益的省份,进一步优化海水养殖生产方式转变与空间布局优化,提高海洋空间资源利用效率,大力发展深海养殖与立体化混合养殖,建立底播养殖、深海网箱等立体化养殖方式的用海审批便利通道,加强池塘养殖、工厂化养殖规模扩张的前期论证和审批管理,鼓励海洋牧场等生态养殖项目用海。

参考文献(References):

- [1] 郝多. 习近平: 坚决打好污染防治攻坚战推动生态文明建设迈上新台阶[EB/OL]. (2018-05-19)[2018-05-22]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2018-05/19/c_1122857595.htm. [Hao D. Xi Jinping: Resolutely fight a major battle against pollution and push ecological progress to a new level[EB/OL]. (2018-05-19)[2018-05-22]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2018-05/19/c_1122857595.htm.]
- [2] 唐启升. 碳汇渔业与又好又快发展现代渔业[J]. 江西水产科技, 2011, (2): 5-7. [Tang Q S. Carbon sink of fishery and developing modern fishery fast and well[J]. *Jiangxi Aquatic Science and Technology*, 2011, (2): 5-7.]
- [3] Smith S V. Marine macrophytes as a global carbon sink[J]. *Science*, 1981, 221(2): 838-840.
- [4] Alvera-Azcarate A, Ferreira J G, Nunes J P. Modelling eutrophication in mesotidal and macrotidal estuaries: The role of intertidal seaweeds[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(4): 715-724.
- [5] Mitra A, Zaman S, Pramanick P, et al. Stored carbon in dominant seaweeds of Indian Sundarbans[J]. *Tropic Agricultural Science*, 2014, 37(2): 263-275.
- [6] Landschuetzer P, Gruber N, Bakker D C E, et al. Recent variability of the global ocean carbon sink[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 28(9): 927-949.
- [7] Bakker D C E, Pfeil B, Olsen A, et al. Global data products help assess changes to ocean carbon sink[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 93(12): 125-126.
- [8] Dan A S, Moore P J, Queiros A M, et al. Appreciating interconnectivity between habitats is key to blue carbon management[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2018, 16(2): 71-73.
- [9] Zhou Y, Yang H, Zhang T, et al. Influence of filtering and biodeposition by the cultured scallop *Chlamys farreri* on benthic-pelagic coupling in a eutrophic bay in China[J]. *Marine Ecology Progress*, 2006, 317(8): 127-141.
- [10] 张继红, 方建刚, 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 J H, Fang J G, Tang Q S. The contribution of shellfish and seaweed in China to the carbon recycle of coastal ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 359-365.]
- [11] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 551-558. [Song J M, Li X G, Yuan H M, et al. Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae in China coastal seas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 551-558.]
- [12] 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. [Yue D D, Wang L M. Development analysis of shellfish aquaculture in the Yangtze River Delta Region based on the principle of direct carbon sinks accounting[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(8): 133-136.]
- [13] 纪建悦, 王萍萍. 我国海水养殖碳汇能力测度及其影响因素分解研究[J]. 海洋环境科学, 2015, 35(6): 871-878. [Ji J Y, Wang P P. Research on China's mariculture carbon sink capacity and influencing factors[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 36(6): 871-878.]
- [14] 林光纪. 我国发展低碳渔业的经济政策探析[J]. 中国水产, 2010, (9): 25-26. [Lin G J. Analysis on economic policies of low-carbon fishery development of China[J]. *China Aquatic*, 2010, (9): 25-26.]
- [15] 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 68-73. [Tang Q S, Liu H. Strategy for carbon sink and its amplification in marine fisheries[J]. *China Engineering Science*, 2016, 18(3): 68-73.]
- [16] 孙吉亭, 赵玉杰. 我国碳汇渔业发展模式研究[J]. 东岳论丛, 2011, 32(8): 150-155. [Sun J T, Zhao Y J. Developing patterns of fishery carbon sink of China[J]. *Dong Yue Tribune*, 2011, 32(8): 150-155.]
- [17] 邵桂兰, 阮文婧. 我国碳汇渔业发展对策研究[J]. 中国渔业经济, 2012, 30(4): 45-52. [Shao G L, Ruan W J. Developing advice of fishery carbon sink of China[J]. *Fishery Economics of China*, 2012, 30(4): 45-52.]

