

# 獐子岛海域浮游植物的粒径结构及碳流途径\*

蒋增杰<sup>1</sup> 杜美荣<sup>1</sup> 姜 绪<sup>1</sup> 梁 峻<sup>2</sup> 赵学伟<sup>2</sup>  
刘 毅<sup>1</sup> 张 媛<sup>2</sup> 张晓芳<sup>2</sup> 方建光<sup>1①</sup>

(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. 獐子岛集团股份有限公司 大连 116001)

**摘要** 根据2011年6月、10月、12月和2012年4月4个航次对獐子岛海域水温、分粒径Chl *a*浓度、透明度等参数的调查数据,分析了该海域Chl *a*浓度的时空变化特征,探讨了浮游植物的粒径结构、光合固碳能力及碳流途径。研究结果显示,獐子岛海域表、底层Chl *a*浓度年变化范围分别为0.07–6.28 μg/L和0.16–5.28 μg/L,年平均浓度分别为(1.60 ± 1.38) μg/L和(1.31 ± 1.10) μg/L,存在显著的季节差异( $P < 0.05$ )和空间分布的不均匀性,表、底层Chl *a*含量秋、春季节差异极显著( $P < 0.01$ )。表、底层浮游植物粒径组成均以微型浮游植物(Nano-phytoplankton)为主,贡献率分别为50.85%和44.64%。典范对应分析(CCA)结果表明,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的3种形态无机营养盐对微型浮游植物有显著的影响,而水温和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>对微微型浮游植物(Pico-phytoplankton)影响显著。该海域初级生产力变化范围为40.31–1017.64 mg C/(m<sup>2</sup>·d),平均为(386.07 ± 281.80) mg C/(m<sup>2</sup>·d)。超过38.3%的总初级生产通过微食物环向高营养级传递并入经典食物链,微食物环在獐子岛虾夷扇贝养殖生态系统中扮演着重要角色。

**关键词** 粒径结构; 浮游植物; 微食物环; 虾夷扇贝; 獐子岛

**中图分类号** S917 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2015)04-0035-09

浮游植物是海洋生态系统的重要组成部分,是海洋食物网的基础环节,在生态系统的物质循环和能量流动过程中起到了至关重要的作用(Falkowski *et al.*, 1998)。獐子岛海域地处黄海北部外长山列岛最南端,是我国北方重要的海珍品生态养殖基地之一,拥有全国最大的虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)养殖基地。作为虾夷扇贝主要的食物来源,浮游植物的相关研究引起了科研工作者的关注,如张继红等(2008)、尹洁慧等(2013)<sup>1</sup>分别对獐子岛海域不同季节Chl *a*浓度变化情况进行了调查研究,张雪等(2013)<sup>2</sup>对獐子岛

海域浮游植物的群落结构及其与虾夷扇贝的食性关系进行了研究,但迄今为止,尚未见有关浮游植物粒径结构方面的研究报道。研究表明,不同粒径的浮游植物具有不同的生态学意义,在生态系统中担负着不同的生态功能(宁修仁, 1997; Froneman *et al.*, 2004)。本研究根据2011年6月、10月、12月和2012年4月4个航次对獐子岛海域的调查数据,分析了该海域Chl *a*浓度的时空变化特征,探讨了浮游植物的粒径结构及其对微食物环的碳流贡献,研究结果对于准确评估虾夷扇贝的养殖容量、揭示微食物环在养殖生态

\* 国家科技支撑计划课题(2011BAD13B05)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金獐子岛碳汇专项(20603022011003)和国家贝类产业技术体系(CARS-48)共同资助。蒋增杰, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 方建光, 研究员, E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2014-06-19, 收修改稿日期: 2014-07-30

1) 尹洁慧. 獐子岛海域浮游动物群落时空变化特征及其与环境因子之间的关系. 中国科学院海洋研究所博士研究生学位论文, 2013, 11–15

2) 张雪. 獐子岛邻近水域浮游植物群落结构及其与虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)食性关系的研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2013, 55–69

系统中的贡献、保障虾夷扇贝产业的健康可持续发展提供了数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位设置

2011年6月、10月、12月在獐子岛海域设置14个站位进行调查,2012年4月将调查区域向南适当扩大,调查站位调整为12个(图1)。

### 1.2 样品采集及分析方法

样品的采集与保存按照《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)进行。用Niskin采水器在各站采集表层(水下1.0 m)、底层(底上1.0 m)水样,迅速导入2 L取样桶中,4℃冷藏保存、备用。表、底层水温(T)、盐度(S)、溶解氧(DO)、pH等水质参数利用便携式水质分析仪(美国YSI公司,Professional Plus)现场测定。透明度的测定采用透明度盘。

水样带回实验室后,准确量取500 ml水样过滤到0.45 μm的醋酸纤维素滤膜上,用于测定各站位Chl *a*总浓度;另取500 ml水样依次过滤于孔径为20 μm筛绢、2 μm、0.45 μm的醋酸纤维素滤膜上,用于测定3个不同粒级浮游植物的Chl *a*浓度,即>20 μm的小型浮游植物(Micro-phytoplankton)、2-20 μm的微型浮游植物(Nano-phytoplankton)和<2 μm的微微型浮游植物(Pico-phytoplankton)。滤膜用铝箔包裹后,置于-20℃冰箱内冷冻保存,低温避光条件下,用90%的丙酮萃取24 h,取上清液,用Turner Designs荧光光度计测定Chl *a*浓度。

初级生产力采用叶绿素估算法中的经验模式法,具体方法参照蒋增杰等(2012)。不同季节的日出、日落时间由中国天气网 <http://www.weather.com.cn/weather/101121304.shtml> 获得。

### 1.3 数据处理及统计分析

差异显著性检验及相关性分析采用SPSS 17.0软件, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著;根据方差齐次性检验结果,选择多重比较方法(当方差具有齐次性时,选择“LSD”,当方差不具有齐次性时选择“Tamhane's T2”)。等值线的绘制采用Surfer 7.0软件。粒径分级Chl *a*含量与主要环境因子间的关系采用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA),分析过程使用Canoco for windows 4.5按照国际通用标准完成。

