

海洋渔业碳汇及其扩增战略

唐启升, 刘慧

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东青岛, 266071)

摘要: 本文介绍了海洋渔业碳汇和碳汇渔业的定义、研究现状、问题及技术需求。与林业碳汇比较结果表明, 海洋渔业碳汇不仅有高效的特性, 还有扩增的潜质。为此, 提出海洋渔业碳汇扩增对策建议, 主要包括: 查明我国海洋渔业碳汇潜力及动态机制; 大力发展以海水养殖为主体的碳汇渔业; 加强近海自然碳汇及其环境的养护和管理; 实施相应的渔业碳汇扩增工程建设, 促进环境友好型水产养殖业发展。

关键词: 海洋渔业碳汇; 碳汇渔业; 碳汇扩增; 养护和管理; 贝藻养殖

中图分类号: S931 **文献标识码:** A

Strategy for Carbon Sink and Its Amplification in Marine Fisheries

Tang Qisheng, Liu Hui

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: The concepts of the marine fisheries carbon sink and carbon sink fisheries current state of research, main problems, technological needs are introduced in this paper. Compared to forestry carbon sequestration, marine fisheries carbon sink is characterized by both high efficiency and scale-up potential. Therefore, the strategy and measures for scaling up marine fisheries carbon sink are proposed, including: investigating the potential and mechanisms for marine fisheries carbon sink; vigorously developing carbon sink fisheries of which the principal part is aquaculture; strengthening the conservation and management of natural carbon sink and environment of China's seas; implementing fisheries carbon sink amplification project construction, and promoting the development of environmentally friendly aquaculture industry.

Key words: marine fisheries carbon sink; carbon sink fisheries; carbon sink amplification; conservation and management; bivalve and seaweed aquaculture

一、前言

生物固碳是安全高效、经济可行的固碳途径与固碳工程。除森林、草地、沼泽等陆地生态系统外,

海洋生物的固碳也已经引起全世界的普遍关注, 海洋碳不仅通过调控和吸收直接影响全球碳循环, 还以其巨大的碳汇功能吸收了人类排放 CO₂ 总量的 20%~35%, 大约为 2×10^9 t, 有效延缓了温室气体

收稿日期: 2016-04-21; 修回日期: 2016-05-12

作者简介: 唐启升, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 研究员, 中国工程院院士, 研究方向为海洋渔业与生态;

E-mail: tangqs@public.qd.sd.cn

基金项目: 中国工程院重点咨询项目“水产养殖业十三五规划战略研究”(2014-XZ-19-3)

本文由《生物碳汇扩增战略研究: 海洋生物碳汇扩增》改写^[1], 联系人: 刘慧

本刊网址: www.enginsci.cn

排放对全球气候的影响^[2-4]。根据联合国环境规划署《蓝碳》报告^[5]，海洋生物（包括浮游生物、细菌、海藻、盐沼和红树林等）固定了全球 55% 的碳。海洋植物（海草、海藻、红树林等）的固碳能力极强、效率极高，其生物量虽然只有陆生植物的 0.05%，但两者的碳储量不相上下。海洋生物固碳构成了碳捕集和移出通道，使生物碳可长期储存、最高达上千年，故海洋生物碳也被称之为“蓝碳”或“蓝色碳汇”。

海洋渔业碳汇是海洋生物“蓝色碳汇”的重要组成部分。根据碳汇的定义^[6]以及生物固碳的特点，可以将渔业碳汇定义为：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^[7]。通过这个过程和机制，其结果是更好地发挥了渔业生物的碳汇功能，从而提高了水域生态系统吸收大气 CO₂ 的能力。基于这种考虑，渔业碳汇实质上是海水和淡水生态系统中“可移出的碳汇”和“可产业化的蓝碳”。相应的，考虑到部分渔业产业所具有的碳汇功能，我们把具有碳汇功能、可直接或间接降低大气 CO₂ 浓度的渔业生产活动泛称为“碳汇渔业”，具体包括：藻类养殖、贝类养殖、滤食性鱼类养殖、增殖渔业、海洋牧场以及捕捞渔业等生产活动。

