

多重压力胁迫下近海生态系统与多营养层次综合养殖

唐启升¹ 方建光¹ 张继红¹ 蒋增杰¹ 刘红梅²

(¹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)

(²中国科学院烟台海岸带研究所, 264003)

摘要 近半个多世纪以来,在过度开发利用、气候变化(包括全球变暖和自然波动)以及环境污染等多重压力胁迫下近海生态系统发生了前所未有的变化,其中黄海大海洋生态系最具代表性。它主要表现在生物多样性和生态系统生产力的变化;生态系统产出质量下降,如个体较大、营养层次较高、重要的底层经济种类被个体较小、营养层次较低、中上层及经济价值低的种类所替代。研究分析表明,在多重压力胁迫下,近海生态系统及其变化受控于多因素作用的控制机制,导致生态系统变化的复杂性、不确定性,并难以甄别和管理。多营养层次综合水产养殖是应对多重压力胁迫下近海生态系统显著变化的一条有效的途径。文内论述了发展多营养层次综合养殖的科学基础,介绍了在黄海桑沟湾构建的多营养层次综合养殖模式及其效果,评估了多营养层次综合养殖的碳收支与生态服务功能。最后,在结语中指出:展望未来,多营养层次综合养殖模式的多样化发展需要特别予以关注,需要得到更多基础研究的支持。除了进一步加强养殖种类的生物学和区域生态学研究,还需要加强养殖生态系统的生物地球化学循环和水动力学过程研究,关注海洋酸化对养殖生物的影响,多营养层次综合养殖系统对海洋酸化的响应及其应采取的适应性对策。

关键词 近海生态系统 多重压力胁迫 黄海大海洋生态系 适应性管理对策
多营养层次综合水产养殖

中图分类号 S917.4 文献识别码 A 文章编号 1000-7075(2013)01-0001-11

Impacts of multiple stressors on coastal ocean ecosystems and Integrated Multi-trophic Aquaculture

TANG Qi-sheng¹ FANG Jian-guang¹ ZHANG Ji-hong¹
JIANG Zeng-jie¹ LIU Hong-mei²

(¹Key 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)

(²Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 264003)

ABSTRACT Over the past half-century, the coastal ocean ecosystems have changed greatly under the multiple stressors (including over-exploitation and utilization, climate change such as global warming and natural fluctuations, and environmental pollution), in which, the Yellow Sea

国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB409805)、国家“十二五”科技支撑计划(2011BAD13B05)、国家自然科学基金项目(41006074)和国家贝类产业技术体系(CARS-48)共同资助

收稿日期:2013-02-02;接受日期:2013-02-18

作者简介:唐启升(1943-),男,中国工程院院士,主要从事海洋渔业资源与生态学研究。E-mail:office@ysfri.ac.cn

Large Marine Ecosystem is the most representative one. It is mainly manifested in the changes of biodiversity and productivity of ecosystem; as a result, larger, higher trophic level, and commercially important demersal species were replaced by smaller, lower trophic level, pelagic, less-valuable species. The analysis showed that the coastal ocean ecosystems as well as their changes will be controlled by a mechanism of multiple factors, and it leads to the complexity and uncertainty of the ecosystem changes, and difficult to identify and manage. Integrated Multi-trophic Aquaculture(IMTA) is an effective way to respond to multiple stressors for coastal ocean ecosystems. This paper discusses the scientific basis for development of IMTA and introduces the IMTA practice and its effect in Sanggou Bay located in the Yellow Sea. And also, carbon budget and ecological service function of IMTA was assessed. For future development, the diversification of IMTA model needs special attention, and gets more support from basic research. In addition to the biology and regional ecology of culture species, study on the biogeochemical cycling and hydrodynamic processes in mariculture ecosystem also need to be strengthened. Moreover, the impact of ocean acidification on cultured organisms and the adaptive strategies in ecosystem-based management should be further concerned.

KEY WORDS Coastal ocean ecosystems Multiple stressors
Yellow Sea Large Marine Ecosystem
Adaptive strategies in ecosystem-based management
Integrated Multi-trophic Aquaculture

近30多年来,海洋生态系统及其研究受到越来越多的关注,这不仅是海洋科学研究发展的一种深入,也是海洋可持续发展的一种需求,因为海洋,特别是近海海洋,承受来自多个方面的压力(Sherman *et al.* 1986; Harris *et al.* 1997; UNEP 2006)。面对这样的态势,人们在寻找解决问题的办法,其中适应性管理对策就是一条途径,例如使用生态系统方法(Ecosystem Approach, EA)和生态系统水平管理(Ecosystem Based Management, EBM)等(Browman *et al.* 2005)。

黄海是一个典型的近海海洋,具有显著的大海洋生态系的特征,即独特的深度、水文学、生产力和营养依赖型种群特征(Tang 1989, 1993; Sherman 1993)。在过去半个多世纪以来,由于过度开发利用、气候变化和环境污染等诸多因素影响,黄海大海洋生态系的结构和功能发生了很大的变化。为此,本研究以黄海大海洋生态系为例,讨论多重压力胁迫下近海生态系统发生的变化及其控制机制,同时根据碳汇渔业的发展理念,将多营养层次综合海水养殖作为一种生态系统水平的适应性管理对策,来研究和讨论海水养殖新模式的发展。

1 黄海大海洋生态系的变化

1.1 黄海大海洋生态系的基本特征

黄海大海洋生态系位于中国大陆北部和朝鲜半岛之间,是一个半封闭海系统。其海域面积约40万 km^2 ,平均水深44 m,最大水深为140 m。黄海中央部有一水深约为70~100 m的狭长海槽(通常被称为黄前海槽或黄海洼地),该地理特征造就了该海域独特水文环境和海洋渔业资源生物的越冬场。

黄海大海洋生态系基本环流是由黄海暖流和黄海沿岸流组成,这两支逆向流动的海流在黄海这个半封闭海的水交换中扮演重要角色。黄海暖流是对马暖流在中国海黑潮区的一个分支,具有较高盐度($>33\text{PSU}$)和温度($>12^\circ\text{C}$),沿 124°E 向北然后向西,冬季流入渤海;所有汇入黄海的河流径流最终形成南向黄海沿岸流,最大径流均在夏季,冬季径流较小,它们对沿岸海水的盐度起着重要的影响作用(Guan 1994)。另外,在黄海槽