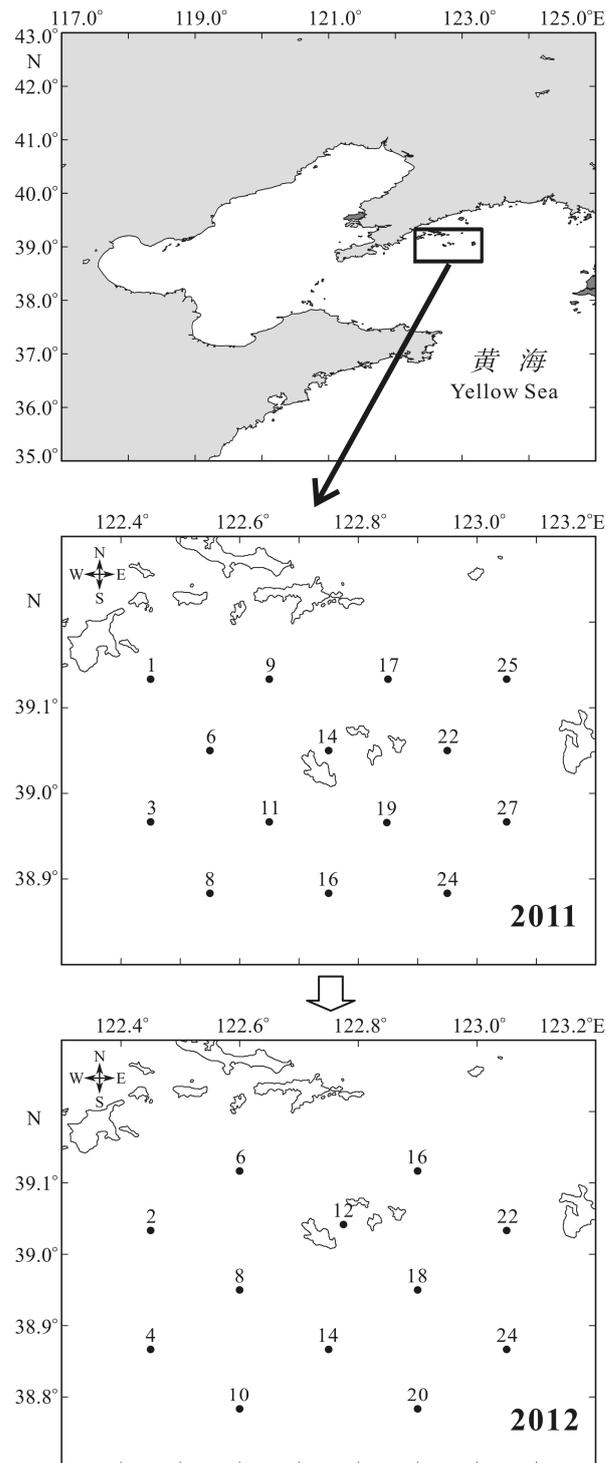


图1 獐子岛海域调查站位

Fig.1 Investigation stations in the coastal area of Zhangzidao Island

## 2 结果

### 2.1 水温、透明度的时空变化特征

獐子岛海域表、底层水温时空分布特征见图2。从图2中可以看出,各个季节水温的平面分布较为均

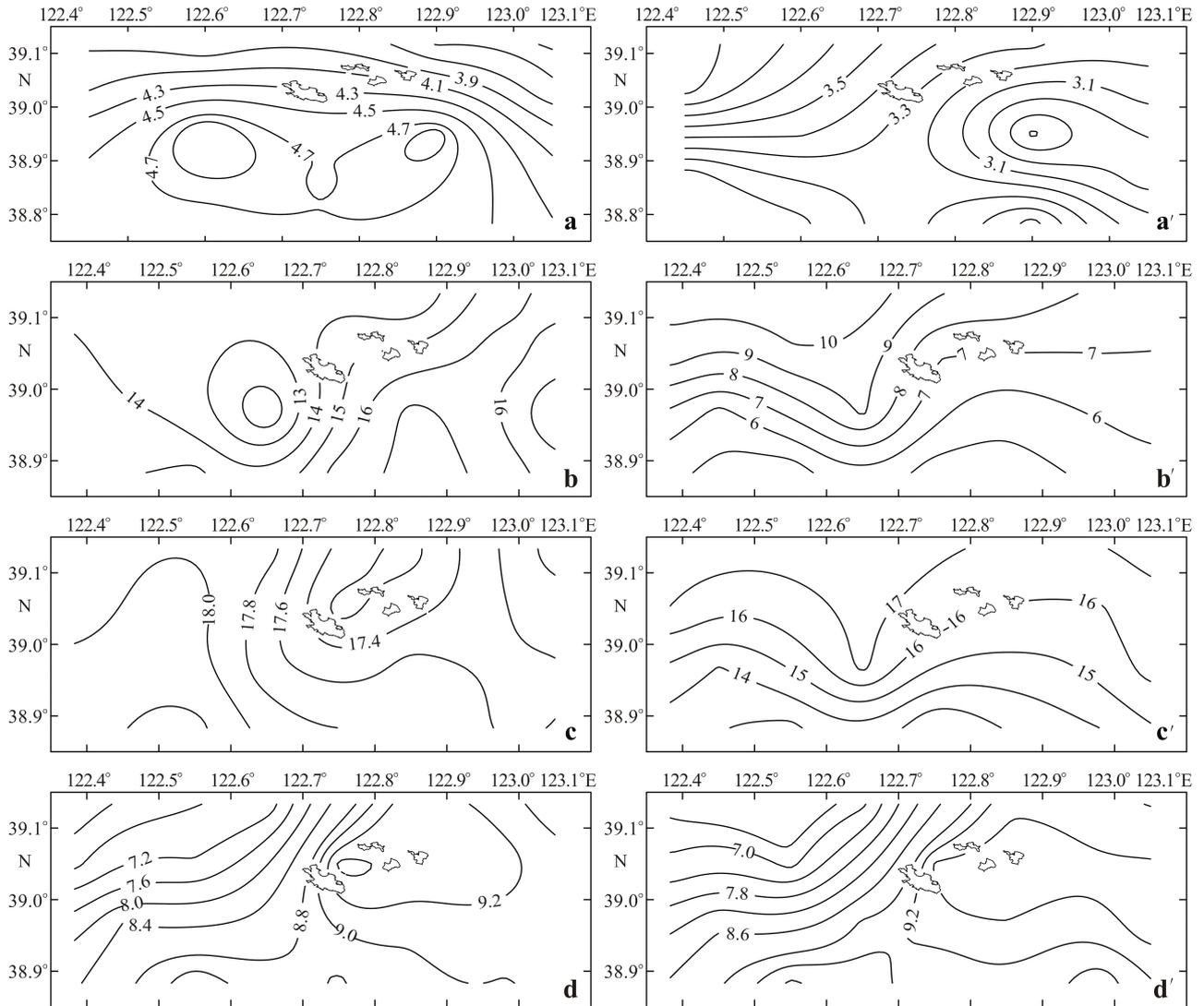


图 2 獐子岛海域表层(水下 1.0m)、底层(底上 1.0m)水温平面分布特征

Fig.2 Seasonal and spatial distribution of seawater temperature (°C) for the surface water (1.0 m beneath the surface) and bottom water (1.0 m above the seabed) in the coastal area of Zhangzidao Island

表层: a) 春季, b) 夏季, c) 秋季, d) 冬季, 底层: a') 春季, b') 夏季, c') 秋季, d') 冬季

Surface: a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter, bottom: a') Spring, b') Summer, c') Autumn, d') Winter

匀,但从垂直分布来看,夏季表层水温显著高于底层 ( $P < 0.01$ ),温差达  $7.5^{\circ}\text{C}$ 左右,秋、冬、春季节表层水温虽高于底层,但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

獐子岛海域透明度的平面分布见图 3。从图 3 中可以看出,该海域的透明度较高,变化范围在 2.1–8.3 m 内,均值为  $(4.7 \pm 1.3)$  m,透明度均值春季最大,达 5.3 m,季节差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.2 Chl a 浓度及初级生产力的时空变化特征