因此，海洋碳汇渔业被视为最具扩增潜质的碳汇活动。通过实施养护、拓展和强化等管理措施，并与养护、恢复和提升自然海域蓝色固碳能力相结合，大力发展健康、生态、可持续的碳汇渔业新生产模式，中国的海洋渔业和水产养殖业有望实现 $4.6 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的蓝色固碳量，约相当于每年 10% 的碳减排量^[5,7]。同时，碳汇渔业也是绿色、低碳发展新理念在渔业领域的具体体现，能够更好地彰显生态系统的气候调节、净化水质和食物供给等服务功能，大力发展碳汇渔业不仅对减缓全球气候变化做出积极贡献，同时对于食物安全、水资源和生物多样性保护、增加就业和渔民增收都具有重要的现实意义。

二、渔业碳汇研究现状

渔业碳汇既包括养殖贝类通过滤食、藻类通过光合作用从海水中吸收碳元素的“固碳”过程，也包括以浮游生物、藻类和贝类为食的捕捞种类（如

鱼类、头足类、甲壳类和棘皮动物等）通过摄食和生长所利用的碳。凡不需投放饵料的渔业生产活动就具有碳汇功能，属于碳汇渔业。迄今为止，海洋渔业还很少作为碳汇产业而受到关注。

（一）海水贝藻养殖具有高效“固碳”作用

藻类等海洋植物是公认的高效固碳生物：通过光合作用直接吸收海水中的 CO₂，从而增加了海洋的碳汇，促进并加速了大气中的 CO₂ 向海水中扩散，有利于减少大气中的 CO₂。贝类在养殖生长过程中大量滤食水中浮游植物等，已起到减排作用，贝类在外壳形成过程中，直接吸收海水中的碳酸氢根 (HCO₃⁻) 形成碳酸钙 (CaCO₃)，每形成 1 mol 碳酸钙即可固定 1 mol 碳^[8]。如图 1 的研究成果所示，一个扇贝在一个生长周期中所使用的水体中的碳，有 30% 通过收获被移出水体，40% 沉至海底（大部分被封存在海底）。另外，据测算山东桑沟湾养殖扇贝的固碳速率为 $3.36 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[10]，不仅明显高于自然水域蓝碳生物的固碳速率^[5]，同时，也高于我国 50 年来人工林平均固碳率 ($1.9 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$)^[11]，达到或略高于欧盟、美国、日本、新西兰等发达国家单位面积森林生物量中碳储量的年变化上限 ($-0.25 \sim 2.60 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$)^[12]。可见，海水贝藻养殖“固碳”作用是高效的，碳汇功能显著。据计算，1999—2008 年我国海水养殖贝藻类的总产量为 $8.96 \times 10^6 \sim 1.351 \times 10^7 \text{ t}$ ，平均年固碳量为 $3.79 \times 10^6 \text{ t}$ ，其中 $1.2 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{C}$ 从海水中移出（未计海底封存部分）^[13]。按照林业碳汇的计量方法^[14]，我国海水贝藻养殖对减少大气 CO₂ 的贡献相当于每年义务造林 $5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，10 年合计相当于造林 $5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。2014 年我国海水养殖贝类和藻类产量分别为 $1.317 \times 10^7 \text{ t}$ 和 $2 \times 10^6 \text{ t}$ ，贝藻养殖的固碳量约为 $5.31 \times 10^6 \text{ t}$ ，移出的碳 $1.68 \times 10^6 \text{ t}$ （贝类 $1.17 \times 10^6 \text{ t}$ 、藻类 $5.1 \times 10^5 \text{ t}$ ），比 2008 年增加了约 38%。表 1 的研究结果表明，不同养殖模式的生态系统服务价值有明显差异，即碳汇效率是不同的。可见，不论是整体还是单位面积内贝藻养殖碳汇仍有扩增的可能。

