

# 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\*

杨琳<sup>1,4</sup> 汪岷<sup>1</sup> 刘冠群<sup>1</sup> 王健<sup>1</sup> 卢龙飞<sup>1</sup>  
王艳<sup>1</sup> 孙辉<sup>1</sup> 刘东艳<sup>2</sup> 刘哲<sup>3</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋生物遗传学与基因资源利用教育部重点实验室 青岛 266003;

2. 中国科学院烟台海岸带研究所 烟台 264000; 3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院 青岛 266003;

4. 中国海洋大学 海洋生物多样性与进化研究所 青岛 266003)

**摘要** 利用流式细胞仪对胶州湾微微型浮游植物 4 个季节的丰度分布进行了研究,并分析了微微型浮游植物与环境因子的相关性。结果表明,聚球藻的丰度在  $2.17 \times 10^2$ — $2.329 \times 10^4$  个/ml 之间,高值区主要分布在湾内西部和湾口海域;仅夏季、冬季丰度之间有显著性差异;夏季在垂直分布上差异显著,在 B3、C4、D5 连续站昼夜变化趋势基本一致,分别在 13:00 和 3:00 出现峰值。微微型真核浮游植物的丰度分布在  $1.028 \times 10^3$ — $8.651 \times 10^4$  个/ml 之间,主要活跃于湾内西部海域;四季丰度在垂直分布上差异不显著;春、夏季丰度明显高于秋、冬季;夏季连续站昼夜变化趋势与聚球藻基本一致。通过主成分分析表明,聚球藻和微微型真核浮游植物丰度在不同季节受不同环境因子的影响,在冬季与温度有关,温度升高,二者的丰度增高。在其它季节,二者丰度主要受营养盐等环境因子的影响。

**关键词** 流式细胞仪,微微型浮游植物,胶州湾,聚球藻,微微型真核浮游植物

**中图分类号** Q938.1

微微型浮游植物(Picophytoplankton),即粒径大小介于  $0.22$ — $2.0 \mu\text{m}$  的浮游植物,是迄今发现最小的一类光合自养生物,在世界各个海域中广泛存在(Joint, 1986; Joint *et al.*, 1986; Li *et al.*, 1983; Olson *et al.*, 1990),主要包括原绿球藻属(*Prochlorococcus*, 简称 Pro)、聚球藻属(*Synechococcus*, 简称 Syn)和微微型真核浮游植物(Picoeukaryotes, 简称 Euk)。

微微型浮游植物是海洋浮游生物群落的重要组成部分,在维持海洋生态系统的稳定,推动海洋生态系统的物质循环和能量流动方面有着十分重要的作用(Campbell *et al.*, 1994)。通过研究微微型浮游植物丰度可以获知其分布规律及其与环境影响因子之间的关系,了解该海域浮游生物的群落结构,进一步分析人类活动对海洋生态环境的影响。

胶州湾是我国北方重要的港口、养殖和经济贸易海域,受人类活动的影响较大,是我国海洋生态研究的重要海域。吴玉霖等(2004)在 1992—2002 年间通过分光光度法检测叶绿素含量,从而获得了胶州湾浮游植物的现存量,并分析了研究期间环境变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响;赵三军等(2005)在 2002—2004 年间通过荧光显微计数法对胶州湾聚球藻丰度进行了研究,发现该海域聚球藻对总初级生产力的贡献较低;潘胜军等(2009)对胶州湾四季表层不同粒级组成的浮游植物叶绿素 *a* 的浓度进行了调查,分析发现胶州湾浮游植物粒级组成以微型浮游植物为主(占叶绿素总量的 60.9%),其次是小型浮游植物,微微型浮游植物所占比例最低(6.7%),与历史资料相比,微微型浮游植物所占的比例有所降低。

\* 国家海洋公益性行业科研专项经费项目资助,200805011 号;国家自然科学基金项目资助,41076088 号。杨琳, E-mail: yanglin.hs@126.com

通讯作者:汪岷,博士,教授, E-mail: mingwang@ouc.edu.cn, wangmin30@hotmail.com

收稿日期:2011-12-21, 收修改稿日期:2012-02-23

为了全面、客观地反映整个胶州湾内微微型浮游植物丰度的分布情况, 本文在胶州湾设立了 14 个站位, 利用流式细胞仪检测微微型浮游植物春、夏、秋、冬 4 个季节的丰度, 分析其水平、垂直及季节分布的特点; 在夏季对 5 个站位同时进行了 24h 的连续观测, 分析其丰度昼夜变化规律; 同时, 监测营养盐、温度等环境因子, 分析微微型浮游植物丰度与环境因子的相关性, 探讨其丰度分布的规律。本文的研究结果将为进一步分析微微型浮游植物在胶州湾生态环境中的重要作用提供依据, 并为胶州湾海域生态环境评估提供基础数据。

## 1 调查海域情况及站位设定

胶州湾(35°58′—36°18′N, 120°04′—120°23′E)为深入青岛市辖区陆域的半封闭内湾, 湾口与黄海相连, 东西最大宽度约为 25km, 南北最大跨距为 32km, 湾口海水通道最狭处仅为 3km, 总面积约为 390km<sup>2</sup>。四周被青岛市的市南、市北、四方、李沧、城阳、胶州、胶南、黄岛等 8 个区、市包围。多条河道、沟渠汇集于此, 主要有大沽河、墨水河、白沙河、洋河、李村河、海泊河等。

胶州湾春季各站点水温变化范围在 6.9—10.7℃ 之间, 平均值为 8.3℃; 夏季水温在 17.6—22.3℃ 之间, 平均值为 19.7℃; 秋季在 12.2—18.4℃ 之间, 平均值为 16.3℃; 冬季在 -0.5—4.0℃ 之间, 平均值为 2.2℃。春、夏季湾口温度较湾内低, 秋、冬季正好相反。

胶州湾春季各站点盐度变化范围为 29.7—31.8, 平均值为 31.4; 夏季在 28.8—31.5 之间, 平均值为 31.0; 秋季在 29.0—31.0 之间, 平均值为 30.6; 冬季在 30.4—31.6 之间, 平均值为 31.5。春、夏、冬季盐度均在湾口处较高, 秋季湾口附近盐度较低。

