

海洋捕捞业的碳汇功能

张波 孙珊 唐启升*

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 碳汇渔业实验室, 青岛 266071)

摘要 海洋捕捞业是碳汇渔业之一,人类通过收获渔获物将食物链/网传递的海洋植物光合作用固定的碳移出水体,在海洋碳汇中发挥着重要的作用。根据对海洋捕捞业碳汇功能的评估方法,得出1980~2000年间渤海捕捞业的年固碳量是283~1 008万t,黄海捕捞业的年固碳量是361~2 613万t。尽管加大捕捞产量增加了从海洋生态系统移出浮游植物的固碳量,但随着捕捞业的高速发展,其碳汇功能却被削弱了,黄渤海捕捞业的年固碳量最大分别减少了23%和27%。而且由于资源量的下降,封存于水体和海底的碳减少,不利于捕捞业发挥可持续的碳汇功能。渤海2009年增殖放流的中国对虾使捕捞业增加1.66万t的固碳量,因此,需要采取包括增殖放流在内的一些措施来恢复和增强海洋捕捞业的碳汇功能,最终形成资源养护型的捕捞业。

关键词 海洋捕捞业 碳汇 黄渤海 增殖放流

中图分类号 S97 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)01-0070-05

Carbon sink by marine fishing industry

ZHANG Bo SUN Shan TANG Qi-sheng*

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071)

ABSTRACT Marine fishing industry is one kind of fishery carbon sinks. The carbon, which is fixed by phytoplankton and transported through the food chain/web, is removed from the sea by harvesting. According to the evaluation of carbon sink by marine fishing industry, there were about 2.83~10.08 million tons and 3.61~26.13 million tons of carbon removed annually from the Bohai Sea and Yellow Sea respectively, during 1980~2000. Although carbon sink increased with fishing production, destruction of the marine ecosystem weakened the contribution of fishing to carbon sink. So, carbon sink by fishing in the Bohai Sea and Yellow Sea reduced 23% and 27%, respectively. At the same time, marine resources decline was a disadvantage to sustainability of carbon sink by fishing. However, by enhancement and release of *Fenneropenaeus orientalis*, fishing carbon sink in the Bohai Sea increased 1.66×10^4 tons in 2009. Hence, measures including enhancement and release should be taken to restore and improve carbon sink by marine fishing industry.

国家重点基础研究发展计划项目(2011CB409805)、国家自然科学基金项目(41076110)和公益性行业(农业)科研专项(200903005)共同资助

* 通讯作者。E-mail: tangqs@public.qd.sd.cn

收稿日期:2012-10-02;接受日期:2013-01-15

作者简介:张波(1971-),女,研究员,主要从事食物网及营养动力学研究。E-mail: zhangbo@ysfri.ac.cn

KEY WORDS Marine fishing industry Carbon sink Bohai Sea and Yellow Sea
Enhancement and release

