

# 桑沟湾微微型浮游生物丰度和生物量分布的季节变化

赵燕楚<sup>1,2,3,7</sup>, 赵丽<sup>1,2,7</sup>, 张武昌<sup>1,2,7</sup>, 刘素美<sup>2,4</sup>, 蒋增杰<sup>5,6</sup>, 方建光<sup>5,6</sup>,  
赵苑<sup>1,2,7</sup>, 肖天<sup>1,2,7</sup>

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室(中国科学院海洋研究所), 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 5. 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071; 6. 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; 7. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 于 2013 年 4 月、7 月、10 月和 2014 年 1 月, 分四个季节在桑沟湾利用流式细胞技术对桑沟湾微微型浮游生物丰度和生物量的时空分布特征进行了研究, 并统计分析了其与环境因子之间的关系。结果表明, 四个季节中桑沟湾聚球藻丰度和生物量分别为  $0.04 \times 10^3 \sim 408.59 \times 10^3$  个/mL、 $0.01 \sim 102.15$  mg/m<sup>3</sup>, 微微型真核浮游生物的丰度和生物量分别为  $0.21 \times 10^3 \sim 99.64 \times 10^3$  个/mL、 $0.31 \sim 149.46$  mg/m<sup>3</sup>, 异养细菌的丰度和生物量分别为  $3.34 \times 10^5 \sim 50.16 \times 10^5$  个/mL、 $6.68 \sim 100.32$  mg/m<sup>3</sup>。四个季节中, 夏季桑沟湾微微型浮游生物的丰度和生物量高于其他季节。异养细菌对微微型浮游生物总生物量的四季平均贡献为 62.11%, 高于自养微微型浮游生物; 微微型真核浮游生物占自养微微型浮游生物总生物量比例最高, 平均可达 86.85%。统计分析显示温度、叶绿素 *a* 和营养盐浓度是影响桑沟湾微微型浮游生物丰度和生物量分布的主要因素。上述结果为桑沟湾生态环境的检测和评估提供了基础数据。

**关键词:** 微微型浮游生物; 丰度; 生物量; 季节变化; 桑沟湾

中图分类号: Q178 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)05-0145-10

DOI: 10.11759/hyxx20170623001

微微型浮游生物是指生活在海洋中的细胞粒径小于 2 μm 的浮游生物, 主要包括聚球藻(*Synechococcus*, SYN)、原绿球藻(*Prochlorococcus*, PRO)、微微型真核浮游生物(Picoeukaryotes, PEUK)和异养原核生物(Heterotrophic Prokaryotes, HP, 包括细菌和古菌)<sup>[1-3]</sup>。其中 SYN、PRO 和 PEUK 又可以合称为自养微微型浮游生物(Autotrophic Picoplankton, APP), HP 则为异养微微型浮游生物(Heterotrophic Picoplankton, HPP)。SYN、PEUK 和 HP 在我国海域中有较广泛的分布<sup>[4-5]</sup>。而 PRO 主要分布在我国南海和东海的外海区域, 在黄海的东南部区域有季节性分布, 在渤海海域中没有出现<sup>[6]</sup>。微微型浮游生物数量大、分布广, 是海洋中生物量和生产力的重要贡献者<sup>[7]</sup>; 同时也是微食物网的重要组成部分<sup>[8-9]</sup>, 在海洋生态系统物质循环过程中发挥重要作用<sup>[10]</sup>。

桑沟湾位于山东半岛东端, 面临黄海, 属半封闭型海湾, 是我国北方重要的海水养殖基地之一,

已有 30 多年的养殖历史, 养殖面积超过 100 km<sup>2</sup>。目前, 养殖生物主要包括海带、龙须菜、太平洋牡蛎、栉孔扇贝、虾夷扇贝和皱纹盘鲍等<sup>[11]</sup>。桑沟湾地区受养殖活动和沿岸多条河流的影响, 环境特征复杂多样。针对桑沟湾海区微微型浮游生物研究较少, Zhao 等<sup>[12]</sup>在 2011—2012 年研究了桑沟湾养殖活动对微微型浮游生物的影响。为了较全面地反映桑沟

收稿日期: 2017-06-23; 修回日期: 2017-09-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目“海洋生态与环境科学”(U1606404); 国家自然科学基金项目(41306161, 41306160, 41676147)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China-Marine Scientific Research Center of People's Government of Shandong Province Joint Fund "Marine Ecology and Environmental Science", No. U1606404; National Natural Science Foundation of China, No. 41306161, No. 41306160, No.41676147]

作者简介: 赵燕楚(1992-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 从事海洋微生物生态学研究, 电话: 0532-82898584, E-mail: z18306421151@163.com; 赵苑, 通信作者, 副研究员, 电话: 0532-82898714, yuanzhao@qdio.ac.cn; 肖天, 通信作者, 研究员, 电话: 0532-82898586, txiao@qdio.ac.cn

湾微微型浮游生物的分布情况,本研究利用流式细胞仪对 2013—2014 年春、夏、秋、冬四个季度月的微微型浮游生物丰度进行了调查,并结合温盐、叶绿素 *a* 及营养盐等参数,统计分析了微微型浮游生物丰度和生物量与环境因子的关系,为桑沟湾生态环境的监测和评估提供基础的数据资料。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样时间和 站 位