分别于春(2010年4月)、夏(2010年8月)、秋(2010年10月)、冬(2011年1月)4个季节对胶州湾微微型浮游植物丰度进行了研究。共设站位 14 个, 分布于湾口、湾内中部海域、近岸海域(C4, D1 靠近养殖区)(图 1), 同时在夏季对 A1、B3、C2、C4、D4 共 5 个站进行了 24h 的连续检测。除 D4(28m)、D5(34m) 站外, 各站点水深在 10—15m 之间不等。

## 2 材料与方法

### 2.1 水样采集和保存

每一站位依据水深的不同各取 2 层水样: 水深小于 12m 的站位采集表层、底层(海底以上 2m)水样; 水

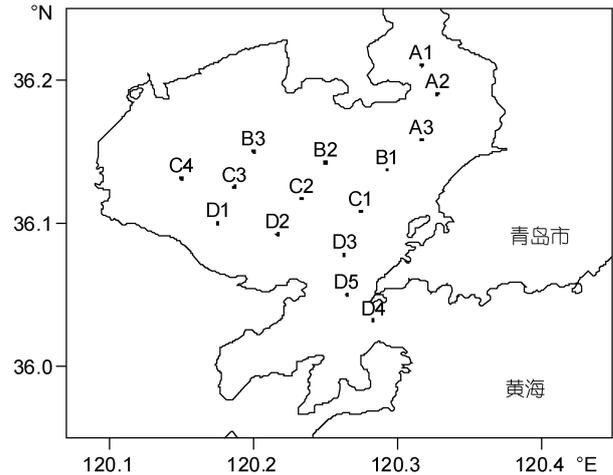


图 1 胶州湾取样站位图

Fig. 1 The sampling stations in the Jiaozhou Bay

深大于 12m 的站位采集表层、10m 层水样; D5 站水深为 34m, 采集表层、10m 层以及 20m 层的水样。2010 年 8 月, 对 5 个连续站进行了同步采水, 从 7:30 开始, 每隔 2h 采水一次, 直到次日 7:30, 连续采水 13 次。

每个站点用冻存管采集 5ml 水样 3 份, 立即用终浓度为 1% 多聚甲醛进行固定, 避光放置 30min, 然后放入液氮中快速冷冻, 再放入 -80℃ 超低温冰箱保存, 用于微微型浮游植物丰度的检测。

### 2.2 微微型浮游植物计数

样品从 -80℃ 超低温冰箱取出后, 置于 37℃ 水浴锅中融化。融化后的水样经 2μm 滤膜过滤, 取 1ml 滤液加 10μl 内标荧光微球工作液, 用旋涡混匀器混合均匀 5min 后上样, 以 HIGH 的速度运行 2min, 用 Cellquest 软件获取每个水样的 SSC-FL3 和 FL2-FL3 组合的双参数组合图像。

### 2.3 环境理化参数的测定

水温、盐度、深度等资料由船载 SBE19-CTD 测得, 营养盐数据由中国科学院烟台海岸带研究所提供。

### 2.4 数据处理和分析

用 Sufer 7.0 软件分析各水层微微型浮游植物水平分布趋势; 用 Grapher 软件作图分析垂直分布规律, 用独立样本均值的差异性检验垂直分布和季节分布差异的显著性; 利用 PCA 主成分分析法分析四季 Syn 和 Euk 丰度与营养盐、温度等环境因子的相关性。

## 3 结果

### 3.1 微微型浮游植物的时空分布

在胶州湾水域中检测到 2 类微微型浮游植物: 聚

球藻和微微型真核浮游植物, 4 个季节均未检测到原绿球藻。

3.1.1 聚球藻时空分布

3.1.1.1 聚球藻的水平分布 对胶州湾聚球藻丰度表层(图 2)的水平分布进行 4 个季节的分析发现, 春、夏季聚球藻在湾内西南部近岸海域表层丰度较高, 秋季高值区出现在湾口中部表层, 冬季在湾内西北部出现高值区, 各季节湾内东北部海域均出现聚球藻丰度低值区。

3.1.1.2 聚球藻的垂直分布

春季站位表层和 10m 层(或底层)聚球藻丰度的平均值分别为  $3.358 \times 10^3$  个/ml 和  $5.403 \times 10^3$  个/ml; 夏季站位表层和 10m 层(或底层)聚球藻丰度平均值为  $3.994 \times 10^3$  个/ml 和  $1.726 \times 10^4$  个/ml; 秋季站位表层聚球藻丰度为  $5.546 \times 10^3$  个/ml, 10m 层(或底层)丰度为  $6.338 \times 10^3$  个/ml; 冬季站位表层聚球藻丰度为  $3.333 \times 10^3$  个/ml, 10m 层(或底层)丰度为  $4.304 \times 10^3$  个/ml。

利用独立样本的均值差异性检验得出, 夏季聚球藻表层和 10m 层(或底层)的丰度差异性显著 ( $P < 0.01$ ), 底层丰度大约为表层的 4 倍。其它季节差异无显著性。

3.1.1.3 聚球藻季节分布

聚球藻丰度春季在  $1.758 \times 10^3$ — $2.227 \times 10^4$  个/ml 之间, 平均值为  $4.838 \times 10^3$  个/ml; 夏季在  $2.17 \times 10^2$ — $2.329 \times 10^4$  个/ml 之间, 平均值为  $8.55 \times 10^3$  个/ml; 秋季  $1.958 \times 10^3$  —  $9.408 \times 10^3$  个/ml, 平均值为  $5.145 \times$

$10^3$  个/ml; 冬季在  $2.958 \times 10^3$ — $1.008 \times 10^4$  个/ml 之间, 平均值为  $3.61 \times 10^3$  个/ml。夏季聚球藻丰度平均值约是冬季的 2 倍, 差异性显著 ( $P < 0.05$ ), 其它各季节聚球藻丰度间的差异不显著。

3.1.1.4 聚球藻昼夜分布

根据 5 个站位的聚球藻丰度值绘制表层昼夜变化图(图 3)和 D5 站各水层昼夜变化图(图 4)。B3、C4、D5 站表层丰度昼夜变化趋势基本一致且波动较为明显, 在白天 13:00 左右和