碳汇是指从大气中清除温室气体、气溶胶或温室气体前体的任何过程、活动或机制。由于海洋动物的呼吸将光合作用固定的碳返回到大气中,从而被认为是减弱了海洋生物泵的效率;而且相对于浮游植物,海洋脊椎动物的丰度低,因此在大多数海洋生物地球化学循环模型中不包括海洋脊椎动物。但越来越多的研究表明海洋脊椎动物对海洋无机和有机碳的移动和储存都有贡献。如,蓝鲸 *Balaenoptera musculus* 90t 的生物量有 9t 的碳贮存在它的组织中,在它们一生中积累在身体中的碳完全移出了大气(Pershing *et al.* 2010)。Lavery 等(2010)发现南大洋 12 000 头抹香鲸 *Physeter macrocephalus* 群体扮演着碳汇的重要角色,从大气中转移的碳较呼吸释放的碳多 40 万 t,即从大气中净移出了 40 万 t 碳。Taylor 等(2006)发现南美河流中的一种丰度较大(占 50%~80%)的食腐殖质鱼种——绒口鱼 *Prochilodus mariae* 在调节河流碳降解和运输过程中起到了关键作用。Wilson 等(2009)估计全球鱼群制造的 CaCO_3 占全球海表面碳酸钙生产量的 3%~15%,这表明硬骨鱼类在全球无机碳循环中贡献了相当大量的无机碳。由此可见,海洋动物在海洋碳汇中的作用主要表现在两个方面:一方面通过自身的生理活动影响海洋中碳的运输和循环,另一方面在海洋中起着封存碳的作用。海洋动物封存的碳是通过生物泵的形式获得的,即海洋植物通过光合作用将海水中的二氧化碳从无机碳转化为有机碳,并通过食物链能量传递,一部分海洋生物被人类收获利用而实现“碳转移”;另一部分继续封存于水体中,以及随着生物代谢和死亡,形成颗粒碳沉积于海底(唐启升 2011)。现在,把能够发挥生物的碳汇功能,具有直接和间接降低大气二氧化碳浓度效果的渔业生产活动泛称为“碳汇渔业”(唐启升 2011)。海洋捕捞业的碳汇是碳汇渔业之一,属于通过生物泵固碳实现的“碳转移”的一部分,在海洋碳汇中发挥着重要的作用。

1 海洋捕捞业碳汇功能的评估方法

评估海洋捕捞业的碳汇功能就是计算渔获物通过食物链/网机制实现的生物固碳。由于渔获物在实现生物固碳的同时其自身生理代谢又是一个不断放出二氧化碳的过程,估算每一个渔获物种类的固碳量需要一个非常复杂的计算过程(Pershing *et al.* 2010; Lavery *et al.* 2010)。再加之海洋生态系统生物种类的多样性和食物关系的错综复杂,很难针对每一个种类、每一条食物链逐一计算整个海洋捕捞业的固碳量。因此,为了使估算简化实用,将生物个体的生理代谢过程和整个食物链/网作为一个黑箱,根据各营养阶层间的生态转换效率,从人类最终收获的渔获量来反推各营养阶层生物的被捕食量和摄食浮游植物的量,从而估算被摄食植物的固碳量(图 1)。

首先需要估算顶级捕食者(即渔获物)摄食下一营养阶层生物的生物量。20 世纪 80 年代以来,中国近海渔获物的平均营养级在 3~4 之间(Zhang *et al.* 2007),因此,需要通过两个层级的转换来估算平均营养级在 1~2 之间被捕食者的生物量(B_1),计算公式如下:

$$B_1 = Y_0 / (ECE_{(TL_0-1)} \times ECE_{(TL_0-2)})$$

式中, Y_0 是总渔获量, TL_0 是渔获物的平均营养级, ECE 是各营养阶层((TL_0-1) 和 (TL_0-2)) 的生态转换效率。

估算的第二步是需要确定摄食浮游植物和有机碎屑的生物量。首先根据营养级的计算公式($TL_i = 1 + \sum_{j=1}^n DC_{ij} TL_j$, 其中, TL_i 为生物 i 的营养级, TL_j 为生物 i 摄食的食物 j 的营养级, DC_{ij} 为食物 j 在生物 i 的食物中所占的比例),确定被捕食者中浮游植物和有机碎屑(营养级为 1) 以及初级消费者(营养级为 2) 的比例:

$$1 \times P + 2 \times (100\% - P) = TL_0 - 2$$

即: $P = 4 - TL_0$

式中, P 为摄食浮游植物和有机碎屑的比例。由此进一步估算摄食浮游植物和有机碎屑的生物量(B_0):