分别于春(2013 年 4 月)、夏(2013 年 7 月)、秋(2013 年 10 月)、冬(2014 年 1 月)四个季节,共设置

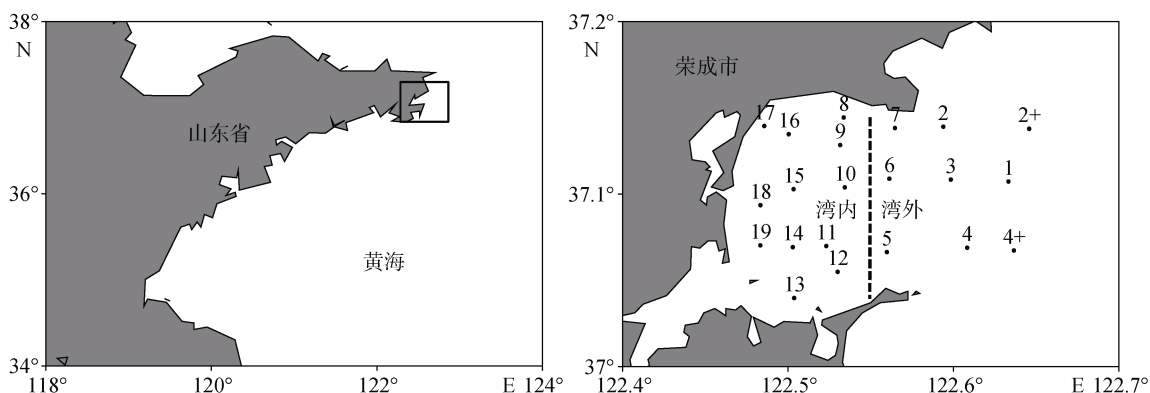


图 1 桑沟湾调查站 位  
Fig. 1 Sampling stations in the Sanggou Bay

将样品室温融化后,用流式细胞仪(FACSVantage SE, BD, 美国)测定 SYN、PEUK、HP 的丰度。对于 SYN、PEUK,取 990  $\mu\text{L}$  的海水样品,加入 10  $\mu\text{L}$  的 2  $\mu\text{m}$  荧光微球溶液(Polysciences, 美国)作为标准内参,上机检测 3 min。对于 HP 的分析,取 50  $\mu\text{L}$  的海水样品,加入 250  $\mu\text{L}$  TE(Tris-EDTA, 100 mmol/L Tris-Cl, 10 mmol/LEDTA, pH=8.0, Sigma, 美国)缓冲溶液稀释,再加入 4  $\mu\text{L}$  的 SYBR Green- I (Molecular Probes, 美国)染色剂,避光染色 20 min 后,上机检测 30 s。

### 1.3 环境理化因子的测定

水温和盐度等指标使用水质分析仪(YSI-6600, 美国)现场测定。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  采用次溴酸钠氧化法测定, $\text{NO}_3\text{-N}$  采用 Cd-Cu 还原法和重氮-偶氮法测定, $\text{NO}_2\text{-N}$  重氮-偶氮法测定, $\text{PO}_4^{3-}$  采用磷钼蓝法测定<sup>[13-14]</sup>。溶解无机氮 DIN 浓度为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  及  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度的总和。叶绿素 *a* 的分析采取荧光法,水样经 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,用 90% 的丙酮萃取后,在 Turner Designs Model 10 荧光计上分析测定<sup>[13]</sup>。

19 个采样站 位,采集桑沟湾微微型浮游生物(图 1),在春、冬季另增加 2 个采样站 位(2+、4+)。湾外的站 位 1~7、2+、4+和湾内的站 位 10 位于海带养殖区,湾内的站 位 8、9、11~19 位于贝类养殖区。各站采样水深为距表层 0.5 m 处。

### 1.2 样品采集与分析

样品通过船载采水器(Hydro-Bios)采集,每个站 位采集海水 4 mL,注入已灭菌的 5 mL 样品管,并加入 10%多聚甲醛进行固定,终体积分数为 1%,样品在室温黑暗处固定 20 min 后放入液氮中冷冻,之后转移到-80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存直至实验室分析。

### 1.4 生物量的计算

微微型浮游生物的生物量是由其丰度乘以碳转换系数得到。SYN、PEUK 和 HP 的碳转换系数分别为 250 fg/cell<sup>[15]</sup>、1500 fg/cell<sup>[16]</sup>和 20 fg/cell<sup>[17]</sup>。

### 1.5 数据处理和统计分析

用 CellQuest 软件记录和分析流式细胞仪获得的数据。用 Surfer 8.0 软件分析微微型浮游生物的水平分布情况。用 SPSS 17.0 软件进行逐步回归,分析微微型浮游生物与环境因子之间的关系。

## 2 结果

### 2.1 温盐、叶绿素 *a* 及营养盐分布特征

桑沟湾环境因子的分布如图 2 所示。表层水温在春、夏季由湾内向湾外降低,在秋、冬季由湾外向湾内降低。在时间尺度上,具有明显的季节变化。夏季温度最高,平均值为(20.93 $\pm$ 1.65) $^{\circ}\text{C}$ ;冬季温度最低,平均值为(3.5 $\pm$ 1.11) $^{\circ}\text{C}$ (表 1)。盐度由湾内向湾外