2019年2月

- 2012, 30(4): 45–52.]
- [18] 邵桂兰, 任肖娣, 李晨. 基于B-S期权定价模型的碳汇渔业价值评估[J]. 中国渔业经济, 2017, 35(5): 76–82. [Shao G L, Ren X C, Li C. Evaluation of carbon sink fishery based on B-S option pricing model[J]. *Fishery Economics of China*, 2017, 35(5): 76–82.]
- [19] 沈金生, 梁瑞芳. 海洋牧场蓝色碳汇定价研究[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1812–1821. [Shen J S, Liang R F. Study on the blue carbon sink pricing of marine ranch[J]. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1812–1821.]
- [20] 于梦璇, 田天, 马云瑞. 浅析碳汇渔业所需的碳交易市场规模[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(7): 88–93. [Yu M X, Tian T, Ma Y R. On the scale of carbon exchange market needed to develop carbon sink fishery[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(7): 88–93.]
- [21] 王泽宇, 卢雪凤, 韩增林, 等. 中国海洋经济增长与资源消耗的脱钩分析及回弹效应分析[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1658–1669. [Wang Z Y, Lu X F, Han Z L, et al. Decoupling analysis and rebound effect between China's marine economic growth and resource consumption[J]. *Resources Science*, 2017, 39(9): 1658–1669.]
- [22] 李晨, 迟萍, 邵桂兰. 我国远洋渔业碳排放与行业经济增长的相应关系研究[J]. 科技管理研究, 2016, 36(6): 233–237. [Li C, Chi P, Shao G L. Research on the responsive relationship between China's deep-sea fishery carbon emissions and industry economic growth[J]. *Science and Technology Management Research*, 2016, 36(6): 233–237.]
- [23] 岳冬冬, 王鲁民. 中国低碳渔业发展路径与阶段划分研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2012, (5): 15–21. [Yue D D, Wang L M. Development path and stages of low carbon fishery in China[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2012, (5): 15–21.]
- [24] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1298–1309. [Tian Y, Zhang J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1298–1309.]
- [25] 杨果, 陈瑶. 中国农业源碳汇估算及其与农业经济发展的耦合分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 171–176. [Yang G, Chen Y. China's agriculture carbon sink estimation and its coupling relationship with agricultural economy development[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(12): 171–176.]
- [26] 王劼, 朱朝枝. 农业碳排放的影响因素分解与脱钩效应的国际比较[J]. 统计与决策, 2018, (11): 104–108. [Wang J, Zhu Z Z. Driving factors of agricultural CO₂ emission and international comparison of decoupling index[J]. *Statistics and Decision*, 2018, (11): 104–108.]
- [27] 李鹏, 陈建成. 森林碳汇与经济增长的长期均衡及短期动态关系研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1835–1845. [Li P, Chen J C. Research on the long-term and short-term dynamic relationship between carbon forestry development and economic growth-based on the provincial panel data of China in 1998–2010[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(11): 1835–1845.]
- [28] 李虹, 刘凌云. 碳汇杠杆效应下有效经济增长与碳排放关系研究[J]. 科技管理研究, 2016, 36(18): 237–243. [Li H, Liu L Y. Analysis of effective economic growth and carbon emission under the effect of carbon sink leverage[J]. *Science and Technology Management Research*, 2016, 36(18): 237–243.]
- [29] 徐皓, 张祝利, 刘晃, 等. 我国渔业节能减排研究与发展建议[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 472–480. [Xu H, Zhang Z L, Liu H, et al. The research and development proposals on fishery energy saving and emission reduction in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(3): 472–480.]
- [30] 程会强, 陈豹. 基于脱钩理论的安徽经济增长与碳排放动态分析[J]. 西部论坛, 2013, 23(4): 91–97. [Cheng H Q, Chen B. Dynamic analysis of economic growth and carbon emission in Anhui Province based on decoupling theory[J]. *West Forum*, 2013, 23(4): 91–97.]
- [31] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in EU and the case of road traffic in Finland between 1970–2001[J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137–151.
- [32] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009–2017. [Bureau of Fishery and Fishery Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of People's Republic of China. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009–2017.]
- [33] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009–2017. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009–2017.]
- [34] Flynn K J. Nitrogen metabolism: A biochemical basis for modeling the interactions between nitrate and ammonium up take[J]. *Journal of Plankton Research*, 1991, 13(2): 373–387.
- [35] 周毅, 杨红生, 刘石林, 等. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成、有机净生产量及其生态效应[J]. 水产学报, 2002, 26(1): 21–27. [Zhou Y, Yang H S, Liu S L, et al. Chemical composition and net organic production of cultivated and fouling organisms in Sishili Bay and their ecological effects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(1): 21–27.]
- [36] Gao K S, Mckinley K. Use of macro algae for marine biomass production and CO₂ remediation: A review[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1994, 6(1): 45–60.
- [37] Eggleston S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [38] 农业农村部. 国内机动渔船油价补助用油量测算参考标准([2010]1号)[EB/OL]. (2010–01–06)[2018–04–02]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YJJ/201006/t20100606_1538704.htm. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Domestic mechanized fishing vessel oil price subsidy oil quantity calculation reference standard ([2010]1 No.) [EB/OL]. (2010–01–06) [2018–04–02]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YJJ/201006/t20100606_1538704.htm.]