海域 50 m 以下水层形成季节性、具有低温特点的黄海冷水团,该冷水团中部区域底层水温低于 7℃。黄海冷水团被认为是残留的北方冷却水和上一年冬季遗留下来的残水,夏季海水分层效应最强,具有大于 10℃/10m 的垂直温度梯度(赫崇本等 1959)。

黄海大海洋生态系位于暖温带,生物资源群落由多种生态型的物种组成。暖温带物种约占资源种群生物量的 60%,暖水种约占 15%,寒温带种约占 25%。该生态系统食物网较复杂,至少有 4 个营养层次(如海洋植物、植食性动物、初级肉食性动物、次级肉食性动物),并形成了两个营养通道,即浮游生物食性通道和底栖生物食性通道(Tang 1993)。在高营养层次中鳀鱼和大型底栖虾(如脊腹褐虾和鹰爪糙对虾)是关键种。约有 40 种捕食生物以鳀鱼为食,几乎涵盖黄海所有的肉食性的中上层鱼类、底层鱼类和头足类,约有 26 种广泛分布在黄海底层的捕食者捕食各类底栖虾类。这些关键种类不仅在食物链上层占据了承上启下的中间位置,同时在黄海食物网形成中发挥了重要的连接作用。

渔业捕捞种类在黄海大海洋生态系大约有 100 种,包括底层鱼类(约 66%)、中上层鱼类(约 18%)、头足类(约 7%)、甲壳类(约 9%),其中,约 20 种主要种类占资源种群生物量的 92%,80 种占其余的 8%。随着底拖网船引入黄海,20 世纪初日本及中国、韩国渔民加强了黄海渔业资源利用,一些高经济价值种类(如真鲷)出现了过度利用,第二次世界大战时期渔业资源大致保持稳定(夏世福 1960;刘效舜 1979)。然而,由于捕捞力量的显著增加并遍及整个黄海,20 世纪 70 年代中期几乎所有的渔业资源都得到了充分利用,到 80 年代整个生态系统的渔业资源呈现出捕捞过度(Tang 1989,1993);与此同时,动物性水产养殖活动在藻类养殖开展多年之后,在黄海沿岸水域悄然兴起。主要养殖种类包括贻贝、牡蛎、扇贝、蛤、虾和一些鱼类,从而启动了一种开发利用黄海大海洋生态系生物资源的新生产方式,即通过人类生产活动提升水域自然生态系统食物供给功能的一种新生产方式。

1.2 黄海大海洋生态系资源种群生物多样性的变化

资源种群种类结构变化的调查研究结果表明,20 世纪 50~60 年代的优势种是小黄鱼和带鱼,70 年代是太平洋鲱和鲈鱼,80~90 年代是鳀鱼及玉筋鱼。结果表明大个体、高营养级、重要的底层经济种类被小个体、低营养级、中上层及经济价值低的种类所取代(图 1)。最近的调查又表明,丰富的中上层鱼类(如鳀鱼)的资源量正在减少,底层种类的生物量有所回升(图 2),如小黄鱼资源从 90 年代中期开始呈现出恢复趋势(金显仕 2006)。

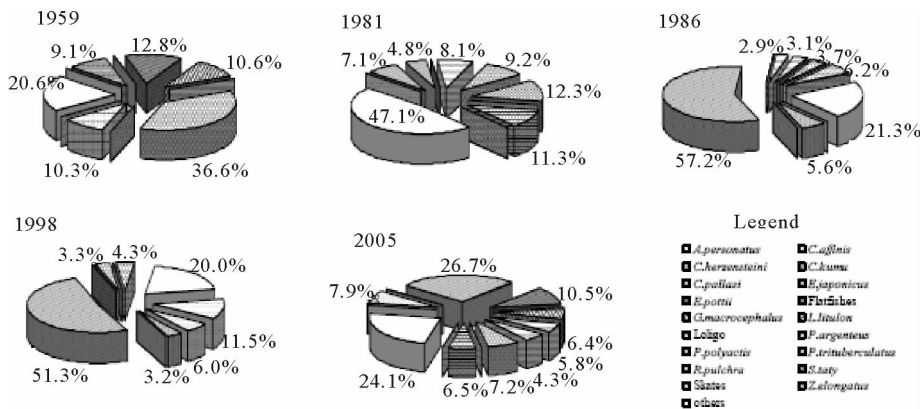


图 1 黄海大海洋生态系资源种群种类组成的变化

(根据黄海水产研究所春季生物量调查数据)

Fig. 1 Changes in species composition of resource populations in the Yellow Sea LME

(Based on biomass yields survey data by Yellow Sea Fisheries Research Institute)

1.3 黄海大海洋生态系生产力的变化

如图 3 所示,自 20 世纪 50 年代以来渤海浮游植物、浮游动物生物量均呈下降趋势,但 1998 年浮游动物生物量明显增加,可能是因为鳀鱼资源的减少,鳀鱼在 1998 年之前是最丰富的物种。鱼类资源从 20 世纪 80 年