獐子岛海域表、底层 Chl a 浓度的时空变化特征见图 4、图 5。獐子岛海域表、底层 Chl a 浓度的年变化范围分别为  $0.07\text{--}6.28 \mu\text{g/L}$  和  $0.16\text{--}5.28 \mu\text{g/L}$ , 均值

分别为  $(1.60 \pm 1.38) \mu\text{g/L}$  和  $(1.31 \pm 1.10) \mu\text{g/L}$ , 季节差异显著 ( $P < 0.05$ ), 秋季表层海水的 Chl a 浓度最高。

Chl a 的空间分布呈现不均匀特征,秋季表层 Chl a 浓度显著高于底层 ( $P < 0.01$ ), 而春季表层 Chl a 浓度显著低于底层 ( $P < 0.01$ )。夏季表层 Chl a 浓度虽高于底层但差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 冬季表、底层 Chl a 浓度相近。从平面分布来看,夏季表层 Chl a 浓度高值区出现在獐子岛与裕链岛、大耗子岛的中间海域,秋、冬、春季表层 Chl a 浓度高值区出现在獐子岛西北侧海域,夏季底层 Chl a 浓度高值区出现在獐子岛正北偏西海域,而秋、冬季节底层 Chl a 浓度高值区出现在獐子岛南偏西海域,春季底层 Chl a 浓度在獐

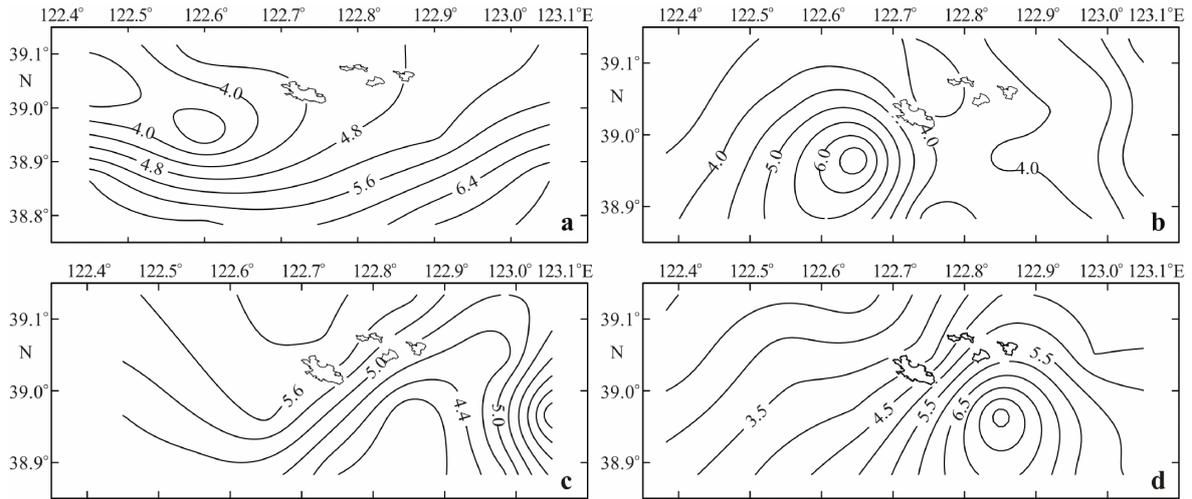


图 3 獐子岛海域透明度时空变化特征 a) 春季, b) 夏季, c) 秋季, d) 冬季

Fig.3 Seasonal and spatial variations of transparency in the coastal area of Zhangjizdao Island: a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter