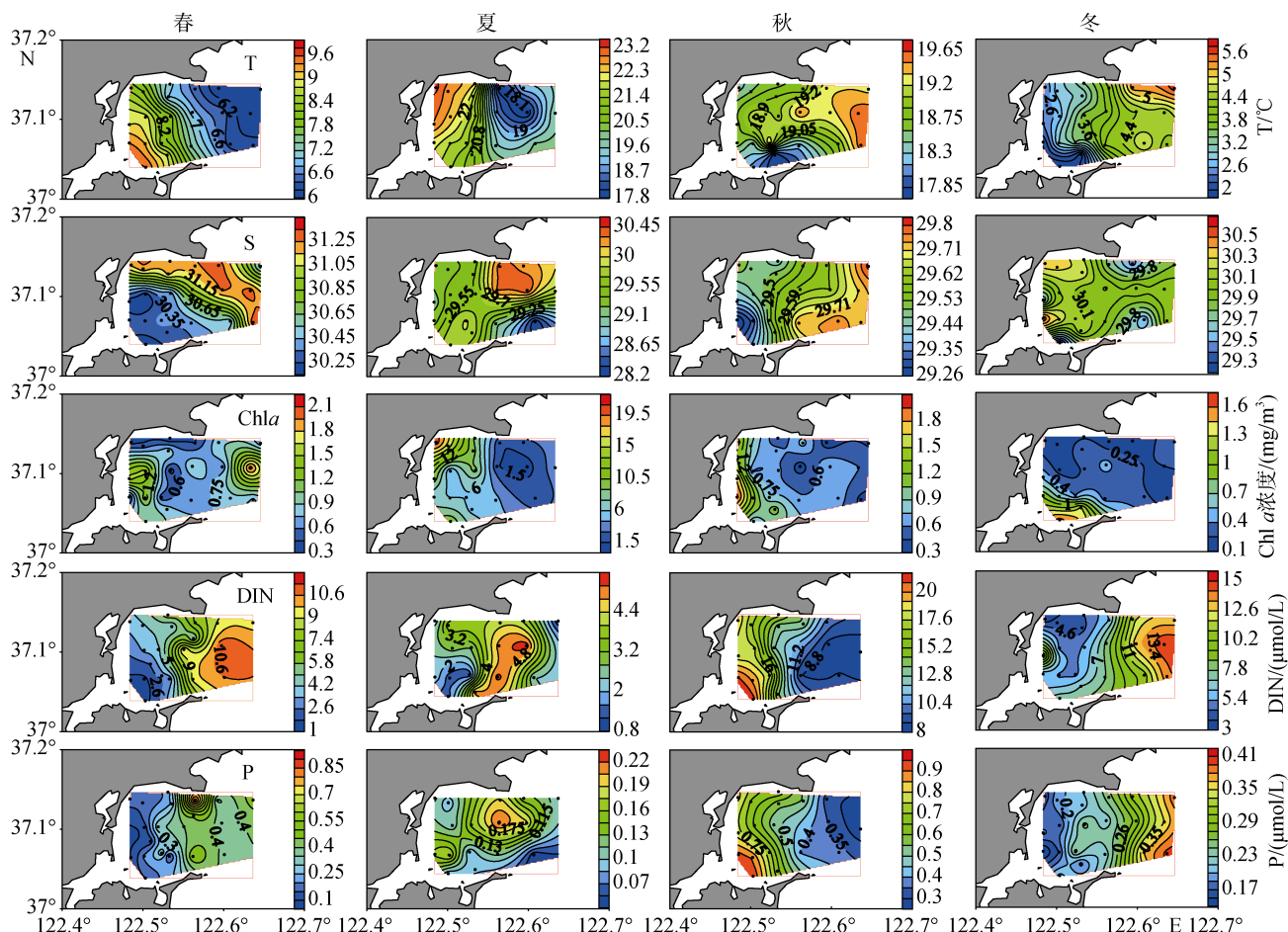


图2 桑沟湾理化因子的季节分布

Fig. 2 The seasonal distribution of physicochemical factors in the Sanggou Bay

表1 桑沟湾微微型浮游生物丰度、生物量和相关环境参数

Tab. 1 The abundance and carbon biomass of picoplankton, and related environmental parameters in the Sanggou Bay

项目	春	夏	秋	冬	周年
温度/°C	7.62±1.23	20.93±1.65	18.87±0.52	3.50±1.11	11.87±7.35
盐度	30.75±0.46	29.62±0.52	29.55±0.14	30.01±0.34	30.03±0.62
Chl a/(mg/m <sup>3</sup> )	0.83±0.45	6.89±4.88	0.83±0.45	0.44±0.41	1.92±3.37
溶解无机氮/(μmol/L)	5.57±3.28	3.15±1.53	14.72±4.42	8.02±3.67	7.93±5.39
磷酸盐/(μmol/L)	0.31±0.19	0.13±0.05	0.62±0.21	0.24±0.08	0.33±0.23
SYN 丰度/(×10 <sup>3</sup> 个/mL)	0.19±0.13	50.99±96.51	6.57±4.08	2.81±9.76	13.12±47.80
PEUK 丰度/(×10 <sup>3</sup> 个/mL)	4.58±4.89	36.69±26.92	4.57±3.45	4.42±3.57	11.30±18.21
HP 丰度/(×10 <sup>5</sup> 个/mL)	9.65±2.15	33.85±8.51	6.95±1.58	5.64±1.65	12.95±11.57
SYN 生物量/(mg/m <sup>3</sup> )	0.05±0.03	12.75±24.13	1.64±1.02	0.70±2.44	3.28±11.95
PEUK 生物量/(mg/m <sup>3</sup> )	6.88±7.33	55.03±40.38	6.86±5.17	6.64±5.35	16.94±27.31
HP 生物量/(mg/m <sup>3</sup> )	19.29±4.29	67.69±17.03	13.91±3.17	11.29±3.30	25.80±23.17

升高。春季盐度最高，平均值为 30.75±0.4；秋季盐度最低，平均值为 29.55±0.14。叶绿素 a 分布由湾内向湾外降低，叶绿素 a 的浓度在夏季最高，平均值为 (6.8±4.88)mg/m<sup>3</sup>；冬季最低，平均值为 (0.44±

0.41)mg/m<sup>3</sup>。营养盐(DIN 和 P)的分布趋势一致，春、夏和冬季由湾内向湾外升高，秋季由湾内向湾外降低。DIN 在秋季最高，平均值为(14.72±4.42)μmol/L；夏季最低，平均值为(3.15±1.53)μmol/L。P 的浓度也

是秋季最高,平均值为 $(0.62\pm 0.21)\mu\text{mol/L}$ ;夏季最低,平均值为 $(0.13\pm 0.05)\mu\text{mol/L}$ 。

## 2.2 微微型浮游生物丰度的时空分布

桑沟湾 SYN 的丰度范围为  $0.04\times 10^3\sim 408.59\times 10^3$  个/mL, 四季平均值为 $(13.12\pm 47.80)\times 10^3$  个/mL; PEUK 的丰度范围为  $0.21\times 10^3\sim 99.64\times 10^3$  个/mL, 四季平均值为 $(11.30\pm 18.21)\times 10^3$  个/mL; HP 的丰度范围为  $3.34\times 10^5\sim 50.16\times 10^5$  个/mL, 四季平均值 $(12.95\pm 11.57)\times 10^5$  个/mL(表 1)。

桑沟湾微微型浮游生物的丰度水平分布如图 3 所示。SYN 在春和夏季的丰度由湾内到湾外升高, 秋

季分布趋势相反, 冬季除站位 7 外, 湾内外的丰度比较接近; SYN 季节分布趋势为夏季>秋季>冬季>春季, 夏季最高, 平均值为 $(50.99\pm 96.51)\times 10^3$  个/mL; 春季最低, 平均值为 $(0.19\pm 0.13)\times 10^3$  个/mL(表 1)。PEUK 在 4 个季节丰度分布都是由湾内到湾外降低。PEUK 夏季丰度最高, 平均值为 $(36.69\pm 26.92)\times 10^3$  个/mL, 其他 3 个季节相差不大(表 1)。HP 丰度分布与 PEUK 类似, 除秋季外从湾内到湾外降低, 季节分布趋势为夏季>春季>秋季>冬季; 夏季丰度最高, 平均值为 $(33.85\pm 8.51)\times 10^5$  个/mL; 冬季丰度最低, 平均值为 $(5.64\pm 1.65)\times 10^5$  个/mL(表 1)。