$$B_0 = (B_1 \times P) + B_1 \times (100\% - P) / ECE_{TL=1}$$

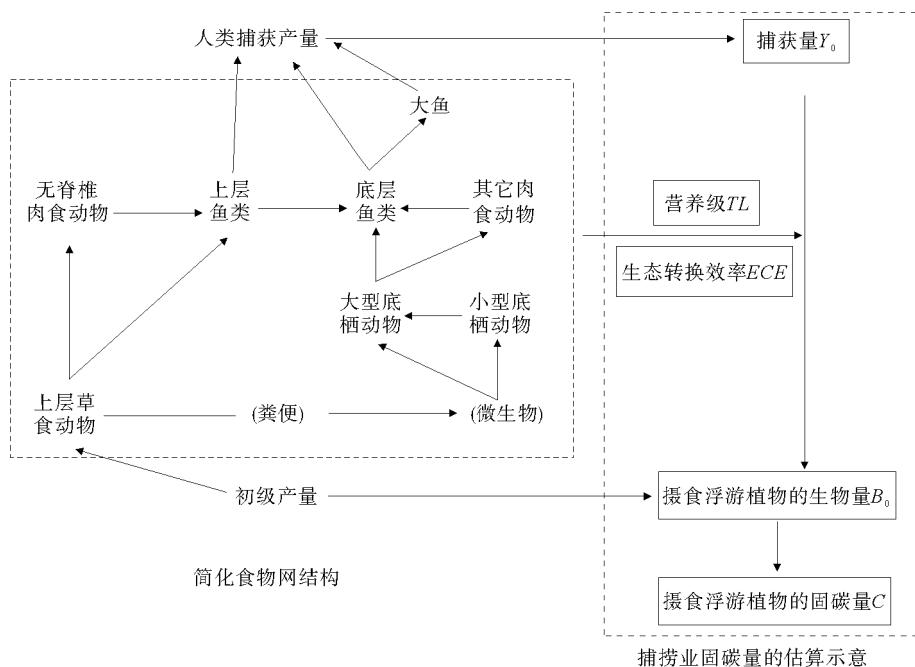


图1 简化食物网结构(引自唐启升 1999)及捕捞业固碳量的估算

Fig. 1 The simplified version of food web (cited from Tang 1999) and evaluation on carbon sink of fishing

式中, $ECE_{TL=1}$ 为初级消费者摄食浮游植物和有机碎屑的生态转换效率。

最后根据摄食的浮游植物和有机碎屑的生物量估算渔获物通过食物网机制的固碳量。海洋生态系统中的有机碎屑是浮游植物沉降、浮游动物和鱼类等海洋生物的粪球打包沉降、TEP(透明胞外聚合颗粒物)凝聚网形成海雪、以及死亡的生物体沉降等形式形成的,均来源于浮游植物光合作用产生的颗粒有机碳(孙 军 2011),因此,有机碎屑的固碳量等同于浮游植物的固碳量。按 10 种浮游植物碳含量的平均值 4.49% 估算摄食的浮游植物的现存碳含量(C_1),最后按浮游植物固碳量为浮游植物碳含量的 45 倍(孙 军等 1999)估算摄食的浮游植物的固碳量(C):

$$C_1 = 4.49\% \times B_0$$

$$C = 45 \times C_1$$

2 黄渤海捕捞业对海洋碳汇的贡献

根据上述方法,评估1980~2000年我国黄渤海捕捞业对海洋碳汇的贡献。首先对其中的两个重要参数——营养级和生态转换效率进行估算(表1)。根据Zhang等(2007)的研究结果,近年来我国各海域渔获物的平均营养级呈下降趋势,黄海渔获物的营养级每10年下降0.14,渤海每10年下降0.17。生态转换效率通常是采用林德曼效率或百分之十定律,即食物和能量沿食物链每向上传递一级就会损失90%,仅在上一级营养级保留10%。但用这个定律研究海洋生态系统的各营养阶层间转换效率并不准确,能量的转换效率是和不同营养阶层及特定物种密切相关的(Pauly *et al.*, 1998;孙 军 2011)。因此,本研究采用Tang等(2007)的公式来计算各营养阶层间的生态转换效率:

表1 黄渤海捕捞业碳汇功能评估中的部分参数

Table 1 Some parameters in evaluation of carbon sink by fishing in the Bohai Sea and Yellow Sea