（二）其他具有碳汇功能的渔业产业

如前所述，渔业碳汇不仅包括处于食物网较低营养级的贝藻养殖等使用的碳，同时还包括某些生物资源种类通过摄食和生长活动所使用的碳。这

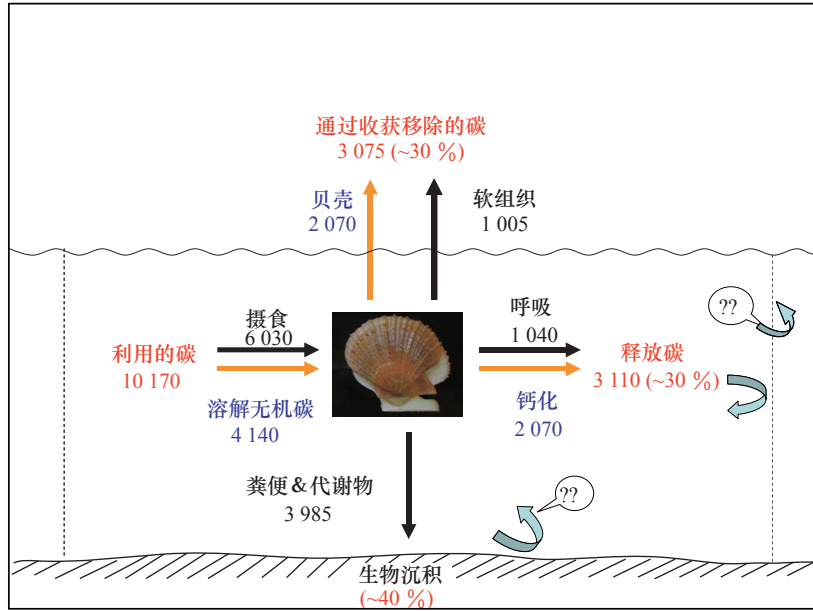


图1 栉孔扇贝一个生长周期的碳收支 (单位: $\text{mg C} \cdot (\text{个} \cdot 500 \text{ d})^{-1}$)^[9]

表1 不同养殖模式的生态系统服务价值评估比较^[15]

养殖模式	食物供给服务价值 ($\text{CNY} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$)	气候调节服务价值 ($\text{CNY} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$)
海带单养	49 219	4 859
鲍单养	235 409	8 215
鲍-海带综合养殖	325 553	13 591
鲍-参-藻综合养殖	483 918	13 833

些较高营养级的海洋动物以天然饵料为食，捕食和利用了较低营养级的浮游植物、贝类和藻类等。通过捕捞和收获，这些动物被移出水体，实质上是从水域中移出了相当量的碳。Pershing 等认为重建鲸群和大鱼的种群应该是提高海洋碳汇功能的有效方法，其效果甚至可以等同于一些为应对气候变暖采取的措施，如造林以增加初级生产力等；Pershing 还建议参考森林碳汇的算法来计算捕捞生物种群的储碳量，从而实现渔业碳汇的标准计量，以便将捕捞配额作为碳信用出售^[16]。因此，捕捞渔业等其他渔业活动的碳汇及扩增也是值得关注的部分。

三、渔业碳汇扩增面临的主要问题

(一) 渔业碳汇计量方法有待建立

海洋碳循环是全球碳通量变化的核心，而研究海洋碳循环的基础是准确测定各项参数。联合国教科文组织政府间海洋学委员会和国际海洋研究科学

委员会专门委员会海洋碳顾问组认为：准确测定四个参数（pH、碱度、溶解有机碳、 CO_2 分压）是确定海洋碳汇的关键，测定海洋碳源汇的物理和生物地球化学常规方法包括：箱式模型法、环流模式（GCMS）、现场溶解有机碳及其 ^{13}C 测量、大气时间序列 O_2/N_2 和 ^{13}C 计算、全球海气界面碳通量集成等^[17]。Chen 等利用碳通量法证明陆架海是巨大的碳汇，且植物群落的固碳作用十分重要^[18]。