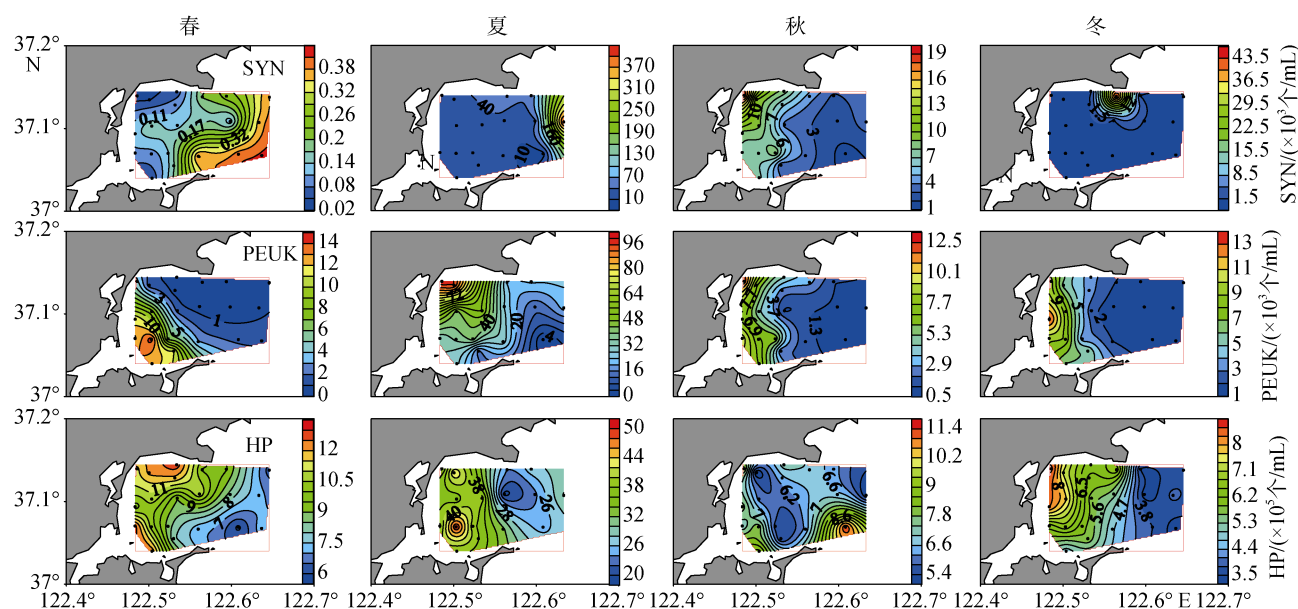


图 3 桑沟湾微微型浮游生物丰度的季节分布

Fig. 3 The seasonal distribution of picoplankton abundance in the Sanggou Bay

## 2.3 微微型浮游生物的生物量及比例

微微型浮游生物的生物量的分布也有明显的季节变化。SYN 春、夏、秋和冬季的生物量(以 C 计, 下同)分别为 $(0.05\pm 0.03)\text{mg/m}^3$ 、 $(12.75\pm 24.13)\text{mg/m}^3$ 、 $(1.64\pm 1.02)\text{mg/m}^3$  和 $(0.70\pm 2.44)\text{mg/m}^3$ 。PEUK 在 4 个季节的生物量分别为 $(6.88\pm 7.33)\text{mg/m}^3$ 、 $(55.03\pm 40.38)\text{mg/m}^3$ 、 $(6.86\pm 5.17)\text{mg/m}^3$  和 $(6.64\pm 5.35)\text{mg/m}^3$ 。HP 在 4 个季节的生物量分别为 $(19.29\pm 4.29)\text{mg/m}^3$ 、 $(67.69\pm 17.03)\text{mg/m}^3$ 、 $(13.91\pm 3.17)\text{mg/m}^3$  和 $(11.29\pm 3.30)\text{mg/m}^3$ (表 1)。3 个类群微微型浮游生物的生物量在夏季远高于其他 3 个季节。

在微微型浮游生物的生物量中, HP 的比例最大, 在 4 个季节分别为 73.58%、49.97%、62.07%和 62.83%;

PEUK 所占的比例次之, 4 个季节分别为 26.24%、40.62%、30.61%和 33.59%; SYN 所占比例最小, 在 4 个季节分别为 0.18%、9.41%、7.32%和 3.58%(图 4)。

在桑沟湾, HPP 是微微型浮游生物总生物量的重要贡献者, 夏季异养组分的比例与自养组分基本相等, 其他季节, 异养组分的比例高于自养组分。在自养组分中, PEUK 是生物量的主要贡献者, 其所占比例远高于 SYN(图 4)。

## 2.4 微微型浮游生物分布的主要影响因素

运用逐步回归分析对影响微微型浮游生物分布的主要影响因素进行研究(表 2)。分析表明, 温度是影响 SYN 和 PEUK 分布的最主要因素, 分别能够解释 54.8%SYN 的变化和 19.0%PEUK 的变化。叶绿素



*a* 浓度是影响 HP 分布的主要因素,可解释 47.9%的 HP 变化。除此之外,营养盐也是影响 PEUK 和 HP

分布的重要因素,磷酸盐浓度可解释 12.9%的 PEUK 变化, DIN 可解释 13.6%的 HP 变化。

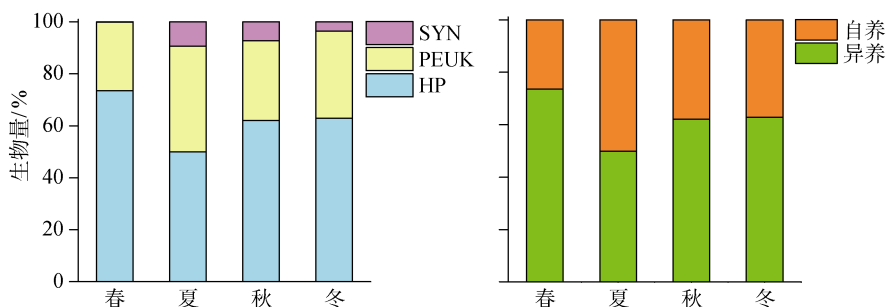


图 4 桑沟湾四个季节 SYN、PEUK 和 HP 对微微型浮游生物总生物量的贡献

Fig. 4 The Biomass contribution of SYN, PEUK and HP to the picoplankton biomass in the Sanggou Bay over 4 successive seasons