年份 Year	渤海 Bohai Sea			黄海 Yellow Sea				
	TL_0	ECE_{TL_0-1}	ECE_{TL_0-2}	$ECE_{TL=1}$	TL_0	ECE_{TL_0-1}	ECE_{TL_0-2}	$ECE_{TL=1}$
1980	3.73	43.54%	59.16%	70.62%	3.68	44.39%	60.00%	70.62%
1990	3.56	46.20%	61.81%	70.62%	3.54	46.57%	62.19%	70.62%
2000	3.39	48.85%	64.47%	70.62%	3.40	48.76%	64.37%	70.62%

$$ECE = -15.615TL + 86.235$$

根据金显仕等(2006)统计的 1980~2000 年黄渤海渔获量估算捕捞业的固碳量(图 2):固碳量(C)是结合根据 Zhang 等(2007)和 Tang 等(2007)研究结果估算的营养级和生态转换效率评估的结果;固碳量(C')是假设食物网结构稳定、渔获物的营养级未发生变化的情况下评估的结果。渤海捕捞业 1980~2000 年间的年固碳量是 283~1 008 万 t,随着渔获量的增加呈逐年增长的趋势,1996 年达最大值;之后由于渔获量和营养级呈下降趋势,2000 年捕捞业的年固碳量与 1993 年的水平相当(图 2-a)。黄海捕捞业 1980~2000 年间的年固碳量是 361~2 613 万 t,随着渔获量的增加呈逐年增长的趋势,1999 年达最大值;2000 年的渔获量略高于 1999 年,但由于营养级的下降使捕捞业的固碳量下降(图 2-b)。假设渔获物的营养级不变,黄渤海捕捞业的年固碳量可分别高达 3 347 万 t 和 1 316 万 t。

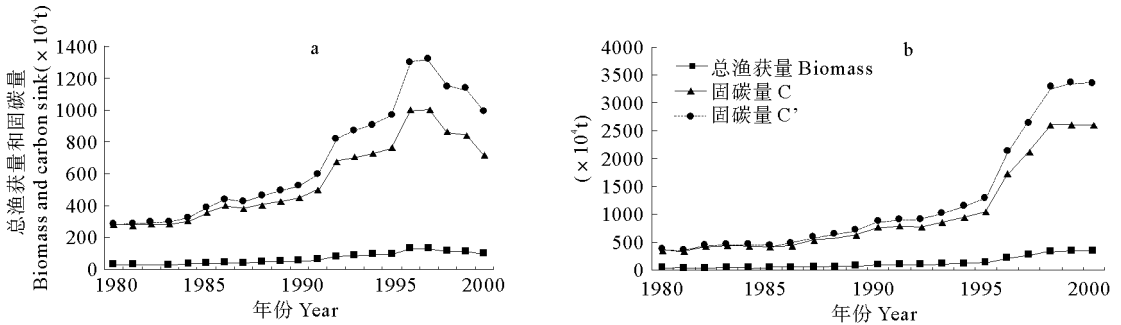


图 2 1980~2000 年渤海(a)和黄海(b)的总渔获量及其固碳量

Fig. 2 Biomass and carbon sink by fishing in the Bohai Sea (a) and Yellow Sea (b) during 1980~2000

3 海洋捕捞业碳汇功能存在的问题

如前所述,海洋生物在海洋中封存的碳一部分通过捕捞业实现了碳移出,一部分继续存在于水体中和随着生物代谢和死亡沉积于海底。尽管加大捕捞产量增加了从海洋生态系统移出浮游植物的固碳量,但随着捕捞业的高速发展,其碳汇功能却被削弱了。首先,由于过度捕捞使资源量下降,封存于水体和海底的碳减少,不利于捕捞业发挥可持续的碳汇功能。同时过度捕捞对海洋生态系统食物网的破坏,使通过食物网机制利用的浮游植物的固碳量下降,大量浮游植物固定的二氧化碳没有得到利用,浮游植物固碳的生物泵作用减弱,导致捕捞业对海洋碳汇的贡献减弱。