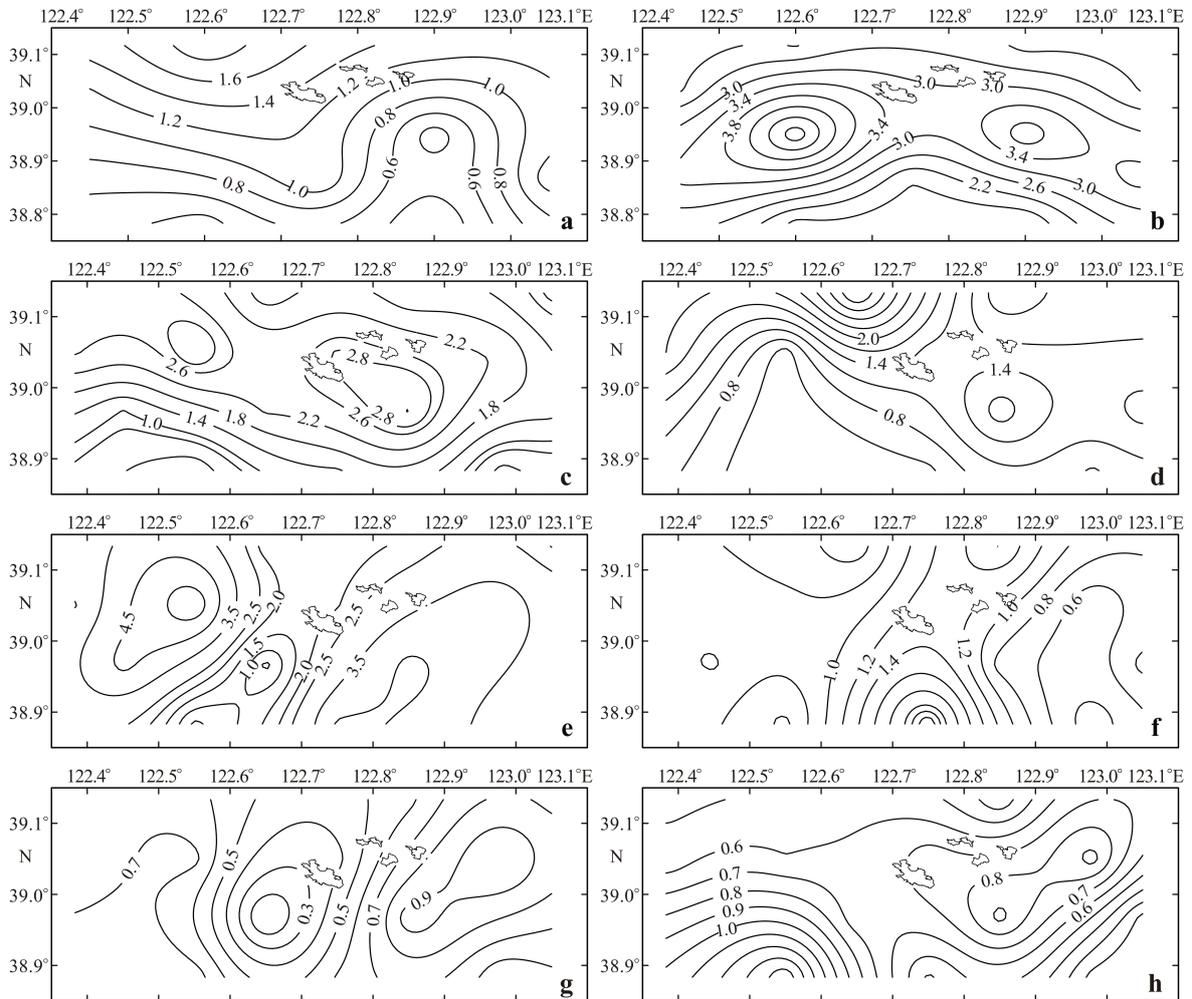


图 4 獐子岛海域表层(水下 1.0 m)、底层(底上 1.0 m)叶绿素 a ( $\mu\text{g/L}$ ) 平面分布特征

Fig.4 Spatial distribution of Chl a concentration ( $\mu\text{g/L}$ ) for the surface water (1.0 m beneath the surface) and bottom water (1.0 m above the seabed) in the coastal area of Zhangjizdao Island

表层: a) 春季, c) 夏季, e) 秋季, g) 冬季, 底层: b) 春季, d) 夏季, f) 秋季, h) 冬季

Surface: a) spring, c) summer, e) autumn, g) winter, bottom: b) spring, d) summer, f) autumn, h) winter

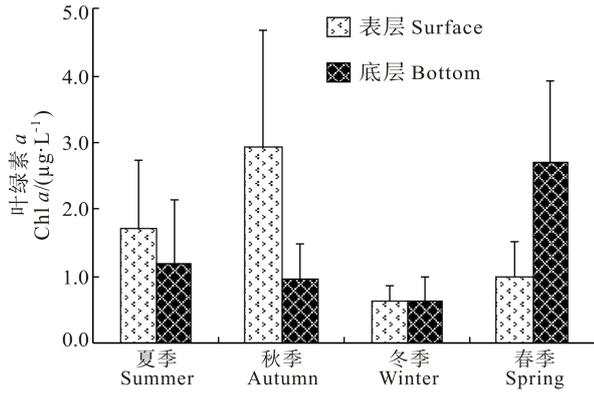


图 5 獐子岛海域表、底层 Chl a 浓度的季节变化  
Fig.5 Seasonal variations of Chl a concentration in the coastal area of Zhangzidao Island

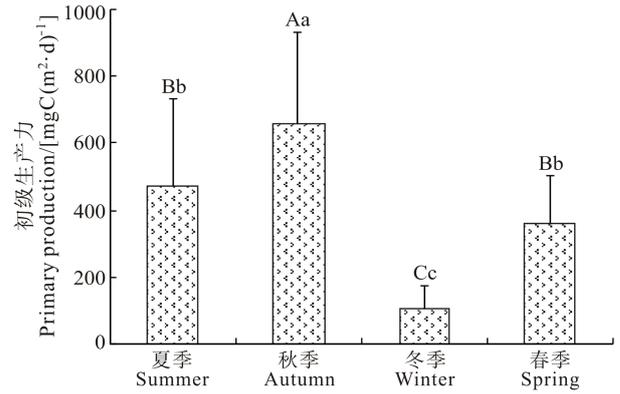


图 6 獐子岛海域初级生产力的季节变化  
Fig.6 Seasonal variations of primary production in the coastal area of Zhangzidao Island