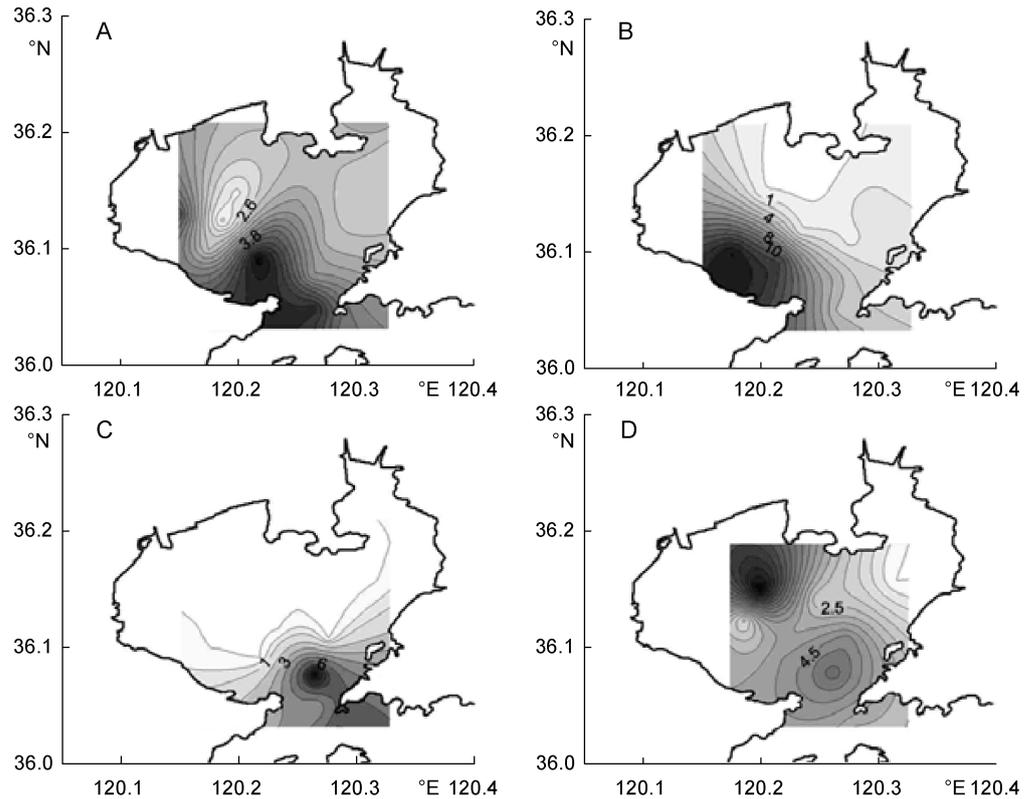


图 2 四季 Syn 丰度表层水平分布图( $10^3$  个/ml)

Fig.2 The horizontal distribution of Syn abundance at surface waters in four seasons ( $10^3$  cells/ml) A. 春季; B. 夏季; C. 秋季; D. 冬季

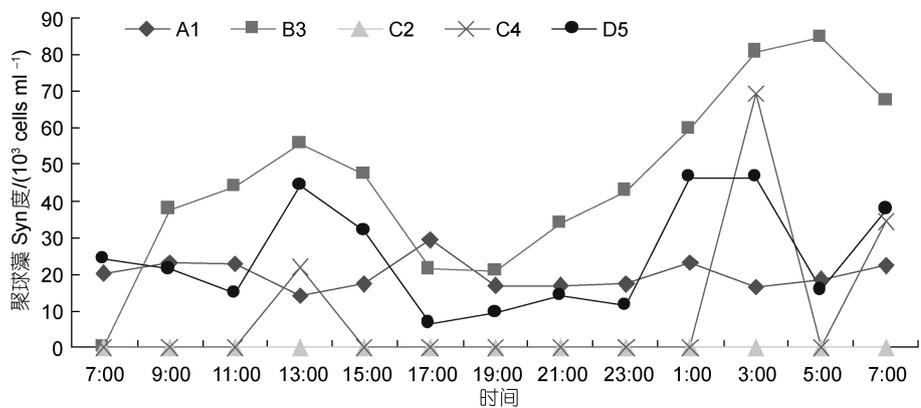


图 3 夏季 5 个观测站位表层 Syn 丰度昼夜变化

Fig.3 Daily variations of Syn abundance of 5 observation stations at surface waters in summer

夜间 3:00 左右分别出现两个波峰, 17:00—23:00 各水层的聚球藻丰度同时处于最低值; A1 和 C2 站表层丰度昼夜变化波动不明显, 且 C2 站表层聚球藻丰度较低。D5 站 10m 层和底层聚球藻丰度变化波动不明显。

### 3.1.2 微型真核浮游植物的时空分布

3.1.2.1 微型真核浮游植物水平分布 对胶州湾微型真核浮游植物丰度表层(图 5)的水平分布进

行 4 个季节的分析发现, 春、秋、冬季微型真核浮游植物表层丰度在湾内西南部出现高值区, 夏季丰度高值区出现在湾内西北部海域。

### 3.1.2.2 微型真核浮游植物丰度垂直分布

春季表层微型真核浮游植物的丰度平均值为  $1.02 \times 10^4$  个/ml, 10m 层(或底层)的丰度平均值为  $9.17 \times 10^3$  个/ml; 夏季表层和 10m 层(或底层)的丰度平均值分

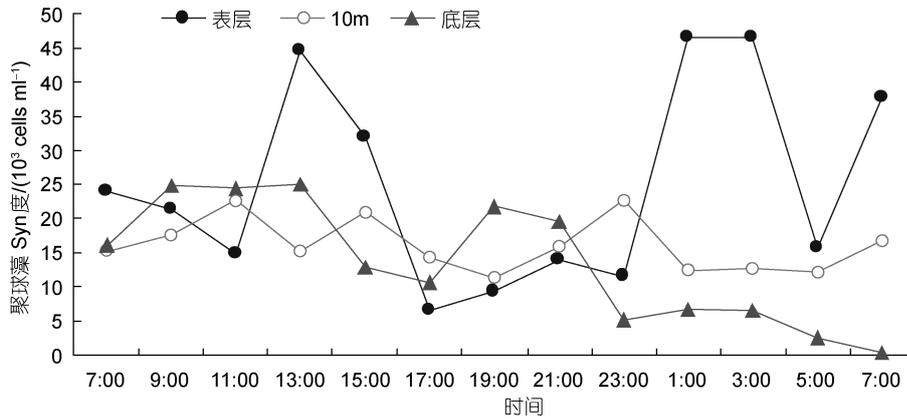


图 4 夏季 D5 站各水层 Syn 丰度昼夜变化

Fig.4 Daily variations of Syn abundance of D5 station in each water layer in summer