如果捕捞没有超过海洋生态系统的自我调节能力,即使总捕捞量和每种鱼的捕捞量波动很大,对海洋生态系统的影响并不大(Yang 1982)。但 Pauly 等(1998,2001)对全球和加拿大海域的渔获物的研究发现渔获物从长寿命、高营养级的底层食鱼的种类逐步向短寿命、低营养级的中上层、无脊椎动物种类转变,捕捞使生态系统中食物网的营养级下降,这种开发方式是不可持续的。同样,我国渔获物的营养级也呈下降趋势,并高于全球变化的趋势(Zhang *et al.* 2007;张 波等 2011)。同时我国渔业资源量也急剧下降,渤海 1998~1999 的渔获量仅占 1959 年的 5%(Tang *et al.* 2003);莱州湾从 1959 年到 2008 年单位时间的捕捞努力量显著下降,从 1959 年的 423.6 kg/h,降至 1982 年的 164.6 kg/h;1998~2008 年间,单位时间的捕捞努力量少于 8 kg/h (Jin *et al.* 2012)。过高的捕捞强度导致我国近海渔业资源严重衰退,多样性指数变小(程济生等 2004),这种开发方式也不利于海洋资源的可持续利用。

另外,由于捕捞业都是倾向于优先捕获最大的种类和种群中最大的个体,而大个体动物与小个体相比能更有效地贮存碳,因此,这种选择性的捕捞降低了海洋吸收和贮碳的能力(Pershing *et al.* 2010)。Taylor 等(2006)对过去 25 年间的渔获物资料进行了统计,发现由于人类的选择性捕捞和过度捕捞,绒口鱼的个体大小、最大性成熟体长都显著下降,影响了河流的碳循环。同样,我国近海的捕捞方式也使渔业资源的个体小型化趋势明显(程济生等 2004)。

综上所述,由于海洋生态系统的营养级下降、食物链缩短、食物网结构简单化、渔业生物个体小型化、大型高营养级的底层鱼类的缺失、渔业资源的退化等,都使得捕捞业对海洋碳汇的贡献大大减弱。根据图 2 的估算结果,我国黄渤海捕捞业的年固碳量最大就分别减少了 23%和 27%。

4 恢复和增强海洋捕捞业的碳汇功能

唐启升(2010)提出了倡导碳汇渔业发展新理念,形成资源养护型的捕捞业,最终使现代渔业得到又好又快和健康可持续发展。针对海洋捕捞业碳汇功能存在的问题,需要借鉴或采取一些措施来恢复和增强其碳汇功能。比如,由于南大洋抹香鲸的数量曾10倍于现存群体,大量捕杀抹香鲸的结果是每年约有400万t的二氧化碳被留在了大气中(Lavery *et al.* 2010),因此,Pershing等(2010)提出重建鲸的种群可以与一些为对抗气候变暖采取的措施相比,如造林计划以及在海洋中播撒铁以增加浮游植物对二氧化碳的吸收等。目前海洋施铁仍是一个广受争议的观点,施铁在提高海洋固碳能力的同时还会对生态系统产生一些负面影响,因此,重建鲸群和大鱼的种群应该是提高海洋碳汇功能更有效的方法。我国的新《渔业法》(2000年)也提出了“国家根据捕捞量低于渔业资源增长量的原则,确定渔业资源的总可捕捞量,实现捕捞限额制度”。Pershing等(2010)建议一些可以买卖碳信用的森林重建计划可以应用到捕捞业,即首先计算这些种群能贮存多少碳,允许国家将捕捞配额作为碳信用出售。另外,由于主要针对大个体和大型种类的开发进一步加大了捕捞业对碳循环的影响,因此,捕捞业应该采取顶部优先保留原则,保留海洋脊椎动物较大的种类和种类中最大的个体(Pershing *et al.* 2010)。

资源增殖放流是恢复和增强海洋捕捞业碳汇功能的另一重要措施。根据李忠义等(2012)对渤海中国对虾 *Fenneropenaeus orientalis* 资源增殖的调查,2009年渤海共放流中国对虾202641万尾,回捕2377t,结合中国对虾的营养级3.32(程济生等1997)和本研究对捕捞业固碳量的评估方法,渤海2009年仅增殖放流的中国对虾就可使捕捞业增加1.66万t的固碳量。