子岛南偏东和南偏西方位形成两个“漩涡状”高值区, 表、底层高值区的分布不一致。

獐子岛海域初级生产力变化范围为 40.31–1017.64 mg C/(m²·d), 平均为 386.07 mg C/(m²·d), 不同季节间存在极显著差异( $P < 0.01$ ) (图 6)。其中, 秋季初级生产力最高, 平均为 655.69 mg C/(m²·d); 夏、春季次之, 分别为 472.15、363.06 mg C/(m²·d); 冬季初级生产力水平最低, 为 106.22 mg C/(m²·d)。LSD 多重比较结果显示, 秋季与冬、春季之间差异极显著( $P < 0.01$ ), 与夏季差异显著( $P < 0.05$ ), 冬季与夏、秋、春季间差异均极显著( $P < 0.01$ )。

### 2.3 浮游植物的粒径结构

獐子岛海域表、底层浮游植物粒径结构见图 7、图 8。从图 7、图 8 中可以看出, 表、底层浮游植物粒径组成均以 nano-浮游植物为主, 年平均贡献率分别为 50.85%和 44.64%, pico-浮游植物在表、底层浮游植物中所占的份额均为最少, 分别为 21.29%和 19.71%(图 7)。从不同季节浮游植物粒径结构来看, 夏季, 表层 nano-和 pico-浮游植物的贡献率相当, 分别占 40.08%和 40.50%, 底层 micro-浮游植物贡献率

注: LSD 检验法进行多重比较, 大写字母表示差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Notes: LSD tests for multiple comparisons, capital letter means the significant difference  $P < 0.01$ ; lowercase letter means highly significant difference  $P < 0.05$

略高于 pico-浮游植物和 nano-浮游植物, 三者的贡献率分别为 41.98%、33.41%、24.62%; 秋季, 表、底层均以 nano-浮游植物为主, 贡献率分别达 56.34%和 53.08%; 冬季, 浮游植物粒径结构组成与秋季类似, 表、底层均以 nano-浮游植物为主, 贡献率分别达 56.14%和 56.23%; 春季, 表层 nano-浮游植物占优势地位, 贡献率达 70.07%, 底层 nano-和 micro-浮游植物的贡献率相当, 分别占 43.91%和 45.23%(图 8)。

## 3 讨论

### 3.1 獐子岛海域浮游植物的粒径结构特征

浮游植物的粒径结构与环境(如光照、营养盐水平、海流、温度等)、生物因子(生物摄食强度等)的关系密切(Agawin *et al*, 2000; Kormas *et al*, 2002)。研究表明, 浮游植物在不同环境条件下的竞争优势主要决

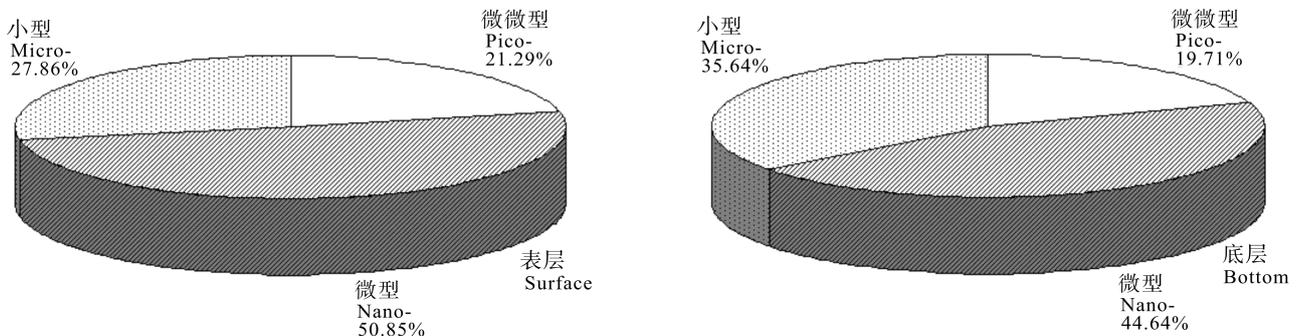


图 7 獐子岛海域表、底层海水不同粒径浮游植物的贡献

Fig.7 Composition of size-fractionated phytoplankton in surface and bottom seawater in the coastal area of Zhangzidao Island

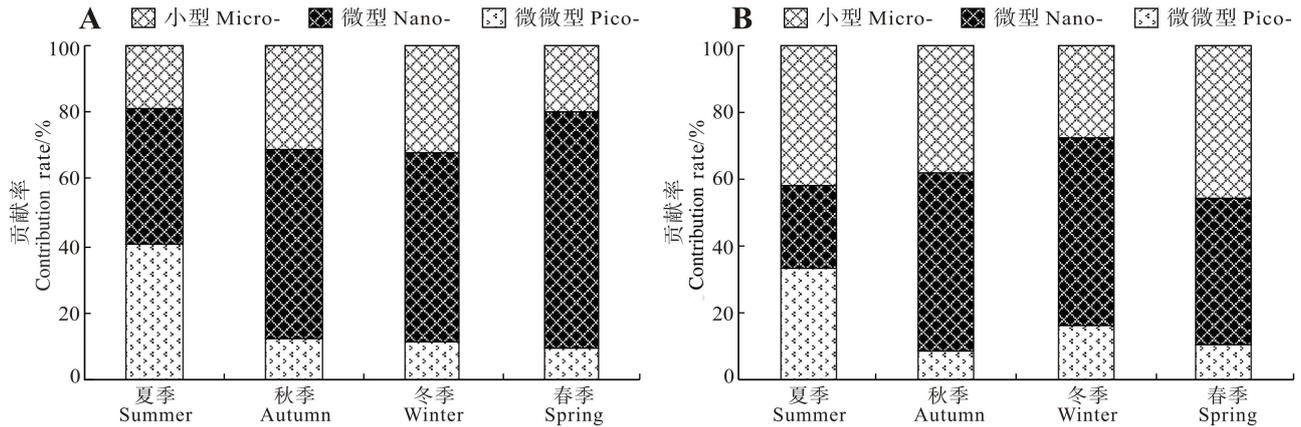


图8 不同季节獐子岛海域表(A)、底层(B)浮游植物的粒径结构  
Fig.8 Seasonal variation of size-fractionated phytoplankton in surface (A) and bottom (B) seawater in the coastal area of Zhangzidao Island