别为  $1.83 \times 10^4$  个/ml、 $1.40 \times 10^4$  个/ml; 秋季表层和 10m 层(或底层)的丰度平均值分别为  $6.96 \times 10^3$  个/ml、 $4.86 \times 10^3$  个/ml; 冬季表层和 10m 层(或底层)的丰度平均值分别为  $4.36 \times 10^3$  个/ml、 $4.90 \times 10^3$  个/ml。利用独立样本的均值差异性检验得出各季节垂直分布均无显著性差异。

3.1.2.3 微型真核浮游植物的季节分布 微型真核浮游植物丰度春季在  $2.825 \times 10^3$ — $1.74 \times 10^4$  个/ml 之间, 平均值为  $9.872 \times 10^3$  个/ml; 夏季在  $2.067 \times 10^3$ — $8.651 \times 10^4$  个/ml 之间, 平均值为  $1.63 \times 10^4$  个/ml; 秋季在  $2.483 \times 10^3$ — $1.733 \times 10^4$  个/ml 之间, 平均值为  $6.422 \times 10^3$  个/ml; 冬季在  $1.208 \times 10^3$ — $7.2 \times 10^3$  个/ml 之间, 平均值为  $4.474 \times 10^3$  个/ml。春、夏季微型真核浮游植物丰度明显高于秋、冬季。夏季微型真核浮游植物的丰度约是冬季丰度的 4 倍, 差异性极显著( $P < 0.001$ ); 春季丰度平均值约为秋季的 1.5 倍, 差异性

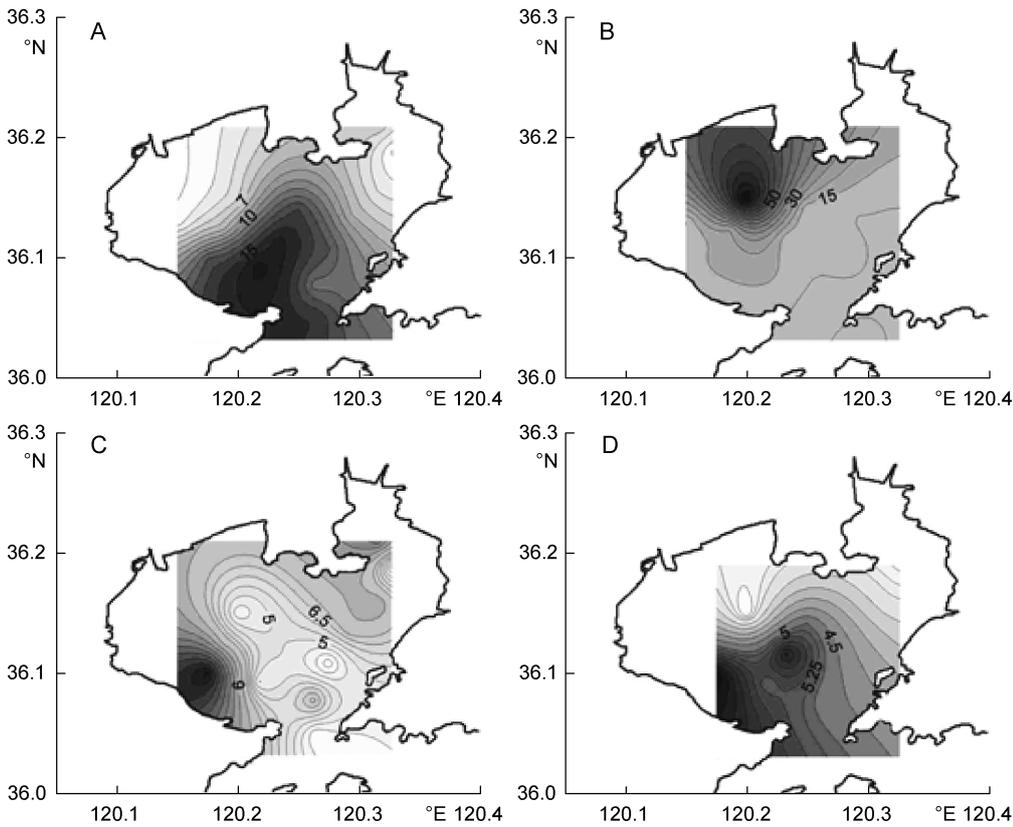


图 5 四季 Euk 丰度表层水平分布图( $10^3$  个/ml)

Fig.5 The horizontal distribution of Euk abundance at surface waters in four seasons ( $10^3$  cells/ml)

A. 春季; B. 夏季; C. 秋季; D. 冬季

显著( $P < 0.05$ )。

**3.1.2.4 微型真核浮游植物丰度昼夜变化** 对 5 个站位的微型真核浮游植物丰度值绘制昼夜变化图(图 6)和 D5 站各水层昼夜变化图(图 7)。B3、C4、D5 站表层丰度昼夜变化趋势基本一致且波动较为明显, 在白天 13:00 左右和夜间 3:00 左右分别出现两个波峰, 17:00—23:00 各水层的 Euk 丰度同时处于最低值。在 D5 站各水层之间的 Euk 丰度变化趋势一致。

**3.2 与环境因子的相关性分析**

本文运用 PCA 主成分分析法对胶州湾海域微型浮游植物与 4 个季节的环境因子进行了相关性研究。环境因子主要包括: 水深、温度、盐度以及营养盐(硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、活性磷酸盐和活性硅酸盐)浓度。

春季, 通过主成分分析(图 8)发现, 第 1 主成分贡献率达到 48.5%, 其中与硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐有较大的正系数, 与 Euk 和盐度有较大的负系数, 第 2 主成分贡献率为 36.2%, 是 Syn、水深、温度、磷酸盐和铵盐的综合反映。这表明 Syn 丰度与水深、磷酸盐浓度显著正相关, 与温度、铵盐浓度显著负相关; Euk 丰度与盐度显著正相关, 与硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐呈显著负相关。

夏季, 第 1 主成分贡献高达 64.3%, 与 Syn、

水深和盐度有较大的负系数, 与各种营养盐成分均有较大的正系数, 第 2 主成分贡献率为 15.0%, 是 Euk、温度和铵盐的综合反映(图 9)。表明 Syn 丰度与盐度、水深显著正相关, 与各种营养盐浓度显著负相关; Euk 丰度与水温正相关, 与铵盐浓度负相关。