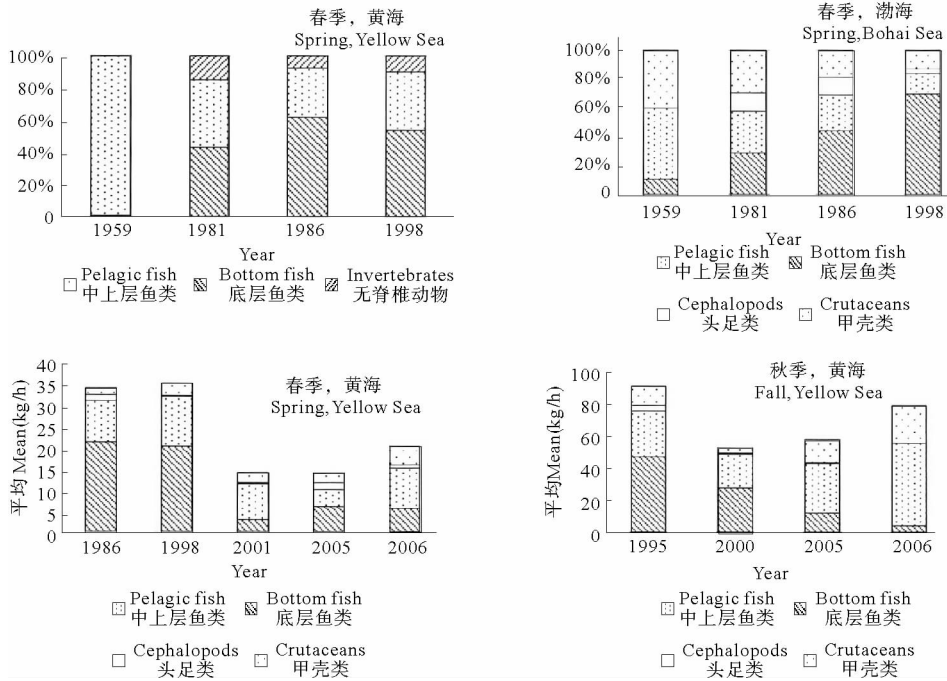


图2 黄海大海洋生态系资源种群群落结构的变化

(根据黄海水产研究所生物量调查数据)

Fig. 2 Changes in community structure of resource populations in the Yellow Sea LME

(Based on biomass yields survey data by Yellow Sea Fisheries Research Institute)

代开始减少,尽管黄海大海洋生态系渔获产量在1998~2000年间保持较高水平。与此同时,生态系资源种群的营养级也呈下降趋势,如渤海鱼类资源营养级从1959~1960年的4.1降至1998~1999年的3.4,黄海鱼类资源营养级从1986~1986年的3.7降至2000~2001年的3.4(张波等2004)。

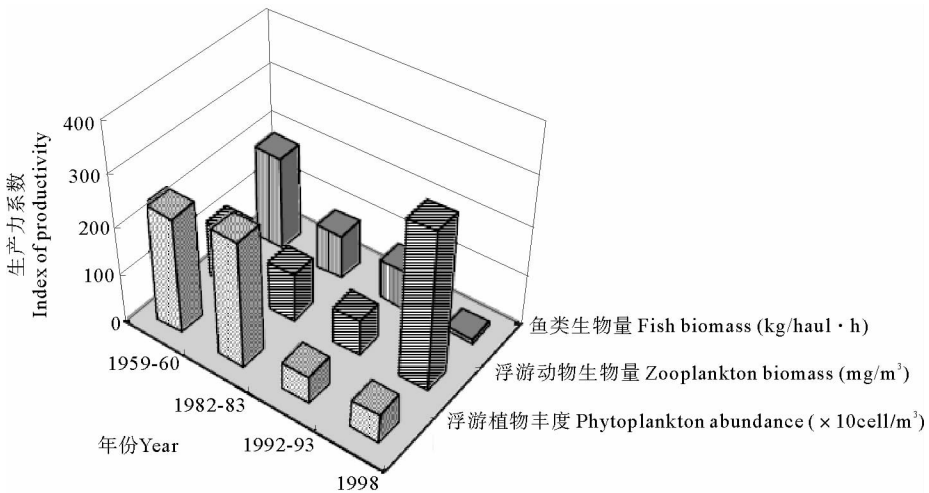


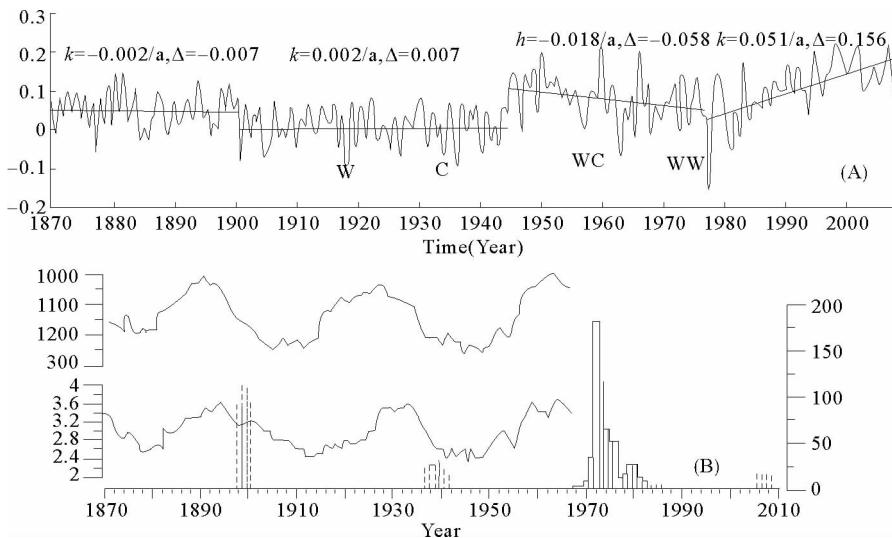
图3 渤海生态系统各营养层次生产力10年尺度的变化(Tang *et al.* 2003)

Fig. 3 Decadal-scale variations of ecosystem productivity at different trophic levels in the Bohai Sea

1.4 生态系统变化的原因及机制

以往诸多研究认为,黄海大海洋生态系资源种群数量与质量的变化主要受人类活动的影响(Tang 1989; Sherman 1993; Zhang *et al.* 1999)。但是,通过分析10年尺度渤海生态系统生产力的变化发现(图3),难