表 2 微微型浮游生物丰度和理化因子的逐步回归分析

Tab. 2 Multiple stepwise regression analysis between the picoplankton abundance and physicochemical factors

	输入的变量	R 方	R 方更改	标准化系数	F	P
Log SYN	T	0.548	0.548	0.624	88.635	0.000
	S	0.579	0.030	-0.210	49.482	0.000
Log PEUK	T	0.190	0.190	0.497	17.098	0.000
	P	0.319	0.129	-0.364	16.842	0.000
Log HP	Chl <i>a</i>	0.479	0.479	0.264	67.133	0.000
	DIN	0.615	0.136	-0.503	57.567	0.000
	T	0.801	0.186	0.609	95.217	0.000
	S	0.819	0.018	0.170	79.126	0.000

注: 微微型浮游生物的丰度经 Log 化处理。

## 2.5 自养和异养占微微型浮游生物总生物量比例与营养盐的关系

春季, 湾内随着营养盐(DIN 和 P)浓度增加, HPP 的生物量占总生物量的比例升高、APP 的生物量占总生物量的比例降低。湾外营养盐(DIN 和 P)与微微型浮游生物的生物量占总生物量的比例无明显关系(图 5)。

夏季, 湾内营养盐(DIN 和 P)与微微型浮游生物的生物量占总生物量的比例无明显关系。湾外随着营养盐(DIN 和 P)浓度增加, HPP 的生物量占总生物量的比例降低、APP 的生物量占总生物量的比例升高(图 5)。

秋季, 湾内外随着营养盐(DIN 和 P)浓度增加, HPP 的生物量占总生物量的比例降低、APP 的生物量占总生物量的比例升高(图 5)。

冬季, 湾内随着 DIN 浓度的增加, HPP 的生物量占总生物量的比例降低、APP 的生物量占总生物量

的比例升高。湾内 HPP 与 P 呈正相关关系, APP 与 P 呈负相关关系。湾外随着 DIN 浓度增加, HPP 的生物量占总生物量的比例升高、APP 的生物量占总生物量的比例降低(图 5)。

## 3 讨论

### 3.1 微微型浮游生物的分布与环境因子的关系分析

本调查检测到桑沟湾 SYN 丰度的四季平均值为  $(13.12 \pm 47.80) \times 10^3$  个/mL, PEUK 丰度的四季平均值为  $(11.30 \pm 18.21) \times 10^3$  个/mL, HP 丰度的四季平均值为  $(12.95 \pm 11.57) \times 10^5$  个/mL。本文检测到的微微型浮游生物丰度平均值在文献报道的附近海域胶州湾<sup>[18-19]</sup>、北黄海<sup>[20]</sup>的丰度范围内(表 3)。

桑沟湾海域 PEUK 和 HP 的丰度在湾内要高于湾外, 可能与养殖活动有关。湾外主要是海带养殖区, 海带与微微型浮游生物竞争营养盐<sup>[13]</sup>, 会影响微微型浮游生物的丰度。而湾内主要是贝类养殖区, 养殖