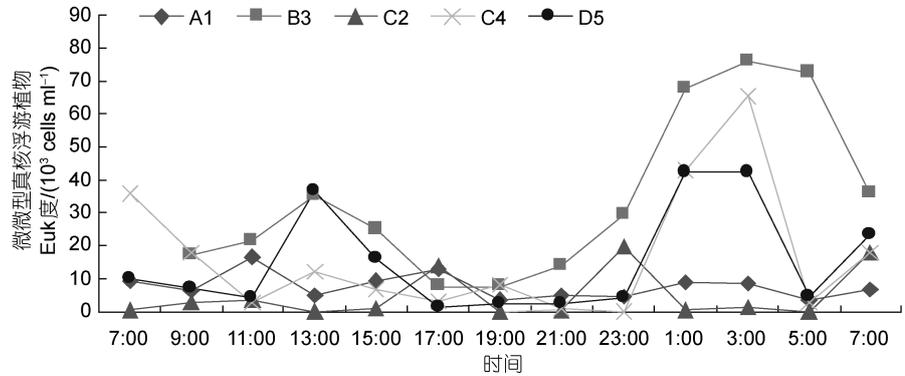


图 6 夏季 5 个观测站位表层 Euk 丰度昼夜变化

Fig.6 Daily variations of Euk abundance of 5 observation stations at surface waters in summer

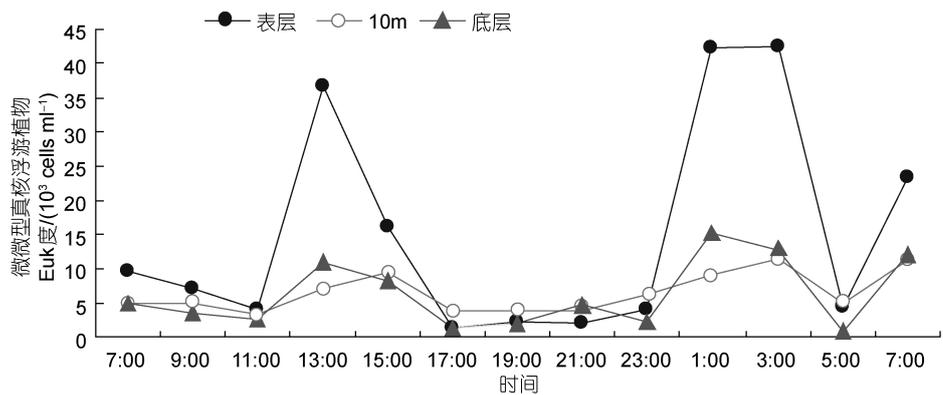


图 7 夏季 D5 站各水层 Euk 丰度昼夜变化

Fig.7 Daily variations of Euk abundance of D5 station in each water layer in summer

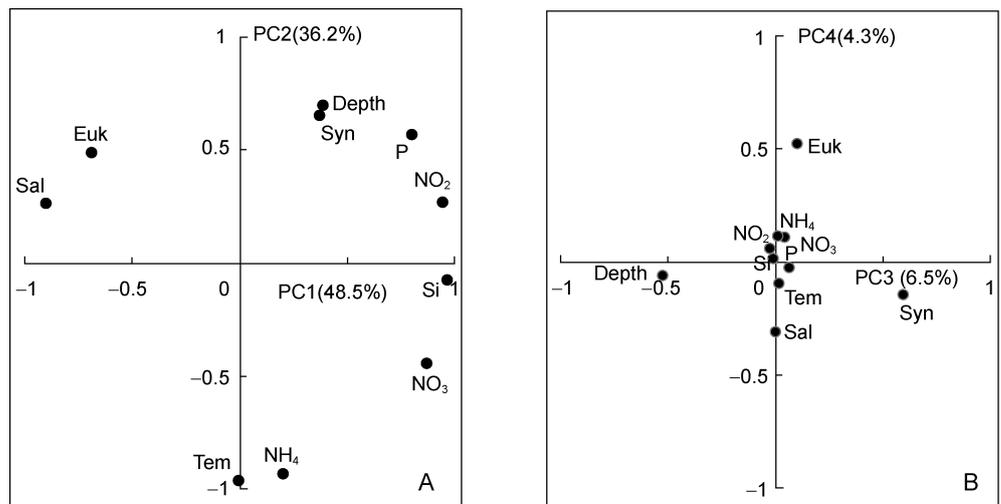


图 8 春季生物和环境因子的主成分分析

Fig.8 Principal components analysis of the biological and environmental factors of spring

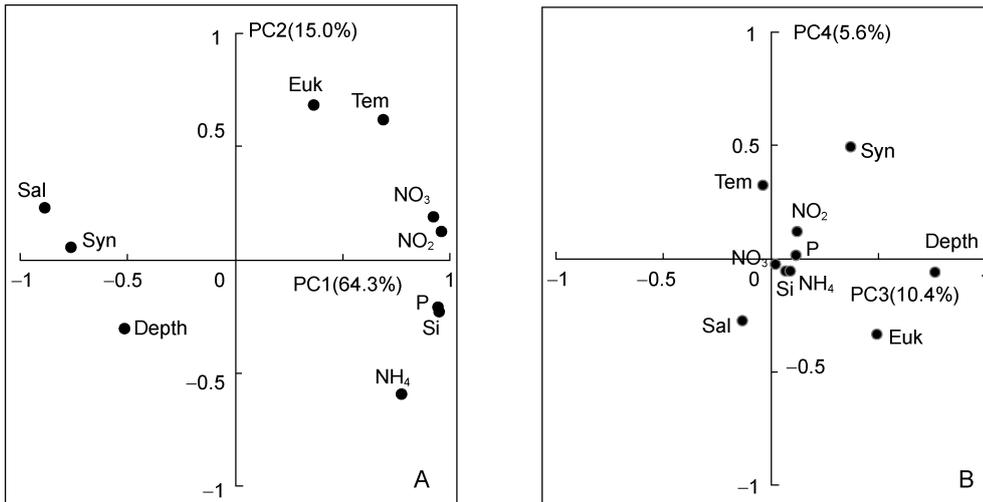


图 9 夏季生物和环境因子主成分分析

Fig.9 Principal components analysis of the biological and environmental factors of summer

