



桑沟湾养殖水域微微型浮游生物的时空分布特征及环境影响因素

李风雪¹, 杜美荣¹, 高亚平¹, 姜妮妮¹, 李文豪^{1,2}, 董世鹏^{1,2},
侯兴^{1,2}, 王军威³, 张义涛³, 张志新⁴, 蒋增杰^{1,5*}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所,

农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

3. 荣成楮岛水产有限公司, 山东 荣成 264312;

4. 荣成市海洋发展局, 山东 荣成 264300;

5. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为了解规模化贝类养殖水域微微型浮游生物的时空分布特征, 于2017年4、7、11月和2018年1月在北方典型规模化养殖海湾——桑沟湾开展了4个航次的大面积调查, 利用流式细胞仪测定了聚球藻、微微型真核浮游生物和异养细菌3种微微型浮游生物的丰度, 并分析了其与环境因子的关系。结果显示, 聚球藻、微微型真核浮游生物和异养细菌的丰度均值分别为 $(2.93 \pm 2.29) \times 10^3$ 、 $(13.84 \pm 12.81) \times 10^3$ 和 $(1.03 \pm 0.28) \times 10^6$ 个/mL, 存在极显著的季节差异和空间分布的不均匀性。聚球藻春季主要分布于桑沟湾的西北、西南和湾外; 夏季和冬季主要分布于湾外的大片海域; 秋季则主要集中于西北近岸。微微型真核浮游生物四季均集中于湾内近岸海域, 呈现从湾内向湾外递减的趋势。异养细菌夏季在湾外和西部近岸有一大一小两个高值区; 春季、秋季和冬季均集中于西部近岸海域。微微型浮游生物与环境因子的相关性分析表明, 3种微微型浮游生物的丰度均与叶绿素 a 浓度、温度和颗粒有机物呈显著正相关, 而与溶解氧存在较为密切的负相关关系; 微微型真核浮游生物与硝酸盐、铵盐呈显著正相关; 聚球藻与磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐无显著关系。

关键词: 聚球藻; 微微型真核浮游生物; 异养细菌; 贝类养殖; 桑沟湾

中图分类号: S 932.8

文献标志码: A

海洋中粒径为 0.2~2.0 μm 的浮游生物被称为微微型浮游生物^[1]。按代谢类型可以分为自养型, 主要包括原绿球藻 (*Prochlorococcus*)、聚球藻 (*Synechococcus*)、微微型真核浮游生物 (Picoeukaryotes) 以及异养型微生物 [主要为异养细菌 (Het-

erotrophic bacteria)]^[2]。小的个体具有较高的比表面积, 这使它们具有代谢强、繁殖快、能量转换效率高等生态特点^[3-4], 据报道, 海洋中 50% 以上的初级生产力来源于粒径小于 3.0 μm 的浮游植物^[5-6]。同时, 微微型浮游生物也是海洋微

收稿日期: 2019-07-31 修回日期: 2019-10-31

资助项目: 科技部政府间国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0112600); 国家自然科学基金 (41676147); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室渔业科技青年人才计划 (2018-MFS-T13); 山东省“泰山学者青年专家计划” (tsqn201909166); 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项 (2018SDKJ0502); 国家贝类产业技术体系专项 (CARS-49)

通信作者: 蒋增杰, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

食物环的重要组成部分^[7-8], 它们通过原生动物(主要为微型异养鞭毛虫和纤毛虫)的摄食作用进入海洋经典食物网, 在生态系统的物质循环和能量流动过程中发挥着非常重要的作用。

桑沟湾位于山东半岛东端, 面积约 133.3 km², 三面环陆, 东临黄海, 为半封闭海湾, 湾口宽约 11.5 km^[9], 是我国北方典型的规模化海水养殖海湾。经过 30 多年的发展, 桑沟湾已经形成了以滤食性贝类, 如长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)、栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*); 大型藻类, 如海带 (*Saccharina japonica*) 为主要养殖种类的多营养层次综合养殖模式, 并由湾内向湾外依次为贝类养殖区、贝藻综合养殖区、海带养殖区, 且海带的养殖已经扩展到了湾口外的大片海域^[10-11]。入湾的河流主要有崖头河、沽河和桑沟河等^[9]。课题组前期对桑沟湾浮游植物粒径结构的调查分析中发现, 微微型浮游植物在总浮游植物中占据一定的比例, 秋季的贡献率达到了 35.88%^[12]。微微型浮游植物是微微型浮游生物的重要组成

部分, 也是微食物环的一个重要起点, 目前, 国内对规模化海水养殖区微微型浮游生物的时空分布特征以及微食物环的生态作用关注的较少且不够深入。聚球藻、微微型真核浮游生物和异养细菌等微微型浮游生物是微食物环的主要组分, 因此, 本实验于 2017—2018 年对桑沟湾海域开展了 4 个航次的大面积调查, 对桑沟湾海域的聚球藻、微微型真核浮游生物和异养细菌 3 种微微型浮游生物的碳生物量、丰度的时空分布特征及其环境调控机制进行了初步研究, 以期为深入认识桑沟湾海域微食物环在规模化滤食性贝类养殖系统中的生态作用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 调查航次和站位布设

在桑沟湾布设了 21 个采样站位, 于 2017 年 4、7、11 月和 2018 年 1 月开展了 4 个航次的大面积调查 (图 1)。

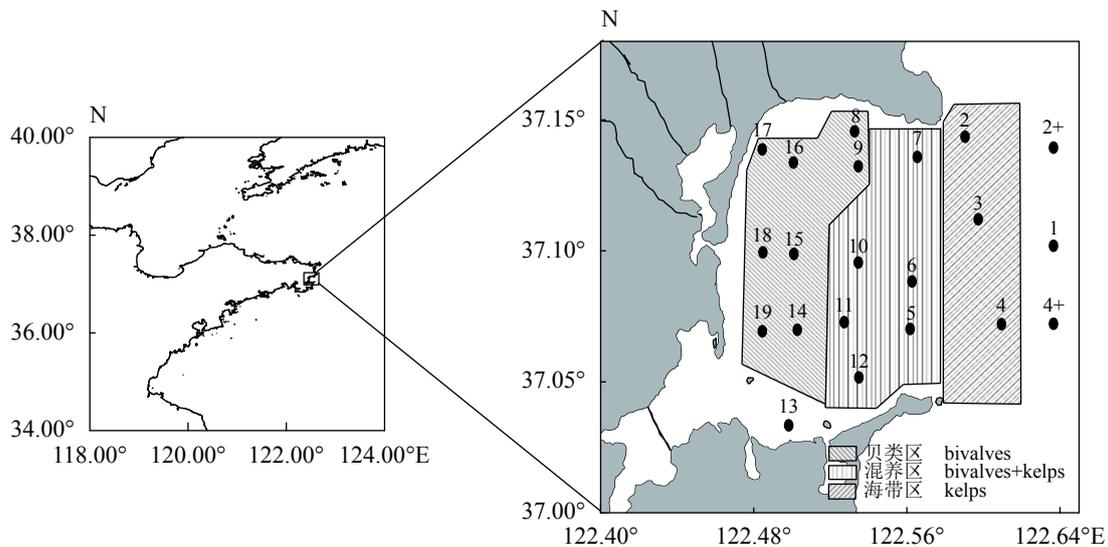


图 1 桑沟湾海域调查站位

Fig. 1 Investigation stations in Sanggou Bay

1.2 样品采集和理化参数监测

用 5 L Niskin 采水器采集表层水 (水下 1 m), 水样经 20 μm 筛绢过滤后准确移取 4 mL 于 5 mL 无菌冻存管内, 加入多聚甲醛固定, 使其终浓度为 1%。固定后的样品保存于 -80 °C 超低温冰箱直至检测。水温 (T)、pH、盐度 (S)、溶解氧 (DO) 等理化环境参数利用便携式水质分析仪 (美国 YSI 公司, Professional Plus) 现场测定。同时