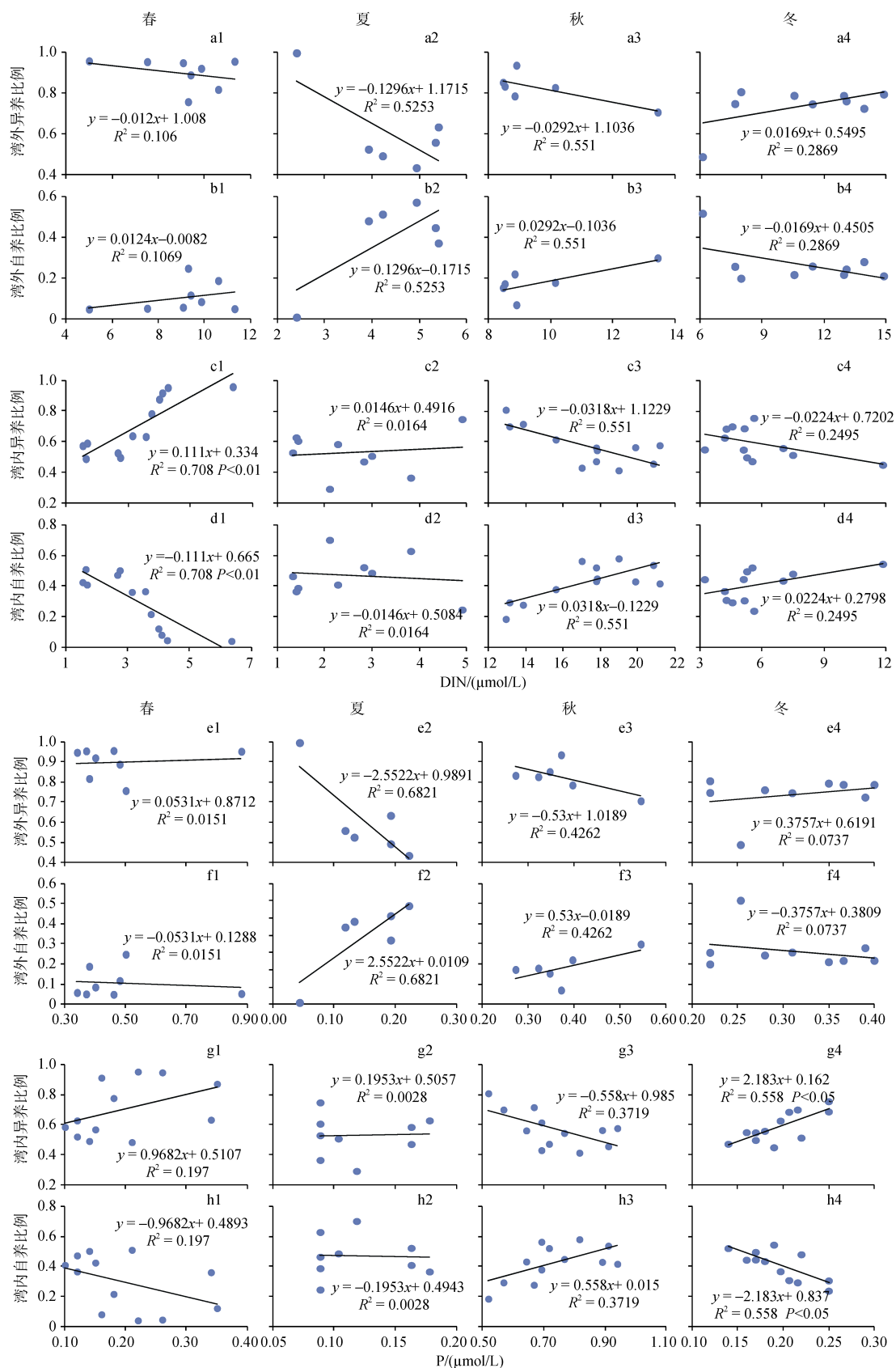


图 5 不同营养方式微小型浮游生物的生物量占总生物量比例与营养盐的关系

Fig. 5 The correlation between the percentage of the biomass of picoplankton of different trophic modes in total picoplankton and nutrients

表 3 桑沟湾微微型浮游生物丰度与其他海区的比较

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

海区	SYN/(个/mL)	PEUK/(个/mL)	HP/(个/mL)
桑沟湾	$(13.12 \pm 47.80) \times 10^3$	$(11.30 \pm 18.21) \times 10^3$	$(12.95 \pm 11.57) \times 10^5$
胶州湾	$2.17 \times 10^2 \sim 2.33 \times 10^4$	$1.03 \times 10^3 \sim 8.56 \times 10^4$	$1.07 \times 10^4 \sim 86.59 \times 10^5$
北黄海	$1.57 \times 10^3 \sim 2.06 \times 10^5$	$5.25 \times 10^2 \sim 2.88 \times 10^4$	未检测

贝类对微微型浮游生物丰度的影响可能是间接的。微微型浮游生物虽然个体微小,不能直接被贝类摄食,但它们为微型浮游生物鞭毛虫和纤毛虫提供了大量的食物来源<sup>[12, 21]</sup>。贝类对微型浮游生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减小<sup>[22]</sup>。与 SYN 相比, PEUK 是微型浮游动物主要的碳来源<sup>[23]</sup>。因此 PEUK 和 HP 丰度在湾内高于湾外。SYN 在春、夏季的丰度分布为湾内低于湾外,秋季分布趋势相反。影响 SYN 分布的因素较为复杂,除养殖外,还要综合考虑其他环境因子的影响,有待于进一步研究。

逐步回归分析表明,温度是影响微微型浮游生物丰度和分布的重要因素。生物的新陈代谢能力主要取决于酶的活力,在一定温度范围内,酶活性与温度呈正比。因此,海水温度会影响细胞的新陈代谢,从而对生物的丰度产生重要影响<sup>[24-26]</sup>。除温度外, Chl *a* 是影响 HP 分布的另一个重要因素,导致了 47.9% 的 HP 的变化(表 2)。高 Chl *a* 的浓度会导致高的溶解有机碳,而溶解有机碳是 HP 的重要碳源<sup>[27]</sup>。

### 3.2 微微型浮游生物的生物量

桑沟湾海域 HPP 的生物量超过 APP, 占微微型浮游生物总生物量的 62.11%。这与 Calvo-Díaz 等<sup>[28]</sup>在比斯开湾的研究结果 HPP 的生物量占总生物量的  $63\% \pm 3\%$  十分接近。在我国的黄海<sup>[29]</sup>、东海<sup>[27]</sup>地区也得到相似的研究结果。

在 APP 中, PEUK 是生物量的主要贡献者,对 APP 的生物量平均贡献率高达 87.91%。这一结果远高于之前在近岸海域的研究结果。Worden 等<sup>[30]</sup>在太平洋沿岸南加利福尼亚湾的研究结果显示 PEUK 对 APP 的生物量的贡献为  $66.44 \pm 10.86\%$ , 远低于桑沟湾地区。Calvo-Díaz 等<sup>[28]</sup>在比斯开湾研究发现从 11 月到 5 月份 PEUK 占 APP 的生物量的  $82\% \pm 2\%$ , 与桑沟湾海域相差不大,但在 6 月到 10 月份 PEUK 仅占  $59\% \pm 3\%$ 。而在美国的切萨皮克湾<sup>[31]</sup>、德国的基尔湾<sup>[32]</sup>和我国的南黄海<sup>[29]</sup>等海域, PEUK 生物量所占比例较低,蓝细菌(SYN 和 PRO)是生物量的主要

贡献者。这种差异可能与丰度有关。春、冬季 PEUK 的丰度高于 SYN, 而夏、秋季节 SYN 和 PEUK 的丰度相差不大。但由于 PEUK 的细胞体积较大,碳含量高,因此它对 APP 的生物量贡献较高<sup>[33-34]</sup>。在桑沟湾综合养殖区 PEUK 对 APP 生物量贡献如此之高,值得关注。2012 年 6 月此海域曾有褐潮发生,其原因种是一种直径为 2  $\mu\text{m}$  左右的小球型藻,属微微型真核浮游植物<sup>[35]</sup>。因此,该海域微微型真核浮游植物种群结构及优势种类的变化需要持续分析研究。

### 3.3 自养和异养占微微型浮游生物总生物量比例与营养盐的关系

传统观点认为 HPP 主要是分解水中的溶解有机物和颗粒有机物并向水中释放氮、磷等营养盐<sup>[36]</sup>。一些研究表明 HPP 可以吸收利用海水中的无机氮、磷等营养盐,用于自身的生长和新陈代谢<sup>[37-38]</sup>。HPP 和 APP 二者之间可能存在竞争关系。秋季湾内外随着营养盐浓度的增加, HPP 占总生物量的比例降低、APP 占总生物量的比例升高(图 5)。这可能与秋季营养盐浓度较高有关。研究表明,在高营养盐浓度时, APP 对营养盐的吸收速率高于 HPP<sup>[37]</sup>, 导致 APP 比例升高。