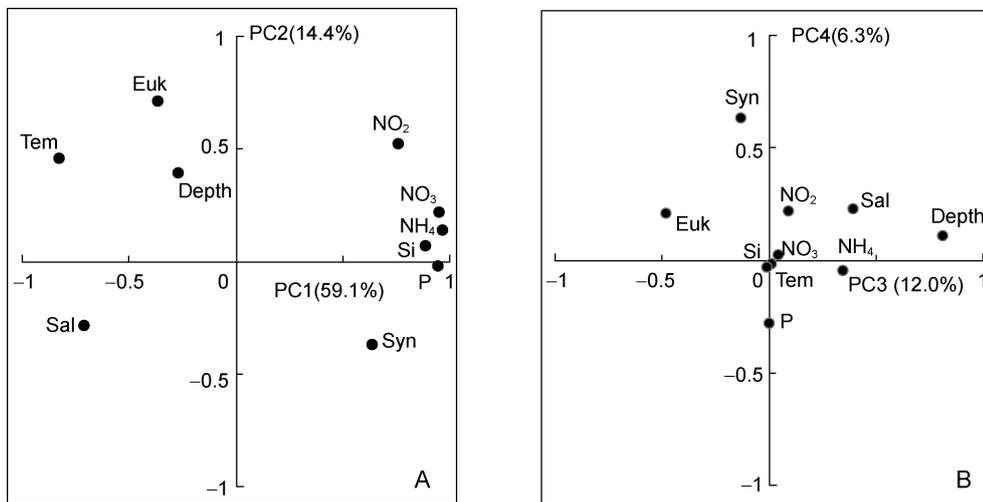


图 10 秋季生物和环境因子主成分分析

Fig.10 Principal components analysis of the biological and environmental factors of autumn

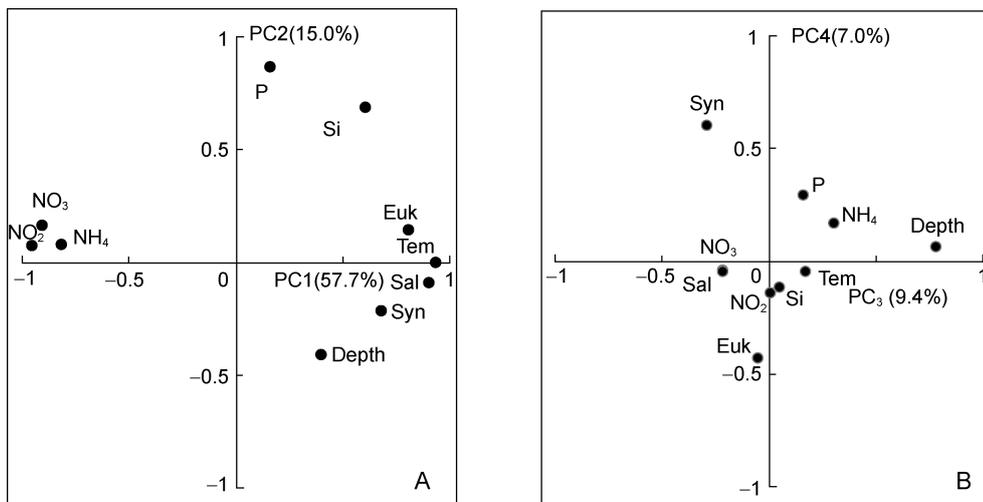


图 11 冬季生物和环境因子主成分分析

Fig.11 Principal components analysis of the biological and environmental factors of winter

秋季, 第 1 主成分贡献率高达 59.1%, 与 Syn 和各种营养盐成分有较大的正系数, 与温度和盐度有较大的负系数。第 2 主成分贡献率为 14.4%, 是 Euk 和亚硝酸盐的综合反映(图 10)。表明 Syn 丰度与各种营养盐的浓度显著正相关, 与温度、盐度显著负相关; Euk 丰度与亚硝酸盐呈正相关。

冬季, 第 1 主成分贡献率高达 57.7%, 与 Syn、Euk、温度和盐度有较大的正系数, 与硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐有较大的负系数(图 11)。第 2 主成分贡献率为 15.0%, 与磷酸盐和硅酸盐有较大的正系数。表明 Syn 和 Euk 丰度均与水温、盐度、硅酸盐显著正相关, 与铵盐显著负相关。

### 4 讨论

本次实验检测到大量 Syn 和 Euk, 并未检测到 Pro, 这主要与三者的生理特性有关。Syn 在 70°N 到 69°S 水体都可以生存。Syn 生存的最适温度为 17—25°C, 因此, 在热带和温带海域丰度较高(Li *et al*, 1983; Olson *et al*, 1990)。Syn 对低温的适应能力较弱, 随着纬度的升高和水温的降低, 其丰度也同步降低(宁修仁等, 1996)。环南大洋水温范围在 -1.6—6.2°C, 南极普利兹湾水温低于 2°C, 在环南大洋和南极

普里兹湾未发现 Syn 的分布。Euk 的分布极其广泛, 几乎存在于所有的海洋生态系统, 从赤道海域到极地海域都有报道。这是由于 Euk 包含的藻种丰富, 其中多种耐低温藻类植物能够在温度较低的环境中大量存在(Lovejoy *et al*, 2006; Worden, 2006), 还有可能存在种群的季节演替(Jiao *et al*, 2005)。Pro 对低温敏感, 在低于 15—18℃ 时其生长受到限制, 当温度低于 10℃ 时其种群的增长被抑制(Buck *et al*, 1996), 因此, 主要分布在南、北纬 40° 之间的热带、亚热带、温带大洋海域、边缘海以及海湾中(杨燕辉等, 2001)。Pro 在中国海域的分布主要集中在东海(陈纪新等, 2006)和南海海域(宁修仁等, 2003), 通过周年调查发现在黄海、渤海和胶州湾海域均未检测到 Pro(本实验室未发表数据)。

胶州湾的 Syn 丰度平均值低于西部热带太平洋、南印度洋、埃拉特海湾、南海北部, 这可能主要与水温有关。西部热带太平洋水温在 23℃ 左右(Partensky *et al*, 1996), 而在本次调查中胶州湾水温的平均值为 12.2℃。Euk 丰度平均值明显高于环南大洋、南极普利兹湾丰度值, 同时也高于南印度洋、埃拉特海湾和南海北部水域的丰度值, 而与西部热带太平洋、东海