测定各站位的营养盐数据 (磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐)^[13] 和颗粒有机物含量^[14] 作为化学影响因子分析。

1.3 微微型浮游生物丰度测定及碳生物量的估算

使用流式细胞仪 (FACSVantage SE, Becton Dickinson) 对微微型浮游生物的丰度进行检测分析, 激发光为 488 nm, 测定过程中使用 2 μm 微球 (Polysciences Inc) 作为标准内参。通过对聚球

藻和微微型真核藻的特征荧光检测,从而得到其丰度值。对于异养细菌这种本身没有色素体的个体,先通过核酸染料 SYBR Green I(Molecular Probes) 进行染色,再对其进行检测。各类微微型浮游生物的碳生物量由其丰度乘以碳转换因子得出,碳转换因子随微微型浮游生物的种类而异。本实验中聚球藻的碳转换因子为 120 fgC/个,微微型光合真核生物的碳转换因子为 239 fgC/个,异养浮游细菌的碳转换因子为 20 fgC/个^[15]。

1.4 数据分析

使用 Surfer 11 软件绘制不同季节表层微微型浮游生物丰度平面分布图;用 SPSS 19.0 软件分析微微型浮游生物与理化因子之间的相关性,显著性水平设为 $P<0.01$ 。

2 结果

2.1 桑沟湾表层海水主要理化生物环境因子的时空变化特征

叶绿素 *a*(Chl. *a*) 浓度的周年变化范围为 0.74~3.27 $\mu\text{g/L}$, 平均值 $(1.90\pm 1.28) \mu\text{g/L}$, 具有明显的季节变化,夏季浓度最大,春季浓度最小(表 1)。表层水温(T)年变化范围 9.14~22.40 $^{\circ}\text{C}$, 平均值 $(12.24\pm 7.02) ^{\circ}\text{C}$, 其中,夏季温度最高,冬季最低。盐度(S)的年变化范围为 31.59~32.71, 平均值 31.59 ± 1.59 , 季节变化不大。溶解氧(DO)年变化范围为 7.41~10.81 mg/L, 平均值 $(9.03\pm 1.32) \text{mg/L}$ 。颗粒有机物(POM)浓度夏季最大,达到了 10.52 g/L, 冬季最小,仅为 4.78 g/L, 平均值 $(7.35\pm 2.14) \text{g/L}$ 。磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和溶解无机氮(DIN)的年变

化范围分别为 0.14~0.76 和 4.30~13.59 $\mu\text{mol/L}$, 平均值分别为 (0.33 ± 0.25) 和 $(9.55\pm 3.48) \mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的季节变化为冬季>秋季>春季>夏季; DIN 为秋季>冬季>夏季>春季。DIN 中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 为要存在形式,占溶解性无机氮平均含量的 60.6%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 分别占溶解性无机氮平均含量的 30.6%和 8.8%。

2.2 桑沟湾表层海水微微型浮游生物丰度的时空分布特征

聚球藻的时空分布特征 从季节变化来看,桑沟湾海域表层聚球藻丰度的年变化范围为 $(0.90\sim 6.67)\times 10^3$ 个/mL, 均值为 $(2.93\pm 2.29)\times 10^3$ 个/mL, 季节差异极显著($P<0.01$)。从平面分布来看,春季聚球藻丰度的变化范围为 $(0.53\sim 2.28)\times 10^3$ 个/mL, 均值为 $(1.23\pm 0.51)\times 10^3$ 个/mL, 主要集中于湾西北、西南近岸和湾外大片海域;夏季的变化范围为 $(2.38\sim 16.81)\times 10^3$ 个/mL, 均值为 $(6.67\pm 3.84)\times 10^3$ 个/mL, 夏季聚球藻主要集中于湾外和湾南部近岸海域,核心区域丰度较低;秋季的变化范围为 $(1.24\sim 7.24)\times 10^3$ 个/mL, 均值为 $(2.93\pm 1.44)\times 10^3$ 个/mL, 主要集中于湾西北近岸海域;冬季,调查海域聚球藻丰度的变化范围为 $(0.21\sim 2.22)\times 10^3$ 个/mL, 均值为 $(0.90\pm 0.43)\times 10^3$ 个/mL, 主要分布于湾外,呈现从湾内向湾外逐渐增加的趋势(图 2)。

微微型真核浮游生物的时空分布特征 从季节变化来看,微微型浮游生物丰度的年变化范围为 $(3.10\sim 35.06)\times 10^3$ 个/mL, 均值为 $(13.84\pm 12.81)\times 10^3$ 个/mL, 季节差异极显著($P<0.01$)。春、夏、秋、冬微微型真核浮游生物的变化范围

表 1 桑沟湾环境因子

Tab. 1 Related environmental parameters in the Sanggou Bay

指标 index	春季 spring	夏季 summer	秋季 autumn	冬季 winter	年平均 annual averages
叶绿素 a ($\mu\text{g/L}$) Chl. <i>a</i>	0.74±0.64	3.27±0.60	2.74±0.81	0.88±0.31	1.90±1.11
温度/ $^{\circ}\text{C}$ T	9.14±2.32	22.40±3.04	14.14±0.98	3.26±0.73	12.24±7.02
盐度 S	32.31±0.03	31.84±0.08	29.52±0.15	32.71±0.08	31.59±1.24
溶解氧/(mg/L) DO	9.72±0.34	7.41±0.21	8.16±0.50	10.81±0.46	9.03±1.32
颗粒有机物/(g/L) POM	7.89±1.03	10.52±4.30	6.22±1.19	4.78±1.26	7.35±2.14
酸碱度 pH	7.84±0.13	8.02±0.08	8.06±0.09	8.16±1.30	8.02±0.12
磷酸盐/($\mu\text{mol/L}$) $\text{PO}_4\text{-P}$	0.21±0.21	0.14±0.12	0.21±0.16	0.76±1.57	0.33±0.25
溶解无机氮/($\mu\text{mol/L}$) DIN	4.30±1.19	8.80±5.53	13.59±3.18	11.52±3.02	9.55±3.48