渔业碳汇的计量和监测目前还处于初步尝试阶段，主要沿用了能量生态学和箱式生态模型等方法^[10,19-21]，尚缺乏精准的渔业碳汇计量监测技术。

(二) 过度捕捞与发展碳汇渔业的矛盾

据估算，1980—2000年渤海捕捞业的年固碳量是 $2.83 \times 10^6 \sim 1.008 \times 10^7 \text{ t}$ ，黄海捕捞业的年固碳量是 $3.61 \times 10^6 \sim 2.613 \times 10^7 \text{ t}$ ^[22]。这些碳主要是由浮游植物固定并转化为捕捞种类的生物量。因此，捕捞产量提高意味着从海洋生态系统移出的碳量增加

了。但是, 渔业资源的过度捕捞使渔业碳汇的功能被削弱了; 其结果是黄海和渤海捕捞业的年固碳量分别减少了 23 % 和 27 %。与此同时, 资源量下降导致封存于水体和海底的碳减少, 也不利于捕捞业发挥可持续的碳汇功能。

过度捕捞使海洋生态系统的营养级下降、食物链缩短、食物网结构趋于简单、渔业捕捞种类的个体小型化, 从而减少捕捞渔业对海洋碳汇的贡献。要增加海洋生物碳汇、尤其是捕捞渔业相关的碳汇, 就需要严格控制过度捕捞。

四、扩增渔业碳汇的关键技术需求

要发展和扩增渔业碳汇, 首先应从提升渔业的产出效率入手, 发展新生产模式, 主要的技术需求如下。

(一) 多营养层次综合养殖技术

贝藻养殖和多营养层次的综合养殖是应对多重压力胁迫下近海生态系统显著变化、维护近海渔业碳汇的有效途径。这些生态友好型养殖方式不仅能促进生态系统的高效产出, 而且能最大限度地挖掘生态系统的气候调节服务。因此, 应继续大力发展健康、生态、多营养层次的综合养殖等碳汇渔业技术, 不断优化其模式, 系统而深入地研究其碳汇功能和机制。

(二) 海草床栽培和养护技术

在全球海洋生态系统中, 海草以不足 0.2 % 的分布面积, 占到了全球海洋每年碳埋藏总量的 10 %~18 %, 而海草床又是渔业生物的关键生态环境, 承载着产卵场、育幼场、索饵场等多重生态功能。因此, 海草床在海洋固碳的地位是非常重要的。鉴于目前世界范围内海草床快速消失的状况, 研发海草床保护、移植、种植和修复技术将对渔业碳汇扩增发挥重要作用。

(三) 陆基和浅海集约化高效养殖技术

发展陆基工厂化循环水和池塘循环水养殖, 是我国水产养殖业升级改造的重要发展方向。通过水体循环利用、集约增效和养殖废物的集中收集和处

理, 可以进一步促进养殖业节能减排、生态高效, 从而进一步推动渔业碳汇扩增。2014 年, 我国海水养殖总面积 $2.31 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 其中工厂化养殖面积占 0.13 %, 而产量则占海水养殖总产量的 0.94 %; 其中循环水养殖所占比例还不到 50 %^[23]。这说明循环水养殖有很大的发展空间。

(四) 深远海养殖设施和技术

拓展贝藻等不投饵种类的养殖空间、发展深水养殖是渔业碳汇扩增不可忽视的一个方面, 但突破工程装备与技术是关键。以我国深水网箱为例, 经过近 10 年的发展, 2014 年产量仅占海水养殖总产量的 0.62 %, 占网箱养殖总产量的 17 %^[23]。制约深水养殖发展的关键仍然是工程装备不过硬, 无法支撑长时间、高海况条件的需要。另外, 由于缺少高效、耐用的深水养殖配套装备, 如吊装机、清洗机、收获机械等, 深水养殖风险高、劳动强度大的问题尚未根本解决。急需发展相关的深水装备技术以及新生产工艺。