及青岛近海的差异不明显(表 1)。这表明影响 Euk 丰度分布的因素较为复杂, 除了温度外, 还要综合考虑营养盐等环境因子对 Euk 丰度分布的影响。

Syn 春、夏、冬季在湾内西部海域丰度较高, 秋季高值区出现在湾口中部; Euk 丰度 4 个季节的高值区均出现在湾内西部海域, 这种分布趋势可能是受湾内洋流因素的影响。胶州湾与黄海水流在物质交换时, 海水在湾内由东部向西部方向环流, 由于流场的复杂结构, 湾内西部区域很难与湾外进行水交换(赵亮等, 2002), 因此 Syn 和 Euk 随环流在湾内西部海域大量富集。

秋季湾口海域的 Syn 丰度高于湾内, 而 Euk 丰度低于湾内。这一特点符合这两类浮游植物自身的生物学特性并且揭示了 Syn 和 Euk 之间存在相互抑制的生长关系(Campbell *et al*, 1986)。夏季温度较高, 光照充足, Syn 和 Euk 的大量繁殖消耗营养盐, 使得秋季营养盐浓度降低, 两者出现对营养盐的竞争。湾口附近由于海水交换频繁, 亚硝酸盐浓度较低, 更利于 Syn 的生长, 其丰度增加, Euk 的生长则受到抑制; 而湾内海域亚硝酸盐浓度高于湾口, 更适合 Euk 的生长。

Syn 丰度的垂直分布在夏季差异较显著, 其余各

表 1 胶州湾海域与其它海区微微型浮游植物丰度的比较  
Tab.1 Comparison of the picoplankton abundance between the Jiaozhou bay and other seas

海区	Pro (个/ml)	Syn (个/ml)	Euk (个/ml)	调查时间(年.月)
环南大洋	ND	ND	$3.62 \times 10^3$	2009.11
南极普利兹湾	ND	ND	$1.05 \times 10^3$	2009—2010 年
西部热带太平洋	最高 $4.4 \times 10^5$	最高 $6.4 \times 10^4$	最高 $1.3 \times 10^3$	1992.08
	$2.1 \times 10^4$	$2.72 \times 10^4$	$1.51 \times 10^4$	2009.10
南印度洋	$4.3 \times 10^4$	$3.09 \times 10^4$	$7.22 \times 10^3$	2010.01
埃拉特海湾(以色列)	$1.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$	$3.0 \times 10^3$	1999.03
南海北部	$4.6 \times 10^4$	$5.0 \times 10^4$	$1.8 \times 10^3$	1999.08
东海	$10^3—10^4$	$10^3—10^4$	最高 $2.0 \times 10^4$	1997—1998 年
南黄海	ND	$5.3 \times 10^4$	$1.9 \times 10^3$	2008.08
北黄海	ND	$3.16 \times 10^4$	$1.42 \times 10^3$	2006.07
	ND	$4.31 \times 10^3$	$2.34 \times 10^3$	2007.01
青岛近海	ND	$2.24 \times 10^4$	$1.86 \times 10^3$	2006.08
	ND	$8.83 \times 10^3$	$4.20 \times 10^3$	2007.01
	ND	$5.43 \times 10^3$	$2.93 \times 10^4$	2007.04
	ND	$1.96 \times 10^4$	$8.34 \times 10^3$	2007.11
胶州湾	ND	$4.84 \times 10^3$	$9.87 \times 10^3$	2010.04
	ND	$8.55 \times 10^3$	$1.63 \times 10^4$	2010.08
	ND	$5.15 \times 10^3$	$6.42 \times 10^3$	2010.10
	ND	$3.61 \times 10^3$	$4.47 \times 10^3$	2011.01

注: ND 表示未检测出, 为本文检测的微微型浮游植物丰度数据

季节差异不显著。据文献报道, Syn 丰度的垂直分布差异在它们丰度较大时比较明显(Béatrice *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2002), 在本文的研究中 Syn 在夏季的丰度最高。此外, 夏季光照较强, 由于强光的抑制作用, Syn 大量分布于真光层底部(Veldhuis *et al.*, 2005), 因此, 夏季 Syn 表层丰度明显低于底层。在其它季节, 光照较弱, 对 Syn 生长的抑制作用也较弱, 同时湾内水体混合程度较高(赵亮等, 2002), 导致各水层 Syn 垂直分布差异不显著。Euk 丰度在垂直分布上没有差异, 原因可能是 Euk 垂直分布的差异通常出现在表层与 50m 层以下的水体中(Worden, 2006), 而胶州湾海域水深普遍较浅, 本文涉及的站位水深普遍在 5—15m 之间, 因此 Euk 垂直分布上无明显差异。

为了准确分析胶州湾水域微微型浮游植物的昼夜变化规律, 本文对胶州湾 5 个站位同时同步进行了 24h 的连续观测。胶州湾 B3、C4、D5 连续站的表层 Syn 和 Euk 丰度变化趋势比较一致, 均在 13:00 和 3:00 出现峰值。原因可能是由于中午水温和光照强度都达到一天的最高值, Syn 和 Euk 分裂活跃, 其丰度在 13:00 也达到最高值; 另一个峰值出现在午夜 3:00, 这可能与微微型浮游植物的细胞分裂周期有关, Campbell 等(1986)发现 17:00 左右 Syn 细胞丰度较低但其分裂能力最强, 随着细胞分裂的增多在午夜左右细胞丰度达到最高峰。这也与 Landry 等(1997)研究得到的太平洋海域的浮游植物丰度昼夜变化规律一致。A1 和 C2 站位微微型浮游植物丰度较低且变化趋势无明显的规律。A1 站位位于东北部近岸靠近排污区, 由于河流中输入悬浮颗粒物浓度增加而使光合作用受到抑制, 或是由于沿岸重金属或有机污染物排放而产生的毒性作用, 致使微微型浮游植物丰度降低。C2 站位靠近胶州湾大桥, 跨海大桥的修建会引起沉积物的搅动(张珂等, 2011), 对水质的污染较大, 因此微微型浮游植物的丰度极低。同时检测发现该站位异养细菌和浮游病毒的丰度值也极低(本实验室未发表数据), 说明人类活动对生态群落结构有很大的影响。

通过 Syn、Euk 与环境因子的主成分分析发现, 在不同季节影响 Syn、Euk 生长的主要限制因素不同。在冬季 Syn 和 Euk 丰度均与温度正相关, 因为冬季水温较低, 细胞活性较低, 温度成为 Syn 和 Euk 生长的主要限制因素, 温度升高, 二者的丰度增高。在其它季节, 水温适宜 Syn 和 Euk 的生长, 二者丰度主要受营养盐等环境因子的影响。