海带生长期为 11 月到翌年 6 月,海带快速生长与微微型浮游生物竞争营养盐,使得营养盐浓度降低<sup>[39-40]</sup>。同时由于海带的阻隔,湾内外的水交换缓慢。这两方面共同作用可能导致在春、夏和冬季湾内外 HPP 和 APP 的生物量占总生物量的比例与营养盐之间的变化趋势不一致。但在春季湾内 HPP 与 DIN 呈正相关关系, APP 与 DIN 呈负相关关系。冬季湾内 HPP 与 P 呈正相关关系, APP 与 P 呈负相关关系。这可能是由于 HPP 细胞比较小,比表面积大,在低营养盐浓度时,对营养盐的吸收利用能力强<sup>[37]</sup>。

微微型浮游生物是初级生产力的重要贡献者。Gasol 等<sup>[41]</sup>研究发现随着浮游植物生物量和初级生产力的增加,浮游异养生物与总自养生物的生物量的比例降低。本研究中 APP 或 HPP 占总生物量的比例可以反映桑沟湾海域微微型浮游生物对初级生产

力的贡献情况。APP 占总生物量的比例升高,表明微型浮游生物对初级生产力的贡献增加。HPP 占总生物量的比例升高,表明微微型浮游生物对初级生产力的贡献减少。

参考文献:

- [1] Chisholm S W, Olson R J, Zettler E R, et al. A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone[J]. *Nature*, 1988, 334(6180): 340-343.
- [2] Johnson P W, Sieburth J M. Chroococcoid cyanobacteria in the sea: A ubiquitous and diverse phototropic biomass[J]. *Limnology and Oceanography*, 1979, 24(5): 928-935.
- [3] Waterbury J B, Watson S W, Guillard R R L, et al. Widespread occurrence of a unicellular, marine, planktonic, cyanobacterium[J]. *Nature*, 1979, 277(5694): 293-294.
- [4] Jiao N Z, Yang Y H, Hong N, et al. Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(10): 1265-1279.
- [5] Liu H B, Chang J, Tseng C M, et al. Seasonal variability of picoplankton in the Northern South China Sea at the SEATS station[J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2007, 54(14-15): 1602-1616.
- [6] Jiao N Z, Yang Y H. Ecological studies on *Prochlorococcus* in China seas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(15): 1243-1250.
- [7] Li W K W, Subba Rao D V, Harrison W G, et al. Autotrophic picoplankton in the tropical ocean[J]. *Science*, 1983, 219(4582): 292-295.
- [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 Wuchang, Zhao Li, Chen Xue, et al. Marine bacterioplankton growth rate and grazing on bacterioplankton by microzooplankton: a review[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(5): 151-158.
- [9] 宁修仁. 微型生物食物环[J]. *东海海洋*, 1997, 15(1): 66-68. Ning Xiuren. Microbial food loop[J]. *Donghai Marine Science*, 1997, 15(1): 66-68.
- [10] Grob C, Ulloa O, Claustre H, et al. Contribution of picoplankton to the total particulate organic carbon concentration in the eastern South Pacific[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 4(5): 837-852.
- [11] Zhang J H, Hansen P K, Fang J G, et al. Assessment of the local environmental impact of intensive marine shellfish and seaweed farming-Application of the MOM system in the Sungo Bay, China[J]. *Aquaculture*, 2009, 287(3-4): 304-310.
- [12] Zhao L, Zhao Y, Xu J H, et al. Distribution and seasonal variation of picoplankton in Sanggou Bay, China[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 261-271.
- [13] 张继红, 蒋增杰, 王巍, 等. 桑沟湾营养盐时空分布及营养盐限制分析[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(4): 16-25. Zhang Jihong, Jiang Zengjie, Wang Wei, et al. Seasonal distribution and variation of nutrients and nutrients limitation in Sanggou Bay[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 16-25.
- [14] 黄金, 刘素美. 长江口邻近海域间隙水营养盐扩散通量的探究[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(10): 73-81. Huang Jin, Liu Sumei. Research of pore water nutrients diffusion fluxes in the yangtze river estuary adjacent waters[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(10): 73-81.
- [15] Li W K W, Dickie P M, Irwin B D, et al. Biomass of bacteria, cyanobacteria, prochlorophytes and photosynthetic eukaryotes in the Sargasso Sea[J]. *Deep-Sea Research Part I*, 1992, 39(3/4): 501-519.
- [16] Zubkov M V, Sleigh M A, Tarran G A, et al. Picoplanktonic community structure on an Atlantic transect from 50°N to 50°S[J]. *Deep-Sea Research Part I*, 1998, 45(8): 1339-1355.
- [17] Lee S, Fuhrman J A. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, 53(6): 1298-1303.
- [18] 杨琳, 汪岷, 刘冠群, 等. 胶州湾微微型浮游植物丰度及其与环境因子的相关性分析[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(5): 967-975. Yang Lin, Wang Min, Liu Guanqun, et al. The abundance of picophytoplankton and correlation analysis with environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. *Oecologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(5): 967-975.
- [19] 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 Yuan. Spatial and temporal distribution of picoplankton in Yellow Sea and East China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [20] 江雪娇. 北黄海微微型浮游植物的丰度及微微型真核浮游生物分子多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. Jiang Xuejiao. Analysis of picoplankton abundance and study of genetic diversity of microeukaryotes in the North Yellow Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [21] 李洪波, 梁玉波, 袁秀堂. 辽宁长海浮筏养殖对聚球藻蓝细菌分布的影响[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 221-225. Li Hongbo, Liang Yubo, Yuan Xiutang. The effect of raft-culture on distribution of *Synchococcus* in Chang-