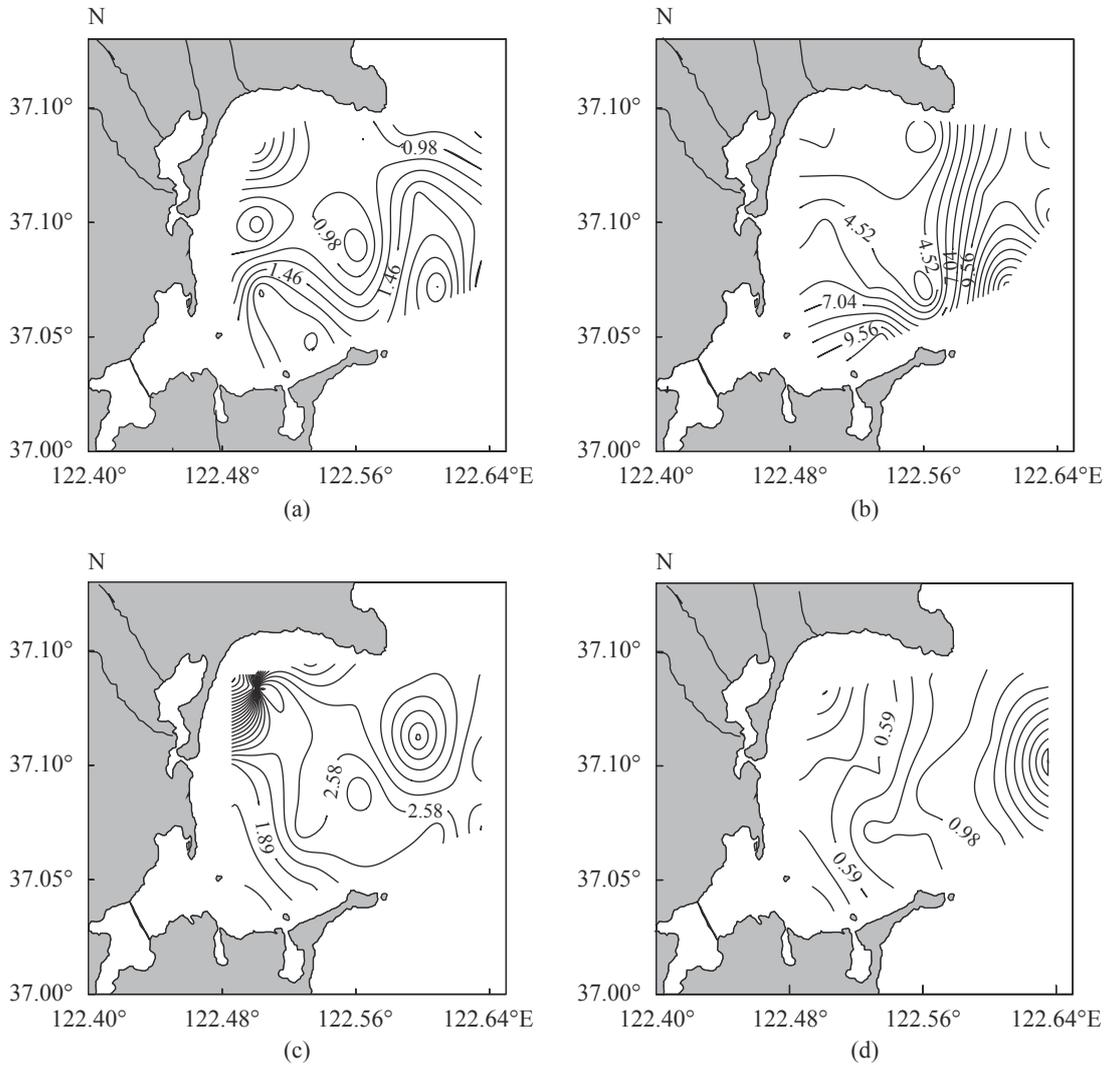


图 2 桑沟湾海域表层聚球藻丰度的时空分布特征 ($\times 10^3$ 个/mL)

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季, 下同

Fig. 2 Seasonal and spatial variations of *Synechococcus* abundance in the sea surface layer of Sanggou Bay

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, the same below

分别为 $(0.49\sim 20.24)\times 10^3$ 、 $(3.47\sim 84.73)\times 10^3$ 、 $(1.67\sim 45.75)\times 10^3$ 和 $(1.01\sim 11.70)\times 10^3$ 个/mL, 均值分别为 $(4.39\pm 5.48)\times 10^3$ 、 $(35.06\pm 28.54)\times 10^3$ 、 $(12.82\pm 12.49)\times 10^3$ 和 $(3.10\pm 3.00)\times 10^3$ 个/mL。从平面分布来看, 微微型真核浮游生物四季均集中于湾内近岸海域, 呈现从湾内向湾外逐渐递减的趋势(图 3)。

异养细菌的时空分布特征 从季节变化来看, 桑沟湾海域表层异养细菌的年变化范围为 $(0.58\sim 1.28)\times 10^6$ 个/mL, 均值为 $(1.03\pm 0.28)\times 10^6$ 个/mL, 季节差异极显著 ($P<0.01$)。春、夏、秋、冬季异养细菌的变化范围分别为 $(0.55\sim 1.86)\times 10^6$ 、 $(0.81\sim 1.73)\times 10^6$ 、 $(0.76\sim 2.14)\times 10^6$ 、 $(0.37\sim 1.21)\times 10^6$ 个/mL, 均值分别为 $(1.04\pm 0.37)\times 10^6$ 、 $(1.28\pm 0.29)\times 10^6$ 、 $(1.22\pm 0.39)\times 10^6$ 、 $(0.58\pm 0.21)\times 10^6$ 个/mL。

夏季异养细菌主要分布于湾外和西南近岸, 形成一大一小两个高值区; 春、秋、冬季的分布趋势与微微型真核浮游生物的分布相同, 呈现从湾内向湾外递减的趋势。从总体来看, 聚球藻和微微型真核浮游生物丰度的周年变化基本呈现相同的趋势, 即春季和冬季丰度低, 夏季丰度显著增高; 异养细菌的丰度冬季最低, 其他季节基本保持较一致的水平(图 4)。