## 参 考 文 献

- 宁修仁, 史君贤, 刘子琳, 1996. 南大洋蓝细菌和微微型光合真核生物的丰度与分布. 中国科学(C 辑), 26: 164—171
- 宁修仁, 蔡昱明, 李国为等, 2003. 南海北部微微型光合浮游生物的丰度及环境调控. 海洋学报, 25(3): 83—97
- 杨燕辉, 焦念志, 2001. 原绿球藻 *Prochlorococcus* 的研究进展. 海洋科学, 25(3): 42—43
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山等, 2004. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究. 海洋与湖沼, 35(6): 518—523
- 张 珂, 王朝晖, 冯 杰等, 2011. 胶州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价. 分析测试学报, 12: 1406—1411
- 陈纪新, 黄邦钦, 刘 媛等, 2006. 应用特征光合色素研究东海和南海北部浮游植物的群落结构. 地球科学进展, 21(7): 738—746
- 赵 亮, 魏 皓, 2002. 胶州湾水交换的数值研究. 海洋与湖沼, 33(1): 23—29
- 赵三军, 肖 天, 李洪波等, 2005. 胶州湾聚球藻(*Synechococcus* spp.)蓝细菌的分布及其对初级生产力的贡献. 海洋与湖沼, 36(6): 534—540
- 潘胜军, 沈志良, 2009. 胶州湾叶绿素 *a* 浓度及浮游植物的粒级组成. 应用生态学报, 10: 2468—2474
- Béatrice Bec, Julie Husseini-Ratrema, Yves Collos *et al.*, 2005. Phytoplankton seasonal dynamics in a Mediterranean coastal lagoon: emphasis on the picoeukaryote community. Journal of Plankton Research, 27(9): 881—894
- Buck K R, Chavez F P, Campbell L, 1996. Basin-wide distributions of living carbon components and the inverted trophic pyramid of the central gyre of the North Atlantic Ocean, summer 1993. Aquatic Microbial Ecology, 10(3): 283—298
- Campbell L, Carpenter E J, 1986. Diel patterns of cell division and growth rates of *Synechococcus* spp.. Marine Ecology-Progress Series, 32: 139—148
- Campbell L, Nolla H A, Vaultot D, 1994. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the central North Pacific Ocean, Limnology and Oceanography, 39: 954—961
- Jiao N Z, Yang Y H, Hong N, 2005. Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea. Continental Shelf Research, 25: 1265—1279
- Joint I R, 1986. Physiological ecology of picoplankton in various oceanographic provinces. Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, 214: 287—309
- Joint I R, Owens N J P, Pomroy A J, 1986. Seasonal production of photosynthetic picoplankton and nanoplankton in the Celtic Sea. Marine Ecology Progress Series, 28: 251—258
- Landry M R, Barber R T, Bidigare R R *et al.*, 1997. Iron and grazing constraints on primary production in the central equatorial Pacific: An EqPac synthesis. Limnol Oceanogr, 42(3): 405—418
- Li W K W, Subba E D V, Harrison W G *et al.*, 1983. Autotrophic picoplankton in the tropical ocean. Science, 219: 292—295
- Liu H, Suzuki K, Minami C *et al.*, 2002. Picoplankton community

- structure in the subarctic Pacific Ocean and the Bering Sea during summer 1999. *Marine Ecology-Progress Series*, 237: 1—14
- Lovejoy C, Massana R, Pedrós-Alió C, 2006. Diversity and distribution of marine microbial eukaryotes in the Arctic Ocean and adjacent seas. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(5): 3085—3095
- Olson R J, Chisholm S W, Zettler E R *et al*, 1990. Spatial and temporal distributions of prochlorophyte picoplankton in the North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I*, 37: 1033—1051
- Partensky F, Blanchot J, Lantoiné F *et al*, 1996. Vertical structure of picophytoplankton at different trophic sites of the tropical northeastern Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I: Oceanographic Research Papers*, 43(8): 1191—1213
- Veldhuis M J W, Timmermans K R, Crootb P *et al*, 2005. Picophytoplankton; a comparative study of their biochemical composition and photosynthetic properties. *Journal of Sea Research*, 53: 7—24
- Worden A Z, 2006. Picoeukaryote diversity in coastal waters of the Pacific Ocean. *Aquatic Microbial Ecology*, 43: 165—175

## THE ABUNDANCE OF PICOPHYTOPLANKTON AND CORRELATION ANALYSIS WITH ENVIRONMENTAL FACTORS IN JIAOZHOU BAY

YANG Lin<sup>1,4</sup>, WANG Min<sup>1</sup>, LIU Guan-Qun<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, LU Long-Fei<sup>1</sup>,  
WANG Yan<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>1</sup>, LIU Dong-Yan<sup>2</sup>, LIU Zhe<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Marine Genetics and Gene Resource Exploitation of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, 266003; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, 264000;  
3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266003;  
4. Institute of Evolution & Marine Biodiversity, Ocean University of China, Qingdao, 266003)

**Abstract** The abundance and distribution characteristics of picophytoplankton in the Jiaozhou Bay in four seasons were investigated by flow cytometry, and the correlations with environmental factors was analyzed. The abundance of *Synechococcus* ranged from  $2.17 \times 10^2$  cells/ml to  $2.329 \times 10^4$  cells/ml. It was high in the western waters and the inlet of Jiaozhou Bay. The abundance of *Synechococcus* in the bottom layer was only significantly higher than that in the surface layer in summer. There was obvious difference between the *Synechococcus* abundance of summer and winter. The *Synechococcus* abundance of three continuous stations (B3, C4 and D5) fluctuated, and showed two peaks in 13:00 and 3:00 respectively. The abundance of Picoeukaryote ranged from  $1.028 \times 10^3$  cells/ml to  $8.651 \times 10^4$  cells/ml, and it was high in the western waters. There was no significant difference among all water layers in four seasons. The Picoeukaryote abundance of spring and summer were obviously higher than autumn and winter. The Picoeukaryote abundance of continuous stations also fluctuated as the *Synechococcus*. Principal components analysis showed *Synechococcus* and Picoeukaryote had complicated relationship with different environment factors in four seasons. In winter they were positively correlated with temperature. In other seasons, they were mainly influenced by nutrients.

**Key words** Flow cytometry, Picophytoplankton, Jiaozhou Bay, *Synechococcus*, Picoeukaryote