- hai waters, Liaoning[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(5): 221-225.
- [22] 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 Hui, Wang Min, Wang Jian, et al. Effect of aquaculture activities on distribution of ultraplankton[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(6): 1272-1279.
- [23] 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.
- [24] 屈佩, 王宗灵, 庞敏, 等. 夏季南黄海主要环境因子对超微型浮游生物分布影响[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 176-187.  
Qu Pei, Wang Zongling, Pang Min, et al. Influence of environmental factors on picoplankton in the southern Yellow Sea in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(4): 176-187.
- [25] Fu F X, Warner M E, Zhang Y H, et al. Effects of increased temperature and CO<sub>2</sub> on photosynthesis, growth, and elemental ratios in marine *Synechococcus* and *Prochlorococcus* (Cyanobacteria)[J]. *Journal of Phycology*, 2007, 43(3): 485-496.
- [26] 姜发军, 胡章立, 胡超群. 大鹏湾浮游细菌时空分布与环境因子的关系[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(1): 96-100.  
Jiang Fajun, Hu Zhangli, Hu Chaoqun. Correlation between spatial-temporal distribution of bacterioplankton and environmental factors in the Dapeng Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(1): 96-100.
- [27] Le F F, Ning X R, Liu C G, et al. Picoplankton abundance and biomass in the East China Sea during autumn and winter[J]. *Oceanology*, 2012, 52(1): 48-59.
- [28] Calvo-Díaz A, Morán X A G. Seasonal dynamics of picoplankton in shelf waters of the southern Bay of Biscay[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2006, 42(2): 159-174.
- [29] Zhao Y, Zhao L, Xiao T, et al. Spatial and temporal variation of picoplankton distribution in the Yellow Sea, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, 29(1): 150-161.
- [30] Worden A Z, Nolan J K, Palenik B. Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton: The importance of the eukaryotic component[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(1): 168-179.
- [31] Ray R T, Haas L W, Sieracki M E. Autotrophic picoplankton dynamics in a Chesapeake Bay sub-estuary[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, 52(3): 273-285.
- [32] Jochem F. On the distribution and importance of picocyanobacteria in a boreal inshore area (Kiel Bight, Western Baltic)[J]. *Journal of Plankton Research*, 1988, 10(5): 1009-1022.
- [33] 乐凤凤, 蔡昱明, 孙军, 等. 2009年冬、夏季南海北部超微型浮游生物的分布特征及其环境相关分析[J]. *海洋学报*, 2015, 37(12): 41-55.  
Le Fengfeng, Cai Yuming, Sun Jun, et al. Seasonal variation of picoplankton abundance and biomass in the northern South China Sea in summer and winter 2009[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(12): 41-55.
- [34] 宁修仁, 蔡昱明, 李国为, 等. 南海北部超微型光合浮游生物的丰度及环境调控[J]. *海洋学报*, 2003, 25(3): 83-97.  
Ning Xiuren, Cai Yuming, Li Guowei, et al. Photosynthetic picoplankton in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(3): 83-97.
- [35] 郭术津, 丰美萍, 张瑞峰, 等. 2012年6月份桑沟湾褐潮期间浮游植物和浮游纤毛虫群落结构特征[J]. *海洋科学*, 2015, 39(12): 56-64.  
Guo Shujin, Feng Meiping, Zhang Ruifeng, et al. Effects on phytoplankton and ciliate communities during the 2012 picophytoplankton brown tide in Sanggou Bay, China[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(12): 56-64.
- [36] 张武昌, 陈雪, 李海波, 等. 海洋浮游微食物网对氮、磷营养盐的再生研究综述[J]. *海洋通报*, 2016, 35(3): 241-251.  
Zhang Wuchang, Chen Xue, Li Haibo, et al. Review of nutrient (nitrogen and phosphorus) regeneration in the marine pelagic microbial food web[J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(3): 241-251.
- [37] Kirchman D L. The uptake of inorganic nutrients by Heterotrophic Bacteria[J]. *Microbial Ecology*, 1994, 28(2): 255-271.
- [38] Tupas L, Koike I. Amino acid and ammonium utilization by heterotrophic marine bacteria grown in enriched seawater[J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(5): 1145-1155.
- [39] 孙丕喜, 张朝晖, 郝林华, 等. 桑沟湾海水中营养盐分布及潜在性富营养化分析[J]. *海洋科学进展*, 2007, 25(4): 436-445.  
Sun Pixi, Zhang Zhaohui, Hao Linhua, et al. Analysis of nutrient distributions and potential eutrophication in seawater of the Sanggou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(4): 436-445.
- [40] 钱罡, 魏玉秋, 孙军. 2015年春季桑沟湾浮游植物群落研究[J]. *海洋科学*, 2017, 41(2): 44-52.  
Qian Gang, Wei Yuqiu, Sun Jun. Study on phytoplankton communities in the Sanggou Bay in spring, 2015[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(2): 44-52.
- [41] Gasol J M, del Giorgio P A, Duarte C M. Biomass distribution in marine planktonic communities[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(6): 1353-1363.

# Seasonal variation of the abundance and biomass of picoplankton in the Sanggou Bay

ZHAO Yan-chu<sup>1, 2, 3, 7</sup>, ZHAO Li<sup>1, 2, 7</sup>, ZHANG Wu-chang<sup>1, 2, 7</sup>, LIU Su-mei<sup>2, 4</sup>,  
JIANG Zeng-jie<sup>5, 6</sup>, FANG Jian-guang<sup>5, 6</sup>, ZHAO Yuan<sup>1, 2, 7</sup>, XIAO Tian<sup>1, 2, 7</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 5. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-Environment, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 6. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 7. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** Jun. 23, 2018

**Key words:** picoplankton; abundance; biomass; seasonal variation; Sanggou Bay

**Abstract:** This study aims to investigate the abundance, biomass, and distribution of picoplankton in the Sanggou Bay using flow cytometry in April 2013 (spring), July 2013 (summer), October 2013 (autumn), and January 2014 (winter) and analyze the correlations with environmental factors. The results revealed that the abundance and biomass ranged as follows: *Synechococcus*,  $0.04 \times 10^3$ – $408.59 \times 10^3$  cells/mL and  $0.01$ – $102.15$  mg/m<sup>3</sup>; picoeukaryotes,  $0.21 \times 10^3$ – $99.64 \times 10^3$  cells/mL and  $0.31$ – $149.46$  mg/m<sup>3</sup>; and heterotrophic prokaryotes,  $3.34 \times 10^5$ – $50.16 \times 10^5$  cells/mL and  $6.68$ – $100.32$  mg/m<sup>3</sup>, respectively. The abundance and biomass of picoplankton were higher in summer than other seasons. In four seasons, the biomass of heterotrophic picoplankton, the average contribution of which accounted for 62.11%, was higher than that of autotrophic picoplankton. In autotrophic picoplankton, picoeukaryotes were the major contributor of the biomass, and their average contribution was 86.85%. Temperature, chlorophyll *a*, and nutrient concentrations were primary factors that affected the abundance and biomass distribution of picoplankton. This study will provide the basic data for the evaluation of the ecological environment of the Sanggou Bay.

(本文编辑: 张培新)