2.3 桑沟湾表层微微型浮游生物生物量的季节变化

通过碳转换因子, 将 3 种微微型浮游生物的丰度转换为碳生物量。聚球藻生物量的最高值和最低值分别在夏季和冬季, 分别为 0.80 和

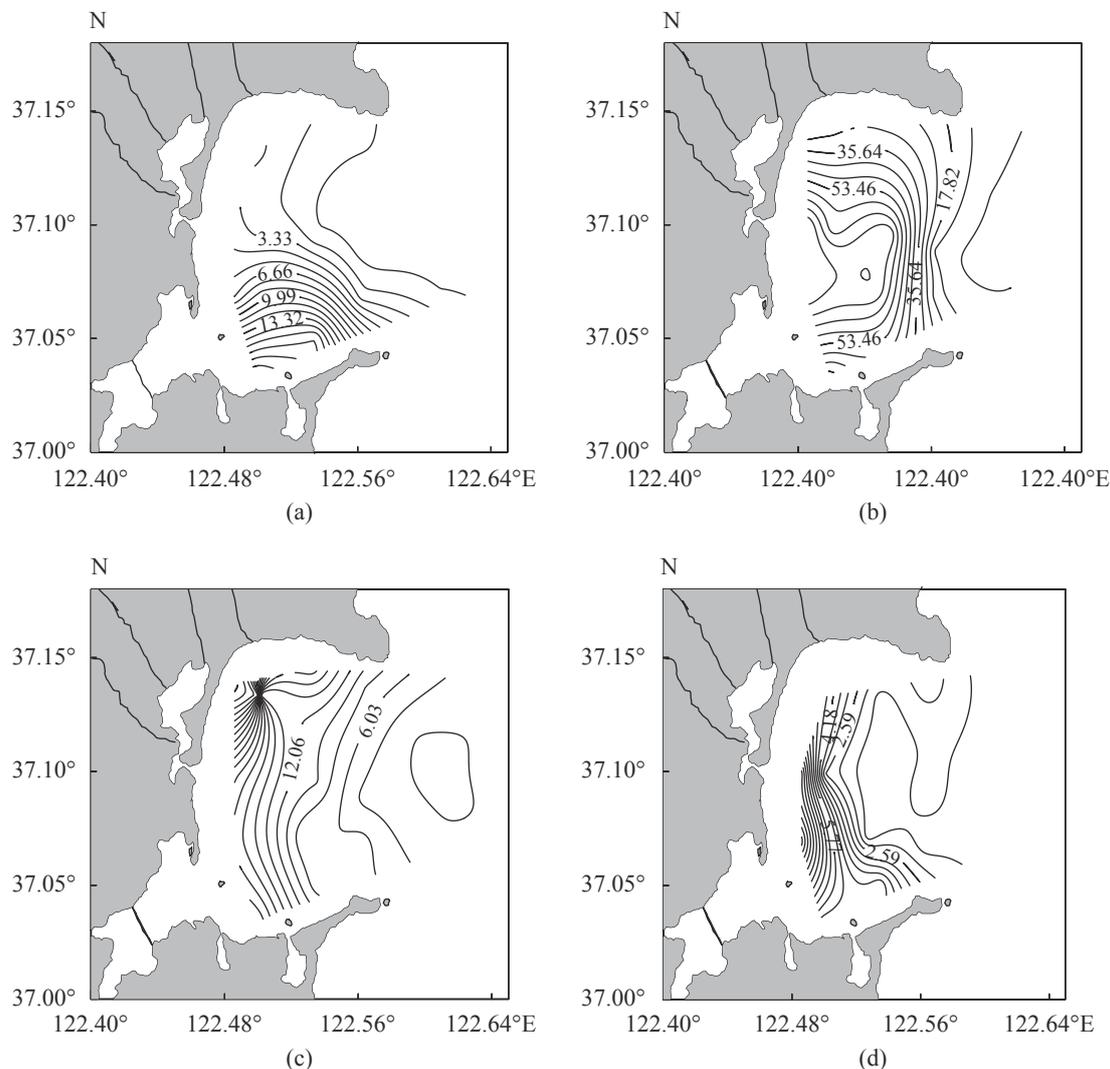


图3 桑沟湾海域表层微微型真核浮游生物丰度的时空分布特征 ($\times 10^3$ 个/mL)

Fig. 3 Seasonal and spatial variations of picoeukaryotes abundance in the sea surface layer of Sanggou Bay

0.11 $\mu\text{g C/L}$, 全年生物量变化差异极显著 ($P < 0.01$)。微微型真核浮游生物生物量在夏季最高, 达到了 8.38 $\mu\text{g C/L}$, 秋季迅速下降到 3.06 $\mu\text{g C/L}$, 冬季降到最低值, 仅为 0.74 $\mu\text{g C/L}$ 。异养细菌生物量在夏季和秋季较高, 分别为 25.58 和 24.37 $\mu\text{g C/L}$, 冬季较低, 为 11.51 $\mu\text{g C/L}$ (图 5)。从总体来看, 聚球藻、微微型真核浮游生物、异养细菌的生物量均夏季最高、冬季最低。4 个航次在 3 种微微型浮游生物的碳生物量中, 异养细菌始终占主导地位, 占总微微型浮游生物生物量的 73.60%~94.56%; 微微型真核浮游生物的含量次之, 为 4.77%~24.11%; 聚球藻的贡献率最小, 仅占总微微型浮游生物生物量的 0.67%~2.30%。

2.4 微微型浮游生物丰度与环境因子的关系

微微型浮游生物与环境因子的相关性分析

结果表明, 不同微微型浮游生物丰度受环境因子的影响程度不同, 并且微微型浮游生物之间相互影响、相互作用 (表 2)。聚球藻、微微型真核浮游生物和异养浮游细菌的丰度均与 Chl. *a* 浓度、温度和颗粒有机物呈显著正相关关系, 而与溶解氧存在较为密切的负相关关系。聚球藻与磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐无显著关系, 微微型真核浮游生物与硝酸盐、铵盐呈显著正相关。

3 讨论

本结果显示, 聚球藻、微微型真核浮游生物、异养细菌均表现为冬季丰度最低, 春季略有上升, 到了夏季呈现爆发式增长, 秋季略有下降的趋势。温度随季节变化为微微型浮游生物带来最为直接的影响, 使它们有着明显的季