五、对策建议

(一) 查明我国海洋渔业碳汇潜力及动态机制

为全面了解我国海洋渔业碳汇潜力, 需要建立海洋生物碳汇与渔业碳汇计量和评估技术, 建立系统的近海生态系统碳通量与渔业碳汇监测体系和观测台站。同时, 应加强基础科学研究, 整合生态学和生物地球化学研究手段, 完善现有海洋碳通量模型, 研究主要海洋生物碳通量和固碳机理, 评估我国海洋渔业生物碳源汇特征及其动态, 对不同渔业类型碳汇进行比较, 建立渔业碳源汇收支模型, 减少碳汇估算的不确定性。

(二) 不断探索渔业碳汇扩增的新途径

(1) 大力发展以海水养殖为主体的碳汇渔业。中国的水产养殖业是以贝藻养殖为主体的碳汇型渔业。这种不投饵型、低营养级的渔业不但在水产品供给、食物安全保障等方面具有重要作用, 而且在改善水域生态环境、缓解全球温室效应等方面具有积极意义, 其生态、社会和经济效益非常显著。为此, 国家需从战略高度规划和支持海水养殖业发展, 扩增渔业碳汇。主要包括: 大力发展健康、生态、环境友好型水产养殖, 着力推进海洋生态牧场建设,

降低捕捞强度、扩大增殖渔业规模，从而增加海洋渔业碳汇的储量。

(2) 加强近海自然碳汇及其生态环境的养护和管理。红树林、珊瑚礁、盐沼和天然海藻(草)床是海洋碳汇的重要组成部分，应采取有效措施，对现存的海洋植物区系进行养护。开展海藻、海草、珊瑚的移植和种植，仍然是恢复和扩增海洋蓝色碳汇的重要手段之一。但是，全世界目前在海藻床移植和重建方面仍有很多技术问题没有解决。因此，建设人工海藻床，加强养护和管理，恢复海洋生态系统服务功能，扩增蓝色碳汇，是十分必要的。

(三) 实施渔业碳汇扩增工程建设

(1) 碳汇渔业关键技术与产业示范工程。需要端正认识，强力推动以海水增养殖为主体的碳汇渔业的发展，充分发挥渔业生物的碳汇功能，为发展绿色、低碳的新兴产业提供示范。建议加强五个方面的建设：海水增养殖良种工程，生态健康增养殖工程，安全绿色饲料工程，养殖设施与装备工程以及产品精深加工技术与装备等，其中重点是大力发展多营养层次综合养殖和深水增养殖技术。

(2) 规模化海洋“森林草地”工程建设与管理。需要大力开展意在提升我国近海自然碳汇功能的公益性工程建设，包括浅海海藻(草)床建设、深水大型藻类种养殖以及生物质能源新材料开发利用等，进一步加强海洋自然碳汇生物的养护和管理。