定于粒径差异。在光照、营养盐适宜条件下,粒径较大的浮游植物由于具有较高的内禀增长率,从而在浮游植物群落中具有竞争优势(Cerme *et al*, 2005);在光线较弱、营养盐匮乏条件下,粒径较小的浮游植物由于具有较大的比表面积,吸收营养盐和获取光量子的效率较高,从而在寡营养海域表现出竞争优势(Chen *et al*, 2000; 黄邦钦等, 2006)。獐子岛海域的营养盐水平属于贫营养型(张继红等, 2009),从浮游植物的粒径结构特点来看,秋、冬、春季表、底层浮游植物的粒径结构均表现为 nano-浮游植物占优势,符合学者们普遍认为的浮游植物粒径结构特征。底层水体不同粒径浮游植物叶绿素 *a* 与底层水温、悬浮颗粒有机物(POM)、营养盐等(未发表数据)环境因子典范对应分析(CCA)结果显示,  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  的 3 种形态无机营养盐对 nano-浮游植物有显著的影响,而水温、 $\text{NO}_2^-$  对 pico-浮游植物有显著的影响(图 9)。在獐子岛养殖海域,浮游植物粒径结构除了受到营养盐、温度等环境因子的影响外,虾夷扇贝的生理活动也是非常重要的控制因素。研究表明,浮游植物的群落结构受滤食性贝类摄食作用的下行控制(Top-down control)效应和营养盐等因素的上行控制(Bottom-up control)效应影响(Prins *et al*, 1995; 董双林等, 1999; Souchu *et al*, 2001),秋、冬、春季是虾夷扇贝的适宜生长季节,虾夷扇贝的摄食压力及其代谢产物对浮游植物生长的刺激作用两个过程,共同促成了该区域 nano-浮游植物占优势的特点。但值得注意的是,夏季,表、底层微型浮游植物所占的比例较大,分别达到 40.50%和 33.41%,这种现象可能与该季节北黄海冷水团的消长及其对虾夷扇贝摄食行为的影响(杜兵等, 1996)有关。北黄海冷水团引起的水温急剧波动导致虾夷扇贝生理活动异常,虾夷扇贝对浮游植

物的摄食压力减弱,水温成为控制浮游植物的主要影响因素,傅明珠等(2010)对南黄海 124°E 以西黄海冷水团水域 4 个季节的航次调查也发现,黄海冷水团水域浮游植物群落始终由粒径较小的 nano-和 pico-浮游植物占主导,但这种推测尚需要更多的研究加以证实。

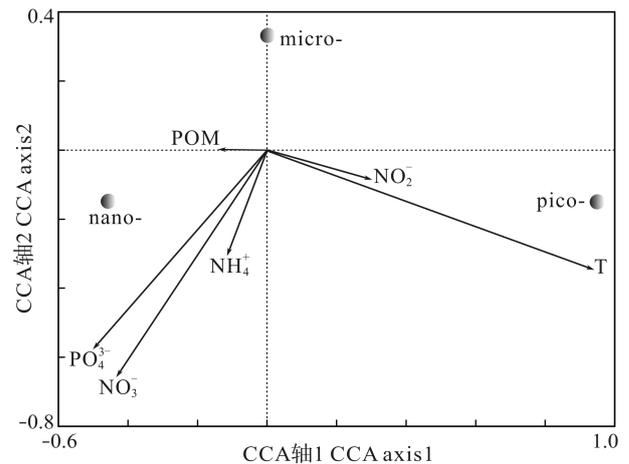


图9 獐子岛海域叶绿素 *a* 粒径与主要环境因子的典范对应分析

Fig.9 CCA analysis of size-fractionated Chl *a* and main environmental factors in the coastal area of Zhangzidao Island

### 3.2 獐子岛海域浮游植物光合固碳的碳流途径

研究表明,浮游植物光合作用形成颗粒态光合有机产物(Photosynthetically produced Particulate Organic Carbon, PPOC)的同时,还释放出一定数量的溶解态光合有机产物(Photosynthetically produced Dissolved Organic Carbon, PDOC)(焦念志等, 1994),通常用 PER(Percentage of Extracellular Release)来表征 PDOD 在总初级生产力中所占的比例。随着“微食物环”概念的提出,浮游植物光合作用过程中释放出的溶解态

有机物的归宿引起了人们的关注。在微食物环中, 溶解有机物被异养细菌利用, 并通过异养浮游细菌、原生动物、桡足类等的摄食关系使离开食物链的溶解有机物通过微食物环并入主食物链(Azam *et al*, 1983; Dupuy *et al*, 2000), 浮游植物释放的溶解有机物对细菌所需营养物质的贡献可达 73%(Peterson 1984)。已有的研究表明, 黄海海域 PER 约为 23.1%(刘诚刚, 2012)<sup>1)</sup>。根据本研究的结果, 獐子岛海域颗粒态光合有机产物 (PPOC) 约为(386.07±281.80) mg C/(m<sup>2</sup>·d), 底层 micro-、nano-、pico-组分对 PPOC 的平均贡献率分别为 35.64%、44.64%和 19.71%。假设虾夷扇贝在与浮游动物竞争摄食 nano-浮游植物方面占据绝对优势, 估算得出, 獐子岛海域光合作用产生的碳有 23.1%经过异养细菌利用进入微食物环, 15.16%的碳通过原生动物的摄食进入微食物环, 超过 38.3%的总初级生产通过微食物环