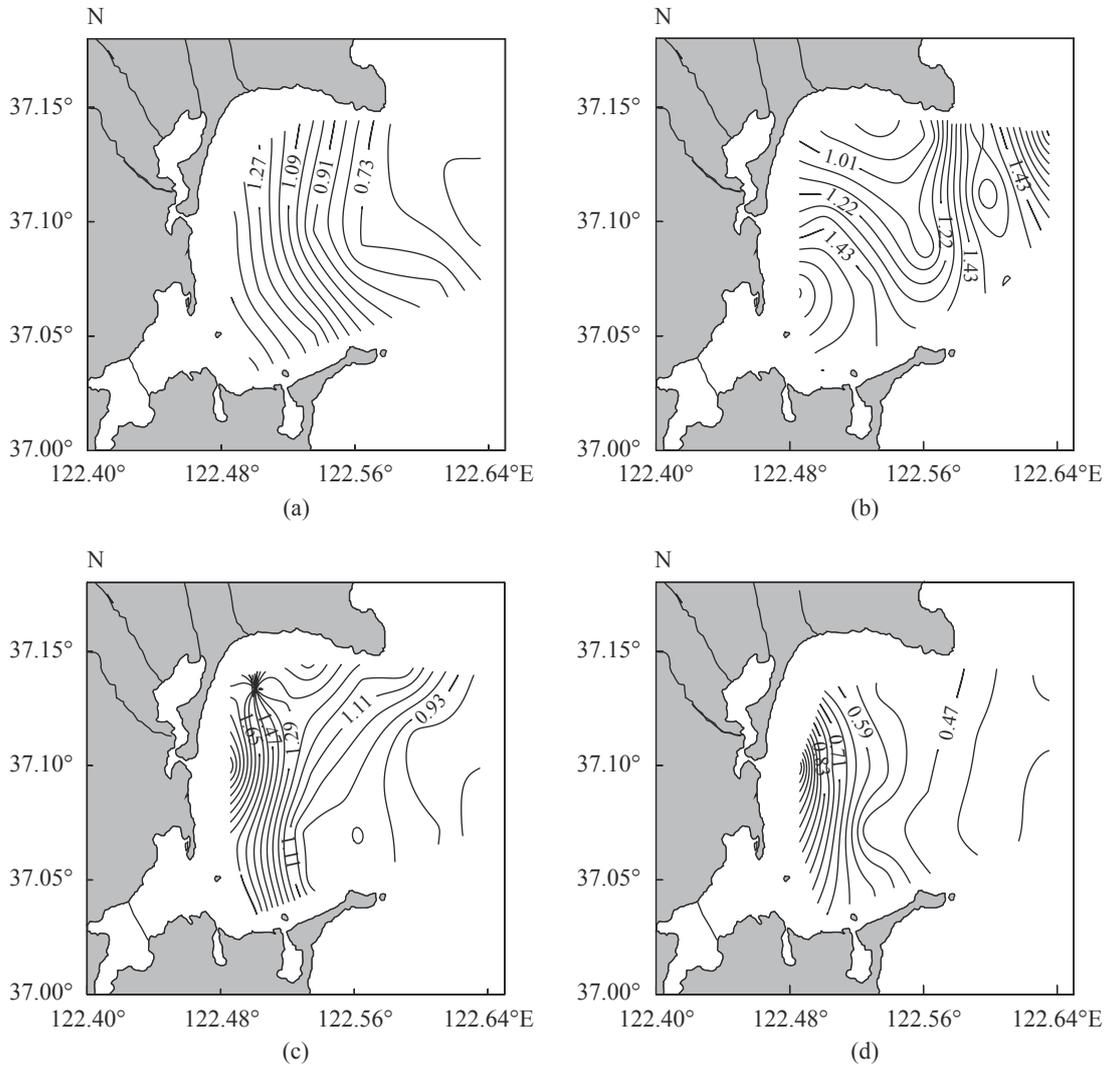


图 4 桑沟湾海域表层异养细菌丰度的时空分布特征 ($\times 10^6$ 个/mL)

Fig. 4 Seasonal and spatial variations of heterotrophic bacteria abundance in the sea surface layer of Sanggou Bay

节变化特征, 这与赵燕楚等^[16]2013年对桑沟湾微微型浮游生物调查结果一致。与环境因子的相关性分析显示, 微微型真核浮游生物与硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐呈显著正相关, 聚球藻与磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐均无显著关系。这可能是由于与微微型真核浮游生物相比, 聚球藻粒径较小, 具有较高的比表面积^[17], 有利于营养盐的吸收, 使得它们在与粒径较大的浮游植物的营养盐竞争中处于优势地位, 所以营养盐并不是聚球藻的主要限制因子, 在桑沟湾养殖环境下, 它们对营养盐的依赖较小。相关关系分析结果表明, 自养微微型浮游生物与异养细菌呈显著正相关, 这与白晓歌^[18]对西太平洋的研究、乐凤凤等^[19]对长江口及邻近海域的研究结果一致。一方面, 自养微微型浮游生物利用无机营养物生长, 同时将无机营养物转化为

有机营养成分, 这些增加的有机营养物被异养细菌利用, 使其快速生长, 丰度随之升高^[20-21]。与之同时, 异养细菌的代谢过程产生大量的无机营养物质, 这些物质又可以维持自养微微型浮游生物的生长^[18]。另一方面, 异养细菌数量增多, 稀释了单位面积自养微微型浮游生物浓度, 导致其捕食者(主要为微型异养鞭毛虫)与其相遇机率降低, 从而降低了对自养微微型浮游生物的捕食率, 较低的捕食压力和较高的生长率导致自养微微型浮游生物的丰度迅速升高^[22]。

从平面分布来看, 聚球藻除了秋季主要分布于桑沟湾西北近岸以外, 其他季节均分布于湾外的海带养殖区。微微型真核浮游生物4季均分布于湾内贝类养殖区。形成这种分布的原因推测与桑沟湾的养殖活动有关。一方面, 微微型浮游生物个体微小, 不能被滤食性贝类有效

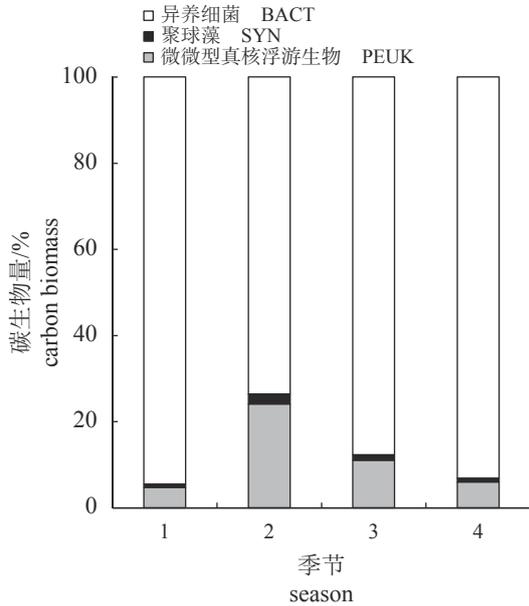


图5 桑沟海域表层 SYN、PEUK、BACT 对微微型浮游生物总生物量的贡献

1. 春季, 2. 夏季, 3. 秋季, 4. 冬季

Fig. 5 Contribution of SYN, PEUK and BACT to the picoplankton biomass in the surface layer of Sanggou Bay

1. spring, 2. summer, 3. autumn, 4. winter; SYN. *Synechococcus*, PEUK. picoeukaryotes, BACT. heterotrophic bacteria, the same below

摄食, 但它们可以为微型浮游动物 (主要为微型异养鞭毛虫和纤毛虫) 提供食物来源^[23]。贝类对微型浮游动物有较大的摄食压力, 间接导致了在贝类养殖区内鞭毛虫和纤毛虫对微微型浮游生物的摄食压力的减小^[24]。与聚球藻相比, 微微型真核浮游生物是微型浮游动物主要的碳来源^[25], 因此微微型真核浮游生物的丰度湾内高于湾外。另一方面, 通过聚球藻与微微型真核浮游生物的分布对比, 可以看出它们之间存在明显的空间“错位分布”现象, 在浙江省象山港^[26]、南极海域^[27]及台湾海峡^[28]也观测到了聚球藻与微微型真核浮游生物空间的“错位分布”, 这种现象可能