参考文献

- [1] 唐启升, 刘慧, 方建光, 等. 生物碳汇扩增战略研究: 海洋生物碳汇扩增[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Tang Q S, Liu H, Fang J G, et al. Strategic studies on the amplification of biological carbon sink: amplification of ocean biological carbon sink [M]. Beijing: Science Press; 2015.
- [2] Khaliwala S, Primeau F, Hall T. Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean [J]. Nature. 2009; 462: 346–349.
- [3] Laffoley D, Grimsditch G. The management of natural coastal carbon sinks [M]. IUCN:Gland; 2009.
- [4] Hood M, Broadgate W, Urban E, et al. Ocean acidification—a summary for policymakers from the second symposium on the ocean in a High-CO₂ World [C]. IOC; 2009.
- [5] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. A rapid response assessment [M]. Nairobi: United Nations Environment Programme, GRID-Arendal; 2009.
- [6] IPCC. IPCC fourth assessment report-AR4-climate change 2007 [M]. Geneva: The Physical Science Basis; 2007.
- [7] 唐启升. 碳汇渔业与海水养殖业[EB/OL]. 2010-06-28 [2016-04-20]. <http://www.ysfri.ac.cn/Newshow.asp-showid=1829&signid=16.htm>.
Tang Q S. Carbon sink fisheries and mariculture [EB/OL]. 2010 06-28 [2016-04-20]. <http://www.ysfri.ac.cn/Newshow.asp-showid=1829&signid=16.htm>.
- [8] Chauvaud L, Thompson K J, Cloern J E, et al. Clams as CO₂ generators: The *Potamocorbula amurensis* example in San Francisco Bay [J]. Limnol Oceanogr. 2003; 48(6): 2086–2092.
- [9] 唐启升, 方建光, 张继红, 等. 多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 1–11.
Tang Q S, Fang J G, Zhang J H, et al. Impacts of multiple stressors on coastal ocean ecosystems and Integrated Multi-trophic Aquaculture [J]. Progr Fish Sci. 2013; 34 (1): 1–11.
- [10] 张继红, 方建光, 唐启升, 等. 桑沟湾不同区域养殖栉孔扇贝的固碳速率 [J]. 渔业科学进展, 2013, 34 (1): 12–16.
Zhang J H, Fang J G, Tang Q S, et al. Carbon sequestration rate of the scallop *Chlamys farreri* cultivated in different areas of Sanggou Bay [J]. Progr Fish Sci. 2013; 34 (1): 12–16.
- [11] 魏殿生. 造林绿化与气候变化: 碳汇问题研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003.
Wei D S. Afforestation and climate change: a study of carbon sequestration problem [M]. Beijing: China Forestry Publishing House; 2003.
- [12] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. “GPG-LULUCF” (- Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry) quantitative methods [EB/OL]. [2016-04-20]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- [13] Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems [J]. Mar Ecol Progr Ser. 2011; 424: 97–104.
- [14] 李恕云. 中国林业碳汇[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
Li S Y. China forest carbon sequestration [M]. Beijing: China Forestry Publishing House; 2007.
- [15] 刘红梅, 齐占会, 张继红, 等. 桑沟湾不同养殖模式下生态系统服务和价值评价[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
Liu H M, Qi Z H, Zhang J H, et al. Ecosystem service and value evaluation of different aquaculture mode in Sungo Bay [M]. Qingdao: China Ocean University Press; 2013.
- [16] Pershing A J, Christensen L B, Record N R, et al. The impact of whaling on the ocean carbon cycle: why bigger was better [J]. PLoS one. 2010; 5(8): 1–9.
- [17] 宋金明. 中国近海生物地球化学[M]. 济南: 山东科技出版社, 2004.
Song J M. China coastal ocean biogeochemistry [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press; 2004.
- [18] Chen C A, Borges A V. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂ [J]. Deep-Sea Res II. 2009; 56: 578–590.
- [19] 蒋增杰, 方建光, 韩婷婷, 等. 大型藻类规模化养殖水域海—气界面CO₂交换通量估算[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 50–56.
Jiang Z J, Fang J G, Han T T, et al. Estimation of sea-air CO₂ flux in seaweed aquaculture area, Lidao Bay [J]. Progr Fish Sci. 2013;

- 34 (1): 50–56.
- [20] 高亚平, 方建光, 唐望, 等. 桑沟湾大叶藻海草床生态系统碳汇扩增力的估算[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 17–21.
Gao Y P, Fang J G, Tang W, et al. Seagrass meadow carbon sink and amplification of the carbon sink for eelgrass bed in Sanggou Bay [J]. *Progr Fish Sci.* 2013; 34 (1): 17–21.
- [21] 李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析[J]. 渔业科学进展, 2013, 34 (1): 65–69.
Li J, Guang C T, Gong P H, et al. Preliminary analysis of carbon sink mechanism and potential of artificial reef ecosystem [J]. *Progr Fish Sci.* 2013; 34 (1): 65–69.
- [22] 张波, 孙珊, 唐启升. 海洋捕捞业的碳汇功能[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 70–74.
Zhang B, Sun S, Tang Q S. Carbon sink by marine fishing industry [J]. *Progr Fish Sci.* 2013; 34 (1): 70–74.
- [23] 农业部渔业渔政管理局. 2015年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Fisheries Bureau, Ministry of Agriculture. 2015 China fisheries statistic year book [M]. Beijing: China Agriculture Press; 2015.