向高营养级传递并入经典食物链(图 10), 微食物环在獐子岛虾夷扇贝养殖生态系统中扮演着重要角色。但需要指出的是, 该估算是基于 nano-浮游植物全部被扇贝摄食的假设下得出的, 在复杂的生态系统食物链中, 虾夷扇贝与浮游动物在对 nano-浮游植物的摄食分配方面尚需进一步研究加以明确。此外, PDOC 和 pico-浮游植物初级生产要有效传递给虾夷扇贝, 需要经过原生动物这一中间环节(Le *et al*, 1997; Wong *et al*, 2003)。研究表明, 异养鞭毛虫、纤毛虫等原生动物具有较高的营养价值(碳氮比约等于 4), 可作为双壳类的食物来源(Kreeger *et al*, 1996; Dupuy *et al*, 1999; Takashi, 2011)。在这种情况下, 獐子岛海域虾夷扇贝对原生动物的摄食能力及利用效率对于实现碳在不同营养层次生物功能群间的高效流动至关重要, 虾夷扇贝与原生动物之间的摄食关系将是下一步的研究重点。

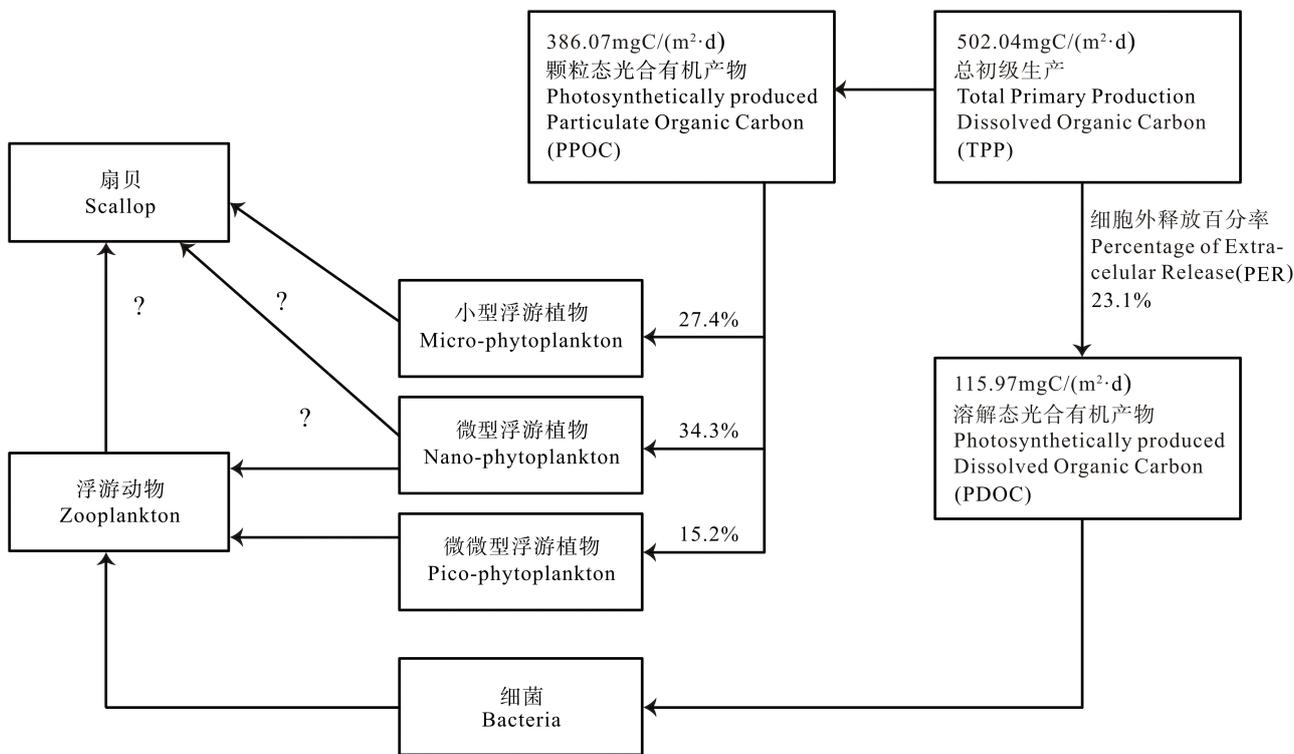


图 10 獐子岛海域浮游植物光合作用碳流途径  
Fig.10 Photosynthetic carbon flow pathway in the coastal area of Zhangzidao Island

参 考 文 献

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763-2007 海洋调查规范. 北京: 中国标准出版社, 2008

宁修仁. 海洋微型和微微型浮游生物. 东海海洋, 1997, 15(3): 60-64

张继红, 方建光, 蒋增杰, 等. 獐子岛养殖水域叶绿素含量时空分布特征及初级生产力季节变化. 海洋水产研究, 2008, 29(4): 22-28

张继红, 王巍, 蒋增杰, 等. 獐子岛养殖海域氮磷的分布特征. 渔业科学进展, 2009, 30(6): 88-96

1) 刘诚刚. 中国近海浮游植物光合溶解有机碳生产研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2012, 80-99