与微微型浮游植物各类群对生存空间的互补性因素有关。桑沟湾湾内近岸海域是贝类养殖区, 贝床沉积物释放氮、硅及磷等营养物质^[29], 使得这一区域营养丰富; 在湾外, 海带的养殖消耗大量营养盐, 营养物质匮乏。与环境因子的相关性分析表明, 微微型真核浮游生物与硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐呈显著正相关, 聚球藻与磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐均无显著关系。所以微微型真核浮游生物主要集中于近岸的贝类养殖区, 聚球藻主要分布于湾外的海带养殖区。

对渤海、辽东湾、黄海、青岛近海、胶州湾、南海北部的研究显示, 异养细菌无论是丰度还是生物量均在3种微微型浮游生物中占据优势, 若仅考虑自养微微型浮游生物, 除去春季为微微型真核浮游植物占优势外, 其他季节均为聚球藻占主要地位(表3)^[15, 17, 30-34]。主要原因是相较于微微型真核浮游生物, 聚球藻粒径较小, 具有较低的营养盐半饱和吸收常数, 从而在寡营养海域占据主要地位。但是, 聚球藻的最适生长温度为17~25℃^[35], 春季温度较低, 限制了聚球藻的生长, 从而春季微微型真核浮游生物占据了优势。对桑沟湾的4个航次调查发现, 微微型真核浮游生物的丰度始终超过聚球藻, 赵燕楚等^[16]2013年对桑沟湾微微型浮游生物的调查也出现这种规律, 这与周围其他海域的研究结果相反, 出现这种现象的原因推测主要与桑沟湾的贝藻养殖活动有关。从桑沟湾不同养殖区域微微型真核浮游生物占微微型自养浮游生物的比例来看, 贝类养殖区、混养区、海带养殖区分别为95%、92%、57%, 表明桑沟湾的养殖活动是影响聚球藻和微微型真核浮游生物占比的主要原因。

在本次调查中, 异养细菌的丰度和生物量在3种微微型浮游生物中均占据绝对优势。在微食物环中, 异养细菌不仅是分解者, 也充当着

表2 微微型浮游生物丰度与环境因子的 Pearson 相关性分析

Tab. 2 Pearson correlation analysis between picoplankton abundance and environmental parameters

物种 species	叶绿素a Chl. a	温度 T	盐度 S	溶解氧 DO	颗粒 有机物 POM	酸碱度 pH	磷酸盐 PO ₄ -P	硝酸盐 NO ₃ -N	亚硝酸盐 NO ₂ -N	铵盐 NH ₄ -N	异养细菌 BACT
聚球藻 SYN	0.48**	0.63**	0.16	0.62**	0.50**	0.02	0.24	0.51	0.11	0.18*	0.45**
微微型真核浮游生物 PEUK	0.51**	0.67**	0.11	0.55**	0.27*	0.01	0.12	0.46**	0.54*	0.13**	0.51**
异养细菌 BACT	0.42**	0.59**	0.40**	0.56**	0.30**	0.06	0.26*	0.07*	0.08	0.02*	

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

Notes: **. significant correlation at 0.01 level (bilateral), *. significant correlation at 0.05 level (bilateral)

表 3 桑沟湾海域与其他海区微微型浮游植物丰度的比较

Tab. 3 Comparison of the picoplankton abundance between the Sanggou Bay and other sea areas

海区 sea area		聚球藻/(个/mL) SYN	微微型真核 浮游生物/(个/mL) PEUK	聚球藻/微微型真 核浮游生物 SYN/PEUK	调查时间 investigation time	文献 reference
渤海 Bohai Sea		6.45×10^2	2.80×10^3	0.23	2010-04	[31]
		1.38×10^4	7.20×10^3	1.92	2011-06	
		5.31×10^4	5.17×10^3	10.27	2010-09	
		7.61×10^2	3.95×10^2	1.93	2011-12	
辽东湾 Liaodong Bay		5.90×10^3	6.37×10^2	9.26	2007-04	[34]
		1.89×10^4	3.79×10^3	4.99	2006-07	
		9.11×10^3	9.55×10^2	9.54	2007-10	
		7.55×10^3	6.24×10^2	12.10	2006-11	
北黄海 the North Yellow Sea		3.16×10^4	1.42×10^3	22.25	2006-07	[15]
		2.16×10^4	4.59×10^3	4.71	2007-10	
		4.31×10^3	2.34×10^3	1.84	2007-01	
南黄海 the South Yellow Sea		0.70×10^4	1.20×10^4	0.58	2007-04	[32]
		6.20×10^4	1.00×10^4	6.20	2006-07	
		5.70×10^4	0.60×10^4	9.50	2007-11	
		1.10×10^4	0.60×10^4	1.83	2007-01	
青岛近海 the coastal waters of Qingdao		5.43×10^3	2.93×10^4	0.19	2007-04	[17]
		2.24×10^4	1.86×10^3	12.04	2006-08	
		1.96×10^4	8.34×10^3	2.35	2007-11	
		8.83×10^3	4.20×10^3	2.10	2007-01	
胶州湾 Jiaozhou Bay		1.11×10^4	1.66×10^4	0.67	2010-04	[30]
		2.17×10^4	1.24×10^3	17.50	2010-08	
		1.96×10^4	6.66×10^3	2.94	2010-10	
		5.04×10^3	4.79×10^3	1.05	2011-01	
桑沟湾 Sanggou Bay		0.05×10^3	67.69×10^3	0.00	2013-04	[16]
		12.75×10^3	13.91×10^3	0.92	2013-07	
		1.64×10^3	5.04×10^3	0.33	2013-10	
		0.70×10^3	11.29×10^3	0.06	2014-01	
长江口及邻近海域 Changjiang River Estuary and its adjacent sea areas		69.34×10^3	23.56×10^3	2.94	2006-08	[15]
		1.08×10^3	1.54×10^3	0.70	2006-10	
南海北部 the northern South China Sea		5.00×10^4	1.80×10^3	27.78	1999-08	[33]
桑沟湾※ Sanggou Bay		1.23×10^3	4.39×10^3	0.28	2017-04	
		6.67×10^3	35.06×10^3	0.19	2017-07	
		2.93×10^3	12.82×10^3	0.23	2017-11	
		0.90×10^3	3.10×10^3	0.29	2018-01	