lic of China. Reference Standard for the Measurement of Oil Price Subsidy of Domestic Motor Fishing Vessel([2010] NO.1) [EB/OL]. (2010-01-06)[2018-04-02]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201006/t20100606_1538704.htm.]

[39] 国务院. 关于促进海洋渔业持续健康发展的各项意见([2013]11

号)[EB/OL]. (2013-06-25)[2018-04-19]. http://www.gov.cn/zwgg/2013-06/25/content_2433577.htm. [The State Council. Instructions on Promoting the Sustainable and Healthy Development of Marine Fishery([2013] NO.11)[EB/OL]. (2013-06-25)[2018-04-19]. http://www.gov.cn/zwgg/2013-06/25/content_2433577.htm.]

Net amount of mariculture carbon sink and its coupling relationship with economics growth of China

SHAO Guilan¹, KONG Haizheng¹, LI Chen^{1,2}

(1. School of Economics, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Marine Development Studies Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the estimation of the net mariculture carbon sink and the coupling index between carbon sink and economics, this study discussed the coordination between economic and environmental performance of mariculture in China. By using of both national and provincial data from 2008 to 2016 of China, this study came to the conclusions as following: although the net amount of mariculture carbon sink nationwide remained between 430 to 490 thousand tons per year, the environmental and economic performance got out of sync. Each year during 2009-2014 was in either strongly or weakly decoupling status except for 2010 when it came to increasingly coupling, which means that the growth of mariculture of China still relied on scale expansion in this period. Negatively decoupling relationship appeared from 2015 to 2016, which means that an efficient market mechanism was needed to transfer ecological profit into monetary revenue despite the preliminary achievements of the strategy of Marine Ecological Culture. Results differed between provinces. The net carbon sink kept negative in Hebei, Hainan, and Tianjin from 2009-2016. Guangdong, Fujian, Shandong, and Liaoning have made the greatest contribution to the net carbon sink. The majority of years showed decoupling in Fujian, Zhejiang, and Jiangsu, meaning the economic subsystem outbalanced environmental subsystem of mariculture in these provinces. The relationship between net carbon sink and mariculture increase did show a negatively decoupling trend, revealing the environmental subsystem preceded economic subsystem in these two provinces. The mariculture systems were basically balanced in Guangdong and Guangxi. Therefore, the key points of healthy development of marine fishery of China are to accelerate the conversion of the driving power of growth, to build a carbon sink market for marine fishery, and to optimize the allocation of marine spatial and producing resources.

Key words: mariculture; net amount of carbon sink; environmental benefits; economic benefits; coupling relationship; China