以采用传统的、单一的生态系统控制理论(Harris *et al.* 1997),对长时间尺度的海洋生态系统生产力的变化规律做出直接的、明确的解释,即不论用上行控制,还是用下行控制或蜂腰控制理论都难以完整地解释渤海生态系统各营养层次生产力的多年不规则变化;还发现,在相同的捕捞压力下,黄海某些长期被开发利用的资源种群生物量保持稳定(如鲅鱼),有的种类甚至是逐渐恢复(如小黄鱼)。因此,资源种群生物量和优势种的变化不能仅仅用捕捞压力来解释,气候变化等因素也可能对生态系统的变化产生重要影响。Belkin(2009)报道了自 1982~2006 年,黄海大海洋生态系的表层水温上升了 0.67°C ,这个增温现象在北半球各大海洋生态系普遍存在,并被认为是全球变暖的一个证据,但是,它如何具体影响黄海大海洋生态系的变化目前还不十分清楚。另一项新的研究文献表明,过去 141 年间黄海大海洋生态系的表层水温变化存在 4 个转型期:暖温期(1900 年前)、冷温期(1901~1944 年)、由暖变冷期(1945~1976 年)、由冷变暖期(1977~2007 年)(图 4A)。这个研究结果同黄海大生态系太平洋鲱鱼资源数量周期性波动与中国东部降水有显著相关性的研究结果十分相似(图 4B)。20 世纪黄海冷温性的太平洋鲱鱼的资源数量和商业捕捞经历了 3 个高峰期(1900、1938 和 1972),该期间的中国东部的气候属低温干旱期(唐启升 1981; Tang 2002)。自 2005 年开始,在黄海沿海发生了一系列异常事件,一些伪虎鲸在黄海胶州湾现身,上一次在该海湾见到这些哺乳动物已经是 30 年前的事了。2008 年 1 月,一头巨型抹香鲸(长 19.6m,重 51.1t)在桑沟湾的“青鱼滩”登陆,当地居民从未见过如此巨大的海洋生物;这期间,太平洋鲱鱼及其产卵床——大叶藻在成为高密度海水养殖区的桑沟湾海域(之前是太平洋鲱鱼的产卵场)的生物量在低水平上也有所回升(图 4B),这些前所未有的事件可能与海洋生态系统转型有关。研究表明,黄海气候变化同时受到人类活动和周期性自然波动的作用,并对生态系统变化产生影响。另外,还有环境污染的影响。由于富营养化和营养结构改变所导致的海洋生态灾害,如渤海 20 世纪 50~80 年代氮磷比(N/P)为 2~4,而进入 21 世纪,特别是近几年高达 80 以上,总无机氮大幅度攀升,赤潮、绿潮、缺氧区、水母暴发等事件频繁发生(唐启升等 2009),它们对生态系统的影响是不言而喻的。因此,相信在多重压力胁迫下,近海生态系统及其变化将受控于多因素作用的控制机制,不同时期的主要作用因素可能是不同的(Tang *et al.* 2003)。当这些具有显著动态特性的影响因素交织在一起的时候,就必然导致生态系统变化的复杂性、不确定性,并难以甄别和预测,为海洋生态系统可持续发展和科学管理带来了困难。



(A) W, C, WC 和 WW 分别代表暖温期、冷温期、由暖变冷期、由冷变暖期(Huang *et al.* 2012)

(B) 黄海太平洋鲱鱼数量的波动变化与中国东部湿度 36 年周期性变化的关系(唐启升 1981)

(A) W, C, WC and WW refer to the four regimes characterized by warm, cold, warm with cooling trend, and warm with warming trend, respectively (Huang *et al.* 2012)

(B) Relationship between the fluctuations of herring abundance in the Yellow Sea and the 36-yr cycle of wetness oscillation in eastern China (Tang 1981)

图 4 黄海表层水温及太平洋鲱鱼数量的年际变化

Fig. 4 Annual variation of surface seawater temperature and pacific herring abundance in Yellow Sea

2 多营养层次综合水产养殖,一种生态系统水平的适应性管理策略

2.1 多营养层次综合养殖的科学基础

当人们对多重压力胁迫下的海洋生态系统显著的动态特性及其生态系统变化机制的复杂性、不确定性有了新的认识之后,传统的管理对策虽然仍可使用并需要加强,如对资源种群实施削减捕捞力量、限额捕捞等管理措施,但是,这些措施对恢复生态系统的收效甚微并与现实的需求矛盾较大。因此,从生态系统水平上寻求解决问题的办法,探求适应性管理对策受到特别关注(Pikitch *et al.* 2004; Browman *et al.* 2005; Sherman *et al.* 2012)。

碳汇渔业是绿色、低碳发展新理念在渔业领域的具体体现,能够更好地彰显水产养殖的食物供给和生态服务两大功能,并成为推动水产养殖和现代渔业新一轮发展的驱动力(唐启升 2010)。在这个新理念的引领下,积极探讨新的发展模式,建设环境友好型水产养殖业,发展多营养层次的综合养殖,有望实现水产养殖业“高效、优质、生态、健康、安全”的可持续发展目标。显然,这个新理念的发展和实践也是应对和解决在多重压力胁迫下海洋生态系统问题的一条有效途径。

多营养层次综合水产养殖(Integrated Multi-trophic Aquaculture, IMTA)作为一种生态系统水平的适应性管理策略,在中国沿海有了很好的发展,不仅得益于中国海水养殖独特的、以贝藻为主的产业结构和规模,同时也由于得到了相关基础研究新成果的支持。

2.1.1 非顶层获取的收获策略

这个体现生态系统产出功能的收获策略是根据“高营养层次物种的生态转换效率与其营养级呈负相关”的研究结果得到的(Tang *et al.* 2007)。该项发现表明,较低营养层次(营养级较低)的物种,生态转换效率相对较高;而较高营养层次(营养级较高)的物种,生态转换效率相对较低。这意味着营养级较低的物种具有更高的资源产出效率,生态系统的资源生物量也会相对增加。对于关注从生态系统中获得更多产出的中国需求而言,自然就会选择非顶层获取的收获策略,因为顶层获取的收获产出量相对较低。很明显,多营养层次综合养殖是一种非顶层获取收获策略,因为这种养殖模式包含了较低营养层次的种类,其整体的产出效率相对较高。

2.1.2 贝藻养殖的碳汇功能

贝类和藻类等养殖生物通过滤食浮游植物、颗粒有机物质和光合作用从水体中大量吸收碳元素,并通过收获把这些已经转化为生物产品的碳移出水体,或被再利用或被储存,形成“可移出的碳汇”(张继红等 2005)。中国是世界上最大的贝、藻类养殖国家,年产量超过 1 000 万 t。研究表明,1999~2008 年间,平均每年约有 379 万 t 碳被吸收利用,约 120 万 t 碳通过收获被移出,明显增加了近海生态系统对大气中 CO₂ 的吸收能力(Tang *et al.* 2011)。上述研究结果说明,以贝藻为主体的多营养层次综合养殖能够更好地地彰显水产养殖的生态服务功能,生物的碳汇作用得到了较好的发挥,是环境友好型水产养殖业代表性发展模式。