注: ※为本研究检测的微微型浮游生物丰度数据

Notes: ※ represent the abundance data of picoplankton detected in this paper

中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

<https://www.china-fishery.cn>

生产者的角色, 它们摄取溶解有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 构成二次生产^[36]。浮游植物光合作用产生的溶解有机碳 (photosynthetically produced dissolved organic carbon, PDOC) 是异养细菌生长所需有机物质的重要来源^[37], 多数情况下, PDOC 对总初级生产力的贡献 (percentage of extracellular release, PER) 为 3%~45%, 平均水平约 20%^[38]。有研究者估算, 在渤海海域 PDOC 可支持约 19.12% 的异养细菌的碳需求^[39]。但在具体研究中, 不同区域及不同环境条件下 PER 的值变化非常大, 并且目前的研究十分缺乏对规模化养殖海域 PER 值的测定。PER 直接影响着 PDOC 对异养细菌碳贡献的确定, 对规模化贝类养殖海域的 PER 值进行测定, 明确 PDOC 在该海域中占总初级生产力的比例, 对贝类养殖生态系统中, PDOC 对异养细菌的碳贡献及微食物环的研究具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] Sieburth J M N, Smetacek V, Lenz J. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions[J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(6): 1256-1263.
- [2] 屈佩, 王宗灵, 庞敏, 等. 夏季南黄海主要环境因子对微小型浮游生物分布影响[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 176-187.
Qu P, Wang Z L, Pang M, *et al.* Influence of environmental factors on picoplankton in the southern Yellow Sea in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(4): 176-187(in Chinese).
- [3] Li W K W, Rao D V S, Harrison W G, *et al.* Auto-trophic picoplankton in the tropical ocean[J]. *Science*, 1983, 219(4582): 292-295.
- [4] 宁修仁, 沃洛 D. 长江口及其毗连东海水域蓝细菌的分布和细胞特性及其环境调节[J]. *海洋学报*, 1991, 13(4): 552-559.
Ning X R, Vaulot D. The distribution and cell characteristics of cyanobacteria and its environmental regulation in Yangtze River estuary and adjacent East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(4): 552-559(in Chinese).
- [5] Glover H E, Campbell L, Prézelin B B. Contribution of *Synechococcus* spp. to size-fractionated primary productivity in three water masses in the Northwest Atlantic Ocean[J]. *Marine Biology*, 1986, 91(2): 193-203.
- [6] Platt T, Rao D V S, Irwin B. Photosynthesis of picoplankton in the oligotrophic ocean[J]. *Nature*, 1983, 301(5902): 702-704.
- [7] 宁修仁. 微型生物食物环[J]. *东海海洋*, 1997(1): 67-69.
Ning X R. Microbial loop[J]. *Donghai Marine Science*, 1997(1): 67-69(in Chinese).
- [8] 张武昌, 赵丽, 陈雪, 等. 海洋浮游细菌生长率和被摄食的研究综述[J]. *海洋科学*, 2016, 40(5): 151-158.
Zhang W C, Zhao L, Chen X, *et al.* Marine bacterioplankton growth rate and grazing on bacterioplankton by microzooplankton: a review[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(5): 151-158(in Chinese).
- [9] 宋云利, 崔毅, 孙耀, 等. 桑沟湾养殖海域营养状况及其影响因素分析[J]. *海洋水产研究*, 1996, 17(2): 41-51.
Song Y L, Cui Y, Sun Y, *et al.* Study on nutrient state and influencing factors in Sanggou bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 41-51(in Chinese).
- [10] 史洁, 魏皓, 赵亮, 等. 桑沟湾多元养殖生态模型研究: III 海带养殖容量的数值研究[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(4): 43-52.
Shi J, Wei H, Zhao L, *et al.* Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: III numerical study on the kelp culture carrying capacity[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 43-52(in Chinese).
- [11] 郝林华, 孙丕喜, 郝建民, 等. 桑沟湾海域叶绿素a的时空分布特征及其影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(2): 338-345.
Hao L H, Sun P X, Hao J M, *et al.* The spatial and temporal distribution of chlorophyll-a and its influencing factors in Sanggou Bay[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2): 338-345(in Chinese).
- [12] 李凤雪, 蒋增杰, 高亚平, 等. 桑沟湾浮游植物粒径结构及其与环境因子的关系[J]. *渔业科学进展*, 2020, 41(1): 31-40.
Li F X, Jiang Z J, Gao Y P, *et al.* Distribution of size-fractionated phytoplankton and its relationship with environmental variables in Sanggou Bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 2020, 41(1): 31-40(in Chinese).
- [13] 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 12763.4-2007 海洋调查规范 第4部分: 海水化学要素调查 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Testing, China Society of Fisheries

- tion and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.4-2007 specifications for oceanographic survey - Part 4: Survey of chemical parameters in sea water[S]. Beijing: China Standards Press, 2008 (in Chinese).
- [14] 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 12763.9-2007 海洋调查规范 第 9 部分: 海洋生态调查指南 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.9-2007 specifications for oceanographic survey - Part 9: Guidelines for marine ecological survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2008 (in Chinese).
- [15] 赵苑. 黄海和东海微微型浮游生物分布研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Zhao Y. Spatial and temporal distribution of picoplankton in Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [16] 赵燕楚, 赵丽, 张武昌, 等. 桑沟湾微微型浮游生物丰度和生物量分布的季节变化[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 145-154.
- Zhao Y C, Zhao L, Zhang W C, *et al.* Seasonal variation of the abundance and biomass of pico-plankton in the Sanggou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(5): 145-154(in Chinese).
- [17] 梁彦韬. 青岛近海浮游病毒、微微型浮游植物、异养细菌的丰度变化及其与环境相关性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- Liang Y T. Dynamics of virioplankton, picophytoplankton, heterotrophic bacteria and correlation with environmental factors in the coastal waters of Qingdao[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008 (in Chinese).
- [18] 白晓歌. 泛三大洋微微型浮游生物的分布及其与环境因子的相关性 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Bai X G. Distribution and structure of picoplankton and their relationships with environmental parameters in the western Pacific, Indian Ocean, the encircling southern Ocean and Antarctic waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [19] 乐凤凤, 刘诚刚, 郝镛, 等. 2006年秋季长江口及邻近海域微微型浮游生物的分布特征及环境影响因素[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(3): 108-117.
- Le F F, Liu C G, Hao Q, *et al.* Distribution and environmental impact factors of picoplankton in Changjiang River Estuary and its adjacent sea areas in autumn of 2006[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(3): 108-117(in Chinese).
- [20] van Broekhoven W, Troost K, Jansen H, *et al.* Nutrient regeneration by mussel *Mytilus edulis* spat assemblages in a macrotidal system[J]. *Journal of Sea Research*, 2014, 88: 36-46.
- [21] Newell R I E. Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve molluscs: a review[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2004, 23(1): 51-61.
- [22] Jacobs P, Riegman R, van der Meer J. Impact of the blue mussel *Mytilus edulis* on the microbial food web in the western Wadden Sea, the Netherlands[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 527: 119-131.
- [23] Dupuy C, Le Gall S, Hartmann H J, *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[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 177: 165-175.
- [24] 孙辉, 汪岷, 汪俭, 等. 养殖活动对超微型浮游生物分布影响的研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(6): 1272-1279.
- Sun H, Wang M, Wang J, *et al.* Effect of aquaculture activities on distribution of ultraplankton[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(6): 1272-1279(in Chinese).
- [25] Bec B, Hussein-Ratrem J, Collos Y, *et al.* Phytoplankton seasonal dynamics in a Mediterranean coastal lagoon: emphasis on the picoeukaryote community[J]. *Journal of Plankton Research*, 2005, 27(9): 881-894.
- [26] 宁修仁, 史君贤, 刘子琳, 等. 象山港微微型光能自养生物丰度与分布及其环境制约[J]. 海洋学报, 1997, 19(1): 87-95.
- Ning X R, Shi J X, Liu Z L, *et al.* Abundance and distribution of pico-photoautotrophic and their environmental constraints in Xiangshan Port[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(1): 87-95(in Chinese).
- [27] 宁修仁, 史君贤, 刘子琳, 等. 南大洋蓝细菌和微微型光合真核生物的丰度与分布[J]. 中国科学(C辑), 1996,