参 考 文 献

- 程济生,俞连福. 2004. 黄、东海冬季底层鱼类群落结构及多样性变化. 水产学报, 28(1): 29-34
- 程济生,朱金声. 1997. 黄海主要经济无脊椎动物摄食特征及其营养层次的研究. 海洋学报, 19(6): 102-108
- 金显仕等著. 2006. 黄渤海渔业资源综合研究与评价. 北京: 海洋科学出版社
- 李忠义,王俊,赵振良,周军,吕振波,董婧,刘茂利,金显仕. 2012. 渤海中国对虾资源增殖调查. 渔业科学进展, 33(3): 1-7
- 孙军. 2011. 海洋浮游植物与生物碳汇. 生态学报, 31(18): 5372-5378
- 孙军,刘东艳,钱树本. 1999. 浮游植物生物量研究 I. 浮游植物生物量细胞体积转化法. 海洋学报, 21(2): 75-85
- 唐启升. 1999. 海洋食物网与高营养层次营养动力学研究策略. 海洋水产研究, 20(2): 1-6
- 唐启升. 2010. 碳汇渔业与又好又快的发展现代渔业. “中国工程院第109场工程科技论坛—碳汇渔业与渔业低碳技术”论文集: 1-2
- 唐启升. 2011. 海洋生物碳汇扩增途径与科学问题. 香山科学会议第399次学术研讨会: 10-15
- 张波,吴强,牛明香,金显仕. 2011. 黄海北部鱼类群落的摄食生态及其变化. 中国水产科学, 18(6): 1343-1350
- Jin XS, Shan XJ, Li XS, Wang J, Cui Y, Zuo T. 2012. Long-term changes in the fishery ecosystem structure of Laizhou Bay, China. Science China Earth Sciences 55 (1): 1-9
- Lavery TJ, Roudnew B, Seymour J, Seuront L, Johnson G, Smetacek V. 2010. Iron defecation by sperm whales stimulates carbon export in the Southern Ocean. Proceedings of the Royal Society B 277: 3527-3531
- Pauly D, Palomares ML, Froese R, Sa-a P, Vakily M, Preikshot D, Wallace S. 2001. Fishing down Canadian aquatic food webs. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 58: 51-62
- Pauly D, Christense V, Dalgaard J, Froese R, Torres F Jr. 1998. Fishing down marine food webs. Science 279: 860-863
- Pershing AJ, Christensen LB, Record NR, Sherwood GD, Stetson PB. 2010. The impact of whaling on the ocean carbon cycle: why bigger was better. PLoS ONE 5(8): 1-9
- Tang QS, Guo XW, Sun Y, Zhang B. 2007. Ecological conversion efficiency and its influencers in twelve species of fish in the Yellow Sea Ecosystem. Journal of Marine System 67: 282-291
- Taylor BW, Flecker AS, Hall Jr. RO. 2006. Loss of a harvested fish species disrupts carbon flow in a diverse tropical river. Science 313: 833-836
- Tang QS, Jin XS, Wang J, Zhuang ZM, Cui Y, Meng TX. 2003. Decadal-scale variation of ecosystem productivity and control mechanisms in the Bohai Sea. Fishery Oceanography 12(4/5): 223-233
- Wilson RW, Millero FJ, Taylor JR, Walsh PJ, Christensen V, Jennings S, Grosell M. 2009. Contribution of fish to the marine inorganic carbon cycle. Science 323: 359-362
- Yang JM. 1982. A tentative analysis of the trophic levels of North Sea fish. Mar Ecol Prog Ser 7: 247-252
- Zhang B, Tang Q, Jin X. 2007. Decadal-scale variations of trophic levels at high trophic levels in the Yellow Sea and Bohai Sea ecosystem. Journal of Marine System 67: 304-311