2.1.3 养殖容量与优化养殖模式

不同养殖种类及方式的养殖容量研究表明,若要实现水产养殖可持续发展的目标,获得较高的产出,需要在容量允许的前提下从养殖密度、海流、附着生物、养殖品种结构、养殖布局规划及最佳养殖水平 6 个方面优化养殖模式(方建光等 1996a,b)。这些研究结果为构建和优化多营养层次综合养殖提供了最基本的科学依据。如图 5 所示,在这个新养殖系统的构建中特别需要有关养殖生态容纳量与养殖品种的搭配、营养物质循环与养殖生物的互补互益、系统产出与生态和社会经济效益等科学数据的支撑。

2.2 在黄海桑沟湾构建的多营养层次综合养殖模式及其效果

2.2.1 鲍-海带筏式综合养殖模式

在消费需求的带动下,可以预测鲍(如皱纹盘鲍 *Haliotis discus Hannai*)筏式养殖的规模将会继续扩大。鲍养殖需要消耗大量的人工投喂饵料(新鲜或干的大型藻类),以致水质变差,影响到养殖鲍的健康状况,最终使养殖系统的食物产出功能受到影响。鲍-海带综合养殖策略的实施,降低了大规模养鲍对生态系统造成的负

面效应,一个潜在的好处是加快营养物质的循环利用,如鲍的粪便及其他排泄物可以被藻类吸收,而藻类又成为该综合养殖系统中鲍的食物(图 6A)。

实施中,每一个养殖单元有 4 条筏架,每个筏架的长度约 80 m,筏间距为 5 m,总的面积约 1 600 m²。每个筏架可以悬挂 30 个网笼,网笼所处水深约为 5 m,每个网笼可以养殖约 280 头壳长为 3.5~4 cm 的鲍。海带水平悬挂于鲍网笼之间。每条绳上可以养殖 70 棵海带,每条海带养殖绳间的距离为 2~3 m。根据鲍的养殖容量、排氮速率和海带的吸收速率,该鲍海带 IMTA 养殖系统共养殖 33 600 头鲍和 12 000 棵海带。海带自 11 月开始养殖直到翌年 5 月结束。海带达到 1 m 长后便可以用于饲喂鲍,鲍网笼至少应该每 7 d 清理 1 次,在这种养殖方式下,鲍在两年内就可以达到上市规格(8~10 cm)。两年后,该 IMTA 鲍的产量为 900 kg,根据 2009 年的市场价格,产值可达 6 万多元。

2.2.2 鱼-贝-海带筏式综合养殖模式

在该系统中,藻类可以吸收和转化鱼和贝排泄的无机营养盐,并为鱼、贝提供溶氧。双壳贝类可滤食鱼类粪便、残饵及浮游植物形成的悬浮的颗粒有机物(图 6B)。利用海带和龙须菜作为 12 月至翌年 5 月(冬季和春季)和 6~11 月(夏季和秋季)的生物修复种类,氮收支方程可表示如下: $N(\text{藻类}) = N(\text{鱼类排泄}) + N(\text{残饵}) + N(\text{死亡鱼体})$ 。这两种生物的干湿重转化系数为 1:10。海带和龙须菜的干组织氮含量分别为 2.79% 和 3.42%,海带和龙须菜的产量为 5.6 kg(湿重)/m² 和 3kg(湿重)/m²。冬季和春季网箱鱼类和海带的最佳混养比例为 1 kg(湿重):0.94 kg(干重),而在夏季和秋季为 1 kg(湿重):1.53 kg(干重)(Jiang *et al.* 2010)。

在该 IMTA 系统内,对能够摄食颗粒有机物的贝类及其他滤食性生物来说,颗粒大小起到重要的决定作用。太平洋牡蛎能够摄食直径小于 541 μm 的颗粒(Dupuy *et al.* 2000)。在近期的实验中,通过对网箱区与非网箱区的实验比较,证明了鱼类残饵及粪便对牡蛎食物来源的贡献。牡蛎通过摄食活动对鱼类养殖产生的有机碎屑的转化效率约为 54.44%(其中 10.33% 为残饵、44.11% 为粪便)。从鱼类养殖网箱逃逸出来的颗粒营养物质中适宜的大小范围占 41.6%,牡蛎能够同化利用 22.65% 的颗粒有机物。双壳类在该系统中起到循环促进者的作用,不仅能够减少养殖污染还能够为鱼类养殖创造额外的收入。不过,为了能够达到最大程度的清洁效果,在该系统中搭配沉积食性种类(如沙蚕、海胆等)是十分必要的。

2.2.3 鲍-海参-菲律宾蛤仔-大叶藻底播综合养殖模式

在该系统内,大叶藻及菲律宾蛤仔来自自然环境,大叶藻可以为海胆和鲍提供食物,同时为其他的底栖生物或者游泳生物提供隐蔽场所。海参可以摄食鲍及菲律宾蛤仔的粪便,同时也摄食自然产生的有机沉积物,所有这些动物所产生的氨态氮能够被大叶藻及浮游植物所吸收利用,浮游植物可为菲律宾蛤仔提供食物,很重要的一点是,大叶藻及浮游植物可以为该系统提供溶解氧(图 6C)。

该 IMTA 系统位于桑沟湾南部湾口的楮岛海域,总面积为 665 hm²,该海域底部主要的沉积物为淤沙,而桑沟湾其他海底表层主要为黏土,底播养殖主要的物种为海参、鲍、海胆、紫石房蛤及菲律宾蛤仔,分布在水下 5~15 m 处。同时在该海区,有大量自然分布的大叶藻及其他藻类,海藻覆盖面积约 400 hm²。每年春季,近 30 万粒海胆和 15 万粒鲍幼苗放至该区,其他种类为自然产生。2009 年,该示范海区共产出 1.5 t 的鲍和 20 t 的海参,180 t 的蛤仔,80 t 的紫石房蛤,2.5 t 的海胆,产出的经济价值约 10 450 元/hm²。

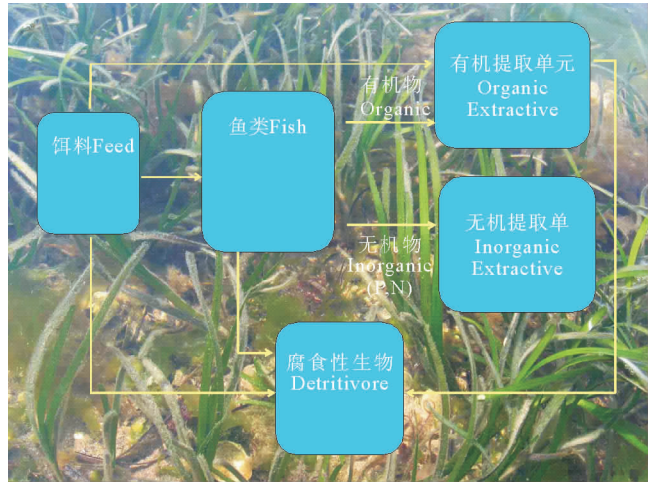
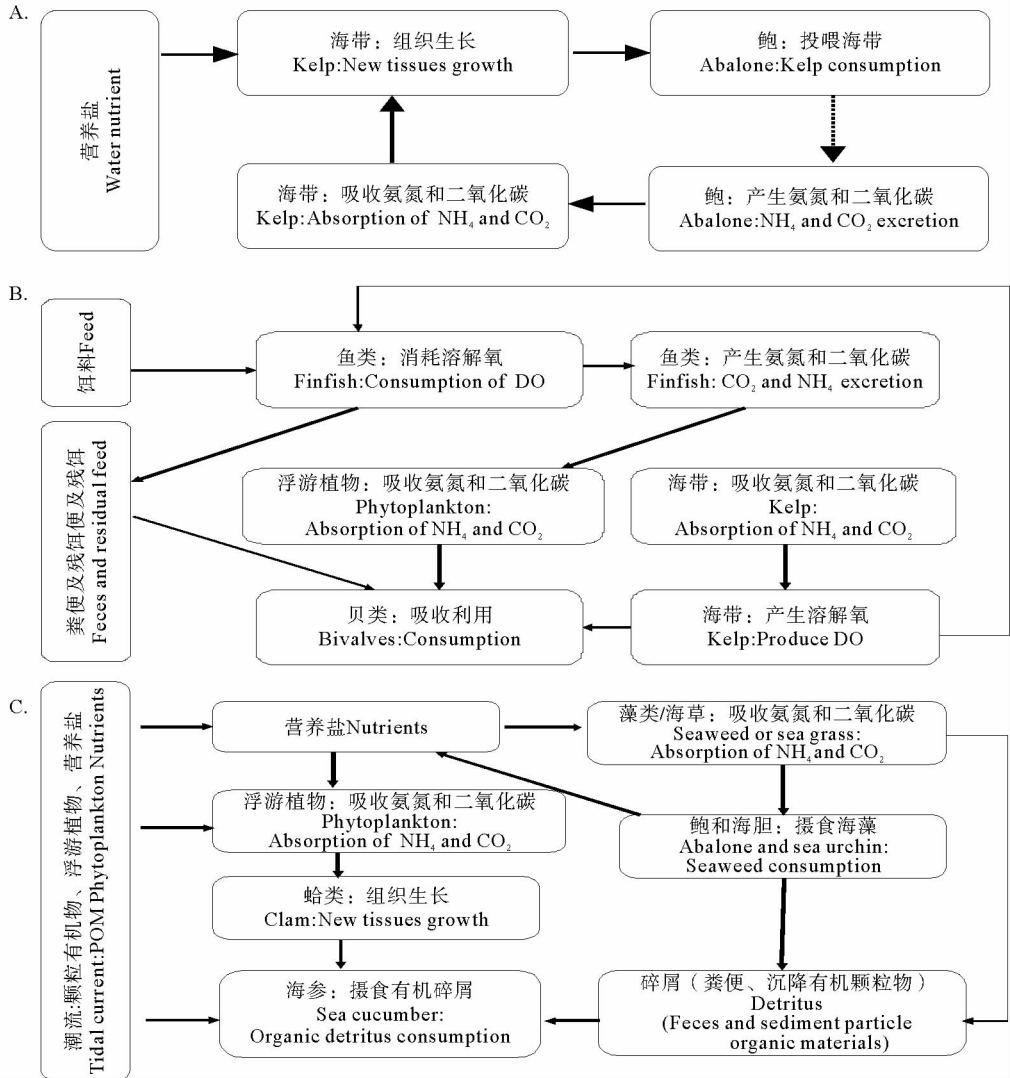


图 5 多营养层次综合模式及物质循环利用概念 (Fang *et al.* 2009)

Fig. 5 IMTA concept and material recycling process (Fang *et al.* 2009)



A. 鲍-海带筏式综合养殖, B. 鱼贝藻筏式综合养殖, C. 鲍-海参-蛤-海带底播综合养殖

A. Long-line culture of abalone and kelp, B. Long-line culture of finfish, bivalve and kelp,

C. Benthic culture of abalone, sea cucumber, clam and seaweed

图 6 黄海桑沟湾多营养层次综合模式

Fig. 6 Diagrammatic representation of IMTA in Sanggou Bay, Yellow Sea

2.3 多营养层次综合养殖的碳收支与生态服务功能

2.3.1 栉孔扇贝养殖个体的碳收支

如图 7 所示, 1 个栉孔扇贝在其 500d 养殖过程中约使用水体中 10 000 mgC, 其中, 用于呼吸并释放回水体的碳约 30%; 沉降到海底的碳约 40%, 这部分碳多少被封存于海底, 多少再悬浮回到水体中, 目前还不十分确定。但是, 约 30% 的碳成为市场规格的扇贝通过收获被移出水体, 成为渔业碳汇。

2.3.2 海带-鲍-海参 IMTA 系统中的碳收支

如图 8 所示, 每收获 1kg(湿重)的鲍, 所摄食吸收的碳约为 2.15 kg, 其中约 12% 用于壳及软组织的生长, 33% 作为生物沉积沉降到海底, 55% 通过呼吸及钙化过程释放出 CO_2 并回归水体。

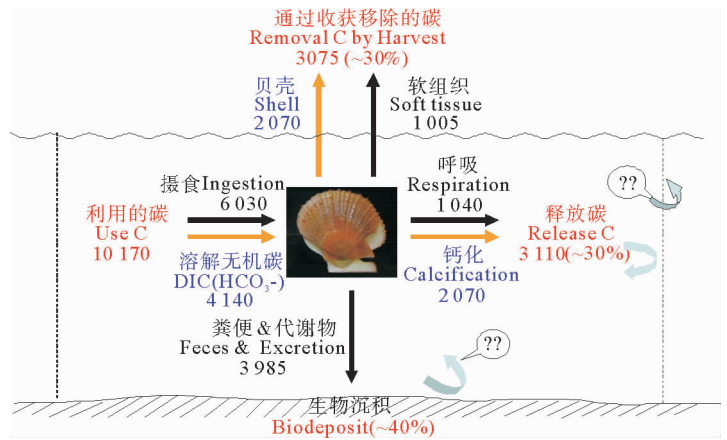
鲍养殖过程中排泄、排粪产生的生物沉积碳约 0.71 kg, 其中, 10%(0.07 kg C)为海带吸收再利用, 其余的 90%(0.67 kg C)与海带残饵(0.37 kg C)作为刺参的食物来源, 约 69%(0.72 kg C)被刺参同化, 剩余的 21%沉入海底。

鲍呼吸和钙化过程中产生的 1.18 kg 溶解 CO₂ 以及刺参呼吸产生的 0.09 kg 的溶解 CO₂ 为海带光合作用提供了 52%的无机碳源。

因此, 鲍参藻综合养殖方式在增加经济效益的同时, 能够有效地移除海洋中的碳。

2.3.3 IMTA 生态服务功能评估

IMTA 模式不仅产出物质产品, 同时亦提供服务价值。根据 Costanza 等(1997)的 17 种主要价值参数, 结合市场价值评估和碳税法, 对桑沟湾不同海水养殖模式核心服务价值进行了估算。4 种不同模式, 包括海带单养、鲍单养、海带-鲍鱼综合养殖和海带-鲍-海参综合养殖的食物提供价值和气候调节价值见表 1 和表 2。结果表明, IMTA 养殖模式所提供的价值远高于单一养殖, 如食物供给功能服务价值比为 1.38~6.61 : 1 和 2.06~9.83 : 1, 气候调节功能服务价值比为 1.65~2.80 : 1 和 1.68~2.85 : 1。



(单位: mg C/个/500d; 根据 Zhang et al. 2013)

(unit: mg C/ind./500 days; adapted from Zhang et al. 2013)

图 7 栉孔扇贝 1 个生长周期的碳收支

Fig. 7 Carbon budget of scallop *Chlamys farreri* during a farming cycle

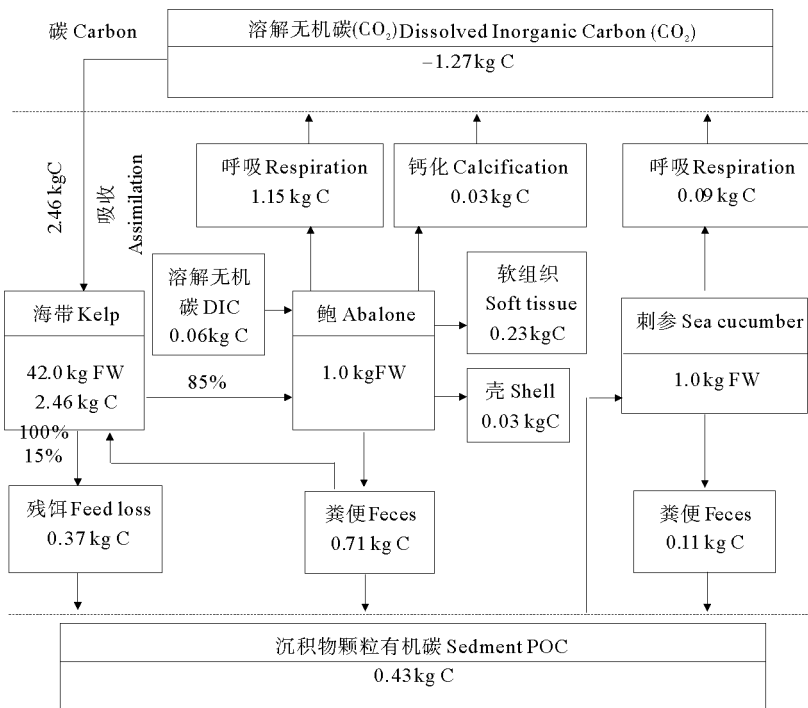


图 8 鲍-海参-海带综合养殖系统 1 个养殖周期的碳收支

Fig. 8 Carbon budget in the IMTA system of kelp, abalone and sea cucumber during a farming cycle

表1 不同养殖模式的食物供给功能

Table 1 Value of food provision service in different aquaculture mode

养殖模式 Aquaculture mode	养殖种类 Aquaculture species	产量 Yield (kg/hm ² · yr)	市场价格 Market price (y/kg)	收入 Income (CNY/hm ² · yr)	成本 Cost (CNY/hm ² · yr)	服务价值 Value (CNY/hm ² · yr)
单养 Monoculture	海带 Kelp	14 063	6	84 375	35 156	49 219
单养 Monoculture	鲍 Abalone	9 015	200	901 442	666 033	235 409
综合养殖 IMTA	海带 Kelp	15 625	6	0	37 969	/
	鲍 Abalone	9 015	200	901 442	537 921	363 522
	总计 Total			901 442	575 889	325 553
综合养殖 IMTA	海带 Kelp	15 625	6	0	4	/
	鲍 Abalone	8 654	200	865 384	482 716	382 668
	海参 Sea cucumber	1 875	120	112 500	11 250	106 250
	总计 Total			977 884	493 966	483 918

表2 不同养殖模式的气候调节功能

Table 2 Value of climate regulating service in different aquaculture mode

养殖模式 Aquaculture mode	固定及移除的碳量 Fixed and removed carbon (kgC/hm ² · yr)	释放的 CO ₂ 量 Released CO ₂ (kg/hm ² · yr)	服务价值 Value (CNY/hm ² · yr)		
			正效应 Benefit	负效应 Lost	总价值 Total value
海带单养 Kelp Monoculture	4 387.5	0	4 859.32	0	4 859.32
鲍单养 Abalone monoculture	1 808.3	24.96	8 242.13	17.360 9	8 214.77
鲍-海带综合养殖 Abalone and kelp IMTA	12 311.9	40.689 9	13 635.88	44.596 1	13 591.28
鲍参藻综合养殖 Abalone, sea cucumber and kelp IMTA	12 528.52	39.3967	13 875.79	43.178 8	13 832.61

3 结语

本研究表明,多营养层次综合水产养殖是应对多重压力胁迫下近海生态系统显著变化的一条有效途径。它不仅促进了生态系统的高效产出,保障食物的持续供给,同时最大限度地挖掘了以碳汇扩增为特点的生态服务功能,保障生态系统健康和水产养殖业可持续发展。展望未来,特别是考虑到我国漫长的海岸线、南北纬度与生态区的大跨度差异以及不同的市场需求,多营养层次综合养殖模式的多样化发展需要特别予以关注。这意味着需要得到更多基础研究的支持,除了需要进一步加强养殖种类的生物学(特别是生态生理)和区域生态学研究,还需要加强养殖生态系统的生物地球化学循环和水动力学过程研究。另外,还需要关注全球变化的影响,如 CO₂ 升高所导致的海洋酸化对养殖生物的影响,多营养层次综合养殖系统对海洋酸化的响应及其应采取的适应性对策等。

参 考 文 献

- 方建光,孙慧玲,匡世焕,孙耀,周诗贻,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋,张爱君,王兴章,汤庭耀. 1996a. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究. 海洋水产研究, 17(2): 18-31
- 方建光,孙慧玲,匡世焕,孙耀,周诗贻,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋,张爱君,王兴章,汤庭耀. 1996b. 桑沟湾海水养殖现状评估及优化措施. 海洋水产研究, 17(2): 95-102

- 刘效舜. 1979. 黄、渤海区渔业资源现状. 海洋水产研究丛刊, 26: 1-17
- 张 波, 唐启升. 2004. 渤、黄、东海高营养层次重要生物资源种类的营养级研究. 海洋科学进展, 22(4): 393-404
- 张继红, 方建光, 唐启升, 任黎华. 2013. 桑沟湾不同区域养殖栉孔扇贝的固碳速率初步研究. 渔业科学进展, 34(1)
- 张继红, 方建光, 唐启升. 2005. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献. 地球科学进展, 20(3): 359-365
- 金显仕. 2006. 小黄鱼. 中国专属经济区海洋生物资源与栖息环境(唐启升主编). 北京: 科学出版社, 1 130-1 133
- 夏世福. 1960. 渤、黄、东海的渔业. 海洋水产研究丛刊, 2: 73-94
- 唐启升, 苏纪兰, 周名江. 2009. 海洋生态灾害与生态系统安全. 双清论坛简讯, 39: 1-5
- 唐启升. 1981. 黄海鲱鱼世代数量波动原因的初步探讨. 海洋湖沼通报, 2: 37-45
- 唐启升. 2010. 碳汇渔业与海水养殖业——一个战略性的新兴产业. www.ysfri.ac.cn/tanhuiyuye.doc
- 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友, 徐 斯. 1959. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 2(1): 11-15
- Belkin I. 2009. Rapid warming of large marine ecosystem. Progress in Oceanography 81(1-4): 207-213
- Browman HI, Stergiou KI. 2005. Politics and socio-economics of ecosystem-based management of marine resources. Mar Ecol Prog Ser 300: 241-296
- Costanza R, Arge R, Groot R. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387: 253-260
- Fang JG, Funderud J, Zhang JH and 3 others. 2009. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) of sea cucumber, abalone and kelp in Sanggou Bay, China. In: Walton MEM (ed) Yellow Sea Large Marine Ecosystem Second Regional Mariculture Conference. UNDP-GEF project "Reducing environmental stress in the Yellow Sea Large Marine Ecosystem". Jeju, Republic of Korea
- Guan BX. 1994. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and the East China Sea. Oceanology of China Seas 1. Netherland: Kluwer Academic Publisher, 17-26
- Harris R and the members of the GLOBEC Scientific Steering Committee (SSC). 1997. Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC): Science Plan. IGBP Report 40 (GLOBEC Report 9). Stockholm, Sweden: IGBP Secretariat, 83
- Huang DJ, Ni XB, Tang QS and 2 others. 2012. Spatial and temporal variability of sea surface temperature in the Yellow Sea and East China Sea over the past 141 years. Modern Climatology, Dr Shih-Yu Wang (Ed.), ISBN: 978-953-51-0095-9, In Tech, p 213-234
- Jiang ZJ, Fang JG, Mao YZ, Wang W. 2010. Eutrophication assessment and bioremediation strategy in a marine fish cage culture area in Nansha Bay, China. Journal of Applied Phycology 22(4): 421-426
- Pikitch EK, Santora C, Babcock EA and 14 others. 2004. Ecosystem-based fishery management. Science 305: 346-347
- Sherman K, McGovern G. 2012. Frontline observations on climate change and sustainability of large marine ecosystems. Large Marine Ecosystems 17, 203
- Sherman K, Alexander LM. 1986. Variability and management of large marine ecosystems. AAAS Selected Symposium 99. Boulder, CO: Westview Press, 319
- Tang QS. 1989. Changes in the biomass of the Yellow Sea ecosystem. In: Sherman K, Alexander LM (eds). Biomass Yields and Geography of Large Marine Ecosystem. AAAS Selected Symposium 111. Boulder, CO: Westview Press, 7-35
- Tang QS. 1993. Effects of long-term physical and biological perturbations on the contemporary biomass yields of the Yellow Sea ecosystem. In: Sherman K, Alexander LM, Gold BD (eds). Large Marine Ecosystems: Stress, Mitigation, and Sustainability. Washington, DC: AAAS Press, 79-83
- 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. J Marine Ecosystems 67: 282-291
- Tang QS, Jin XS, Wang J and 3 others. 2003. Decadal-scale variation of ecosystem productivity and control mechanisms in the Bohai Sea. Fishery Oceanography 12(4/5): 223-233
- Tang QS, Zhang JH, Fang JG. 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems. Mar Ecol Prog Ser 424: 97-104
- Tang QS. 2002. Yellow Sea Herring. In: Hay *et al.* (eds). Herring Expectations for a New Millennium. Alaska Sea Grant College Program, 389-391, 436-437
- UNEP. 2006. Marine and coastal ecosystems and human wellbeing: A synthesis report based on the findings of the Millennium Ecosystem Assessment. UNEP. 76
- Zhang CI, Kim SA. 1999. Living marine resources of the Yellow Sea ecosystem in Korean waters: status and perspectives. In: K. Sherman and Q. Tang, eds. Large Marine Ecosystems of the Pacific Rim. Cambridge, MA: Blackwell Science 163-178