- 26(2): 164-171.
- Ning X R, Shi J X, Liu Z L, *et al.* Abundance and distribution of cyanobacteria and picoeukaryotes in the southern Ocean[J]. *Science in China (Series C)*, 1996, 26(2): 164-171(in Chinese).
- [28] 黄邦钦, 洪华生, 林学举, 等. 台湾海峡微小型浮游植物的生态研究 I. 时空分布及其调控机制[J]. *海洋学报*, 2003, 25(4): 72-82.
- Huang B Q, Hong H S, Lin X J, *et al.* Ecological study on picophytoplankton in the Taiwan Strait I. Spatial and temporal distribution and its controlling mechanism[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(4): 72-82(in Chinese).
- [29] Dame R F, Spurrier J D, Wolaver T G. Carbon, nitrogen and phosphorus processing by an oyster reef[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, 54: 249-256.
- [30] 刘冠群. 胶州湾微小型浮游植物的时空分布 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Liu G Q. The spatial and temporal distribution of picophytoplankton in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese).
- [31] 杨琳. 渤海微小型浮游植物的时空分布 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- Yang L. The spatial and temporal distribution of picophytoplankton in Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012 (in Chinese).
- [32] 屈佩. 南黄海微小型浮游生物时空分布及主要影响因素研究——基于流式细胞技术 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Qu P. The distribution of picoplankton communities in the southern Yellow Sea- the investigation based on flow cytometry[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [33] 林学举. 南海北部微小型浮游生物结构及叶绿素 *a* 最大值的形成机制 [D]. 厦门: 厦门大学, 2001.
- Lin X J. Picoplankton composition and mechanisms of formation of subsurface chlorophyll maxima in the northern South China Sea[D]. Xiamen: Xiamen University, 2001 (in Chinese).
- [34] 于旭光. 辽东湾微小型浮游生物的丰度及季节变化[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(7): 67-74.
- Yu X G. Abundance and seasonal variation of picophytoplankton in Liaodong Bay[J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(7): 67-74(in Chinese).
- [35] Heywood J L, Zubkov M V, Tarran G A, *et al.* Prokaryoplankton standing stocks in oligotrophic gyre and equatorial provinces of the Atlantic Ocean: evaluation of inter-annual variability[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53(14-16): 1530-1547.
- [36] Fuhrman J A, Azam F. Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of british columbia, antarctica, and california[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, 39(6): 1085-1095.
- [37] Fogg G E. The ecological significance of extracellular products of phytoplankton photosynthesis[J]. *Botanica Marina*, 1983, 26: 3-14.
- [38] 刘诚刚, 宁修仁, 郝镔, 等. 海洋浮游植物溶解有机碳释放研究进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(2): 123-132.
- Liu C G, Ning X R, Hao J, *et al.* Advances in the study of photosynthetically produced dissolved organic carbon released of marine phytoplankton[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(2): 123-132(in Chinese).
- [39] Jiang Z J, Du M R, Fang J, *et al.* Size fraction of phytoplankton and the contribution of natural plankton to the carbon source of Zhikong scallop *Chlamys farreri* in mariculture ecosystem of the Sanggou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(10): 97-105.

Temporal and spatial distribution variation of picoplankton and environmental impact factors in Sanggou Bay

LI Fengxue¹, DU Meirong¹, GAO Yaping¹, JIANG Weiwei¹, LI Wenhao^{1,2}, DONG Shipeng^{1,2},
HOU Xing^{1,2}, WANG Junwei³, ZHANG Yitao³, ZHANG Zhixin⁴, JIANG Zengjie^{1,5*}

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Rongcheng Chudao Aquaculture Co., Ltd., Rongcheng 264312, China;

4. Rongcheng Municipal Marine Development Bureau, Rongcheng 264300, China;

5. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to understand the spatial and temporal variation of abundance of picoplankton, four seasonal cruises were carried out in Sanggou Bay, a typical large-scale mariculture bay in north China, in April, July, November, 2017 and January, 2018. We used flow cytometry to study the abundance of the main picoplankton (*Synechococcus*, picoeukaryotes and heterotrophic bacteria) and further analyzed the relationship between the abundance of those species and environmental parameters (such as temperature, nutrients, dissolved oxygen, etc.) Results showed that the average values of *Synechococcus*, picoeukaryotes and heterotrophic bacteria in the surface layer of Sanggou Bay was $(2.93 \pm 2.29) \times 10^3$ cells/mL, $(13.84 \pm 12.81) \times 10^3$ cells/mL and $(1.03 \pm 0.28) \times 10^6$ cells/mL, respectively. There were significant differences in both abundance of picoplankton and spatial distribution between seasons. In spring, *Synechococcus* was mainly distributed in the northwest, southwest and outside of Sanggou Bay; it was mainly distributed in outside of Sanggou Bay in summer and winter; in autumn, it mainly concentrated in the Northwest coast. Picoeukaryotes were concentrated in the western coastal area in four seasons, showing a decreasing trend from the inside to the outside of Sanggou Bay. There are two high-value areas of heterotrophic bacteria in outside and western coastal of Sanggou Bay in summer. In spring, autumn and winter, heterotrophic bacteria and picoeukaryotes had the same distribution trend, and it were concentrated in the western coastal area of Sanggou Bay. The correlation analysis between abundance of picoplankton and environmental factors showed that the abundance of three kinds of picoplankton had a significant positive correlation with chlorophyll-*a*, temperature and particulate organic matter, and was negatively correlated with dissolved oxygen. There was no significant correlation between *Synechococcus* and PO_4^{3-} , NO_3^- and NO_2^- . However, there was a significant positive correlation between picoeukaryotes and NO_3^- and NH_4^+ . The results provide data support for further understanding the structure and function of aquaculture ecosystem.

Key words: *Synechococcus*; picoeukaryotes; heterotrophic bacteria; bivalve mariculture; Sanggou Bay

Corresponding author: JIANG Zengjie. E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

Funding projects: Key Programme for International Cooperation on Scientific and Technological Innovation, Ministry of Science and Technology (2016YFE0112600); National Natural Science Foundation of China(41676147); Youth Talent Program Supported by Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao) (2018-MFS-T13); The Young Taishan Scholars Program of Shandong Province (tsqn201909166); The Marine S & T Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao) (2018SDKJ0502); China Agriculture Research System (CARS-49)