- 杜兵, 张义钧, 单毅春, 等. 北黄海底层冷水团的变化特征及其对外长山岛海区养殖扇贝死亡的影响. 海洋通报, 1996, 15(4): 17-28
- 黄邦钦, 刘媛, 陈纪新, 等. 东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布. 海洋学报, 2006, 28(2): 156-164
- 傅明珠, 孙萍, 王宗灵, 等. 黄海冷水团水域浮游植物群落粒级结构的季节变化. 海洋学报(中文版), 2010, 32(1): 120-129
- 焦念志, 王荣. 海洋初级生产光动力学及产品结构. 海洋学报, 1994, 18(5): 85-91
- 董双林, 王芳, 王俊, 等. 海湾扇贝对海水池塘浮游生物和水质的影响. 海洋学报, 1999, 21(6): 138-144
- 蒋增杰, 方建光, 王巍, 等. 乳山官家岛以东牡蛎养殖水域秋季海-气界面 CO<sub>2</sub> 交换通量研究. 水产学报, 2012, 36(10): 1592-1598
- Agawin NRS, Duarte CM, Agusti, S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. Limnol Oceanogr, 2000, 45(3): 591-600
- Azam F, Fenchel T, Field JG, *et al.* The ecological role of water-column microbes in the sea. Mar Ecol Prog Ser, 1983, 10(3): 257-263
- Cerme OP, Mara NE, Rodriguez J, *et al.* Large-sized phytoplankton sustain higher carbon-specific photosynthesis than smaller cells in a coastal eutrophic ecosystem. Mar Ecol Prog Ser, 2005, 297: 51-60
- Chen YLL. Comparisons of primary productivity and phytoplankton size structure in the marginal regions of southern East China Sea. Cont Shelf Res, 2000, 20(4): 437-458
- Dupuy C, Le Gall S, Hartmann HJ, *et al.* Retention of ciliates and flagellates by the oyster *Crassostrea gigas* in French Atlantic coastal ponds: protists as a trophic link between bacterioplankton and benthic suspension-feeders. Mar Ecol Prog Ser, 1999, 177: 165-175
- Dupuy C, Pastoureaud A, Ryckaert M, *et al.* Impact of the oyster *Crassostrea gigas* on a microbial community in Atlantic coastal ponds near La Rochelle. Aquat Microb Ecol, 2000, 22(3): 227-242
- Falkowski PG, Barber RT, Smetacek V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. Science, 1998, 281(5374): 200-206
- Froneman PW, Pakhomov EA, Balarin MG. Size fractionated phytoplankton biomass, production and biogenic carbon flux in the eastern Atlantic sector of the Southern Ocean in late austral summer 1997-1998. Deep-Sea Research II, 2004, 51: 2715-2729
- Kormas KA, Garametsi V, Nicolaidou A. Size-fractionated phytoplankton chlorophyll in an Eastern Mediterranean coastal system(Maliakos Gulf, Greece). Helgol Mar Res, 2002, 56: 125-133
- Kreeger DA, Newell RIE. Ingestion and assimilation of carbon from cellulolytic bacteria and heterotrophic flagellates by the mussels *Geukensia demissa* and *Mytilus edulis*(Bivalvia, Mollusca). Aquat Microb Ecol, 1996, 11: 205-214
- Le Gall S, Hassen MB, Le Gall P. Ingestion of a bacterivorous ciliate by the oyster *Crassostrea gigas*: protozoa as a trophic link between picoplankton and benthic suspension-feeders. Mar Ecol Prog Ser, 1997, 152: 301-306
- Peterson BJ. Synthesis of carbon stocks and flows in the open ocean mixed layer.//Hobbie JE, Williams PJ L, eds. 1984. Heterotrophic Activity in the Sea. New York: Plenum Press: 547-554
- Prins TC, Escaravage VL, Smaal AC, *et al.* Nutrient cycling and phytoplankton dynamics in relation to mussel grazing in a mesocosm experiment. Ophelia, 1995, 41: 289-315
- Souchu P, Vaquer A, Collos Y, *et al.* Influence of shellfish farming activities on the biogeochemical composition of the water column in Thanlagoon. Mar Ecol Prog Ser, 2001, 218: 141-152
- Takashi K. Microzooplankton as a food source for the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: seasonal variation in gut contents and food availability. Fisheries Sci, 2011, 77(6): 961-974
- Wong WH, Levinton JS, Twining BS, *et al.* Assimilation of micro- and mesozooplankton by zebra mussels: a demonstration of the food web link between zooplankton and benthic suspension feeders. Limnol Oceanogr, 2003, 48(1): 308-312

(编辑 江润林)

## Size-fraction of Phytoplankton and Photosynthetic Carbon Flow Pathway in the Coastal Area of Zhangzidao Island

JIANG Zengjie<sup>1</sup>, DU Meirong<sup>1</sup>, JIANG Xu<sup>1</sup>, LIANG Jun<sup>2</sup>, ZHAO Xuewei<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>,  
ZHANG Yuan<sup>2</sup>, ZHANG Xiaofang<sup>2</sup>, FANG Jianguang<sup>1①</sup>

(1. 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;

2. Zhangzidao Group CO., LTD, Dalian 116001)

**Abstract** To investigate the seasonal and spatial distribution of phytoplankton in terms of Chlorophyll *a* (Chl *a*) in the scallop *Patinopecten yessoensis* aquaculture area of Zhangzidao island, northern China, four field investigations were conducted in June 2011, October 2011, December 2011 and April 2012. Chl *a* was further divided into pico-phytoplankton (< 2 μm), nano-phytoplankton (2–20 μm) and micro-phytoplankton (>20 μm) size fractions. Results showed that the concentration of Chl *a* in the surface and bottom seawater of Zhangzidao area ranged from 0.07–6.28 μg/L and 0.16–5.28 μg/L, respectively, and the related average was (1.60±1.38) and (1.31±1.10) μg/L. There were significant differences in the concentration of Chl *a* among different seasons ( $P<0.05$ ). The differences of Chl *a*'s concentration between surface and bottom seawater were highly significant during autumn and spring ( $P<0.01$ ). Nano-phytoplankton was the most important size-fraction regardless of surface and bottom seawater and accounted for 50.85% and 44.64% of the total phytoplankton, respectively. CCA analysis of the main environmental factors showed that  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  and  $\text{NH}_4^+$  contributed greatly to nano-phytoplankton while seawater temperature and  $\text{NO}_2^-$  gave a great contribution to pico-phytoplankton. The annual photosynthetically produced particulate organic carbon (PPOC) in this area ranged from 40.31 to 1017.64 mg C/(m<sup>2</sup>·d) with an average value of (386.07±281.80) mg C/(m<sup>2</sup>·d). More than 38.3% of the fixed carbons by the photosynthesis were taken by the classical food web via the microbial food loop. These results highlight the important role of the microbial loop in aquaculture system of Zhangzidao coastal area.

**Key words** Size-fraction; Phytoplankton; Microbial food loop; *Patinopecten yessoensis*; Zhangzidao Island

① Corresponding author: FANG Jianguang, E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn