

# 浙江近海海域超微型光合自养浮游生物的时空分布

李汝伟<sup>1,2</sup>, 徐大鹏<sup>3,4</sup>, 刘 强<sup>1,2</sup>, 姚天舜<sup>1,2</sup>, 赵淑江<sup>1,2\*</sup>, 焦念志<sup>3,4</sup>

(1. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022; 2. 浙江海洋大学舟山海洋碳汇联合监测站, 浙江 舟山 316022; 3. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005; 4. 厦门大学海洋微生物与地球圈层研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:**【目的】为了解浙江近海海域超微型光合自养浮游生物——原绿球藻(*Prochlorococcus*, Pro)、聚球藻(*Synechococcus*, Syn)和超微型真核浮游植物(Picoeukaryotes, Euk)的时空生态分布,【方法】于2014年11月(秋)、2015年1月(冬)、2015年5月(春)和2015年7月(夏)连续4个季节采集了浙江近海海域表层海水样品,采用流式细胞仪技术对样品超微型光合自养浮游生物丰度进行了检测,并对其时空分布特征及与环境因子的相关性进行了研究。【结果】从水平分布来看,在4个季节中超微型光合自养浮游生物丰度均为宁波、沈家门、岱山等沿岸海域站位的丰度低,远陆海域东极和枸杞站位的丰度高。从季节分布来看,原绿球藻的季节分布特征为夏季>秋季>冬季>春季,聚球藻的季节分布特征为秋季>冬季>春季>夏季,超微型真核浮游植物的季节分布特征为夏季>秋季>春季>冬季。相关性分析表明,春季,原绿球藻、聚球藻、超微型真核浮游植物均与pH显著正相关;秋季,原绿球藻、聚球藻、超微型真核浮游植物均与温度显著正相关;冬季,聚球藻、超微型真核浮游植物均与盐度显著正相关。【结论】本文超微型光合自养浮游生物丰度近岸海域明显低于远陆海域,这与近岸海域泥沙含量大,水色和透明度低有很大关系。浮游病毒对宿主的裂解也会影响超微型光合自养浮游生物的丰度变化。

**关键词:** 浙江近海; 原绿球藻; 聚球藻; 超微型真核浮游植物; 环境因子; 流式细胞仪

中图分类号: S932.0

文献标识码: A

## Spatial and Temporal Distribution of Picophytoplankton in Coastal Waters of Zhejiang

LI Ru-wei<sup>1,2</sup>, XU Da-peng<sup>3,4</sup>, LIU Qiang<sup>1,2</sup>, YAO Tian-shun<sup>1,2</sup>, ZHAO Shu-jiang<sup>1,2\*</sup>, JIAO Nian-zhi<sup>3,4</sup>

(1. College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhejiang Zhoushan 316022, China; 2. Carbon Sink Time Series Station at Zhoushan, Zhejiang Ocean University, Zhejiang Zhoushan 316022, China; 3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005, China; 4. Institute of Marine Microbes and Ecospheres, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005, China)

**Abstract** 【Objective】The present paper aims to investigate the spatial and temporal distribution of picophytoplankton: *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and Picoeukaryotes in the coastal waters of Zhejiang. 【Method】The representative samples of sea water in the coastal waters of Zhejiang were collected for 4 consecutive seasons in November 2014 (Autumn), January 2015 (winter), May 2015 (spring) and July 2015 (summer). The distributions of picophytoplankton by flow cytometry were analyzed, and the correlation between the abundances of picophytoplankton and environmental factors were studied. 【Result】From the horizontal distribution, in the four seasons, the abundance of picophytoplankton were low-abundance areas in the stations of Ningbo, Shenjiamen, Daishan immediate offshore area, high-abundance areas in the stations of Dongji and Gouqi offshore area. From seasonal distribution, the abundance of *Prochlorococcus* was in order of summer > autumn > winter > spring, the abundance of *Synechococcus* autumn > winter > spring > summer; and the abundance of Picoeukaryotes summer > autumn > spring > winter. *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and Picoeukaryotes were significantly positively correlated with pH in the spring. *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and Picoeukaryotes were significantly positively correlated with temperature in autumn. *Synechococcus* and Picoeukaryotes were positively correlated with salinity in winter. 【Conclusion】In this study, the abundance of picophytoplankton in immediate offshore area was significantly lower than that of far offshore area. The reason was that the sediment content was large, the water color and transparency was low in immediate offshore area. The cracking effect of the virioplankton on the host would affect the abundance of picophytoplankton.

transparency was low in immediate offshore area. The cracking effect of the virioplankton on the host would affect the abundance of picophytoplankton.

**Key words:** Zhejiang coastal waters; *Prochlorococcus*; *Synechococcus*; Picoeukaryotes; Environmental factor; Flow cytometer

收稿日期: 2016-11-10

基金项目: 国家海洋局公益性行业科研专项(201505003号, 201505025号)

作者简介: 李汝伟(1990-),男,硕士研究生,研究方向: 海洋生态学, E-mail: 1264837924@qq.com; \*为通讯作者, 赵淑江, E-mail: sjzhao@zjou.edu.cn

**【研究意义】**超微型光合自养浮游生物是指细胞粒径小于 2  $\mu\text{m}$  的产氧光合自养浮游生物,包括:原绿球藻(*Prochlorococcus*, Pro)、聚球藻(*Synechococcus*, Syn) 和超微型真核浮游植物(Picoeukaryotes, Euk)<sup>[1-2]</sup>。超微型光合自养浮游生物在海洋中分布广泛,具有生长率快、代谢活性强、生物量循环迅速<sup>[3]</sup>、能量转换效率高<sup>[4]</sup>的生态特点,在世界海洋的多数海区,超微型光合自养浮游生物被认为是浮游植物群落的重要组成部分<sup>[5]</sup>。因而成为海洋浮游植物生产力和生物量的主要贡献者,尤其在寡营养的热带海域,可占初级生产力的 80% 以上<sup>[6]</sup>。Azam 等人相继提出了“微食物环”理论,使人们认识到了超微型光合自养浮游生物在全球碳循环中的重要地位<sup>[7]</sup>。近年来,焦念志等提出微生物碳泵(Microbial Carbon Pump, MCP)理论,以自养生物为介质,通过光合作用将大气中的无机碳转化成有机碳,然后在食物网内转化、混合、输送及沉降将碳从真光层传输到深层中的过程,对调节气候变化具有重要作用<sup>[8]</sup>。所以超微型光合浮游生物在海洋生态系统中的地位和作用越来越大,日益成为科学家的研究热点。**【前人研究进展】**浙江近海海域分布着众多渔场,其中以舟山渔场最为著名。舟山渔场及邻近海域地处东海北部的长江口和杭州湾河口区。舟山渔场南起 29°30'N、北至 31°N,西自长江口和杭州湾沿岸、东至 125°E 附近。面积约 5.3  $\times 10^4$  km<sup>2</sup>。舟山渔场沿岸有长江、钱塘江、甬江等多条河流在此入海,大量淡水的注入带来了丰富的营养物质,优越的地理和水文环境造就了我国最大的渔场<sup>[9]</sup>。我国对超微型光合自养浮游生物的研究开始于 20 世纪 80 年代末和 90 年代初<sup>[10-11]</sup>,近年来对超微型光合自养浮游生物的调查已覆盖我国大部分海域<sup>[12-14]</sup>。然而目前对于舟山渔场海域的超微型光合自养浮游生物的分布、变化特点尚缺乏系统的研究。**【本研究切入点】**本文利用流式细胞仪技术对浙江近海海域超微型光合自养浮游生物的动态变化及其与它们环境条件之间的联系进行了研究。**【拟解决的关键问题】**以期为该海域超微型光合自养浮游生物在海洋碳循环中的作用、碳汇潜力研究以及舟山渔场海域海洋生态系统健康机制研究提供一些基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间与站位设定

本研究采样站点位于浙江近海舟山渔场海域,分别于 2014 年 11 月(秋季)、2015 年 1 月(冬季)、2015 年 5 月(春季)、2015 年 7 月(夏季) 4 个季节进

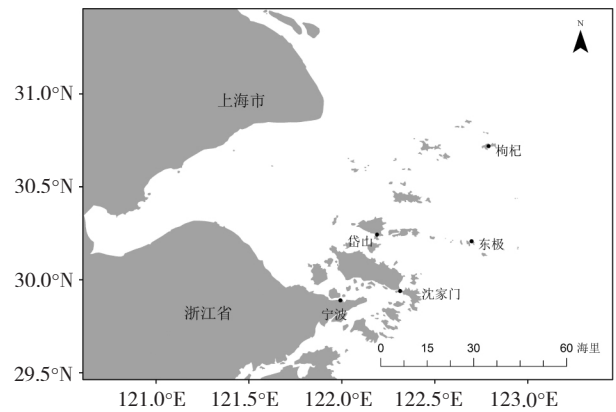


图 1 浙江近海海域采样站位

Fig. 1 Sampling stations in the coastal waters of Zhejiang

行调查研究。根据距离大陆海岸由近到远共设置 5 个站位,分别为宁波站位(121°59'31.5"E, 29°53'22.5"N)、沈家门站位(122°18'47.6"E, 29°56'22.2"N)、岱山站位(122°11'20.2"E, 30°14'34.3"N)、东极站位(122°41'52.1"E, 30°12'26.1"N)、枸杞站位(122°47'21.0"E, 30°43'9.0"N)(图 1)。

### 1.2 样品的采集与保存

根据国标 GB/T12763.6-2007 第 4.2.4.1 规定,确定采样水层为表层海水,采样深度为 0.5 m。样品采用 20  $\mu\text{m}$  筛绢预过滤至小烧杯中,润洗 2~3 次;吸取适量预过滤水样至 2 mL 冻存管中,加入戊二醛(终浓度为 0.5%)固定,在室温下避光放置 20 min,放入液氮中速冻,后转入 -80 °C 超低温冰箱保存。

### 1.3 环境理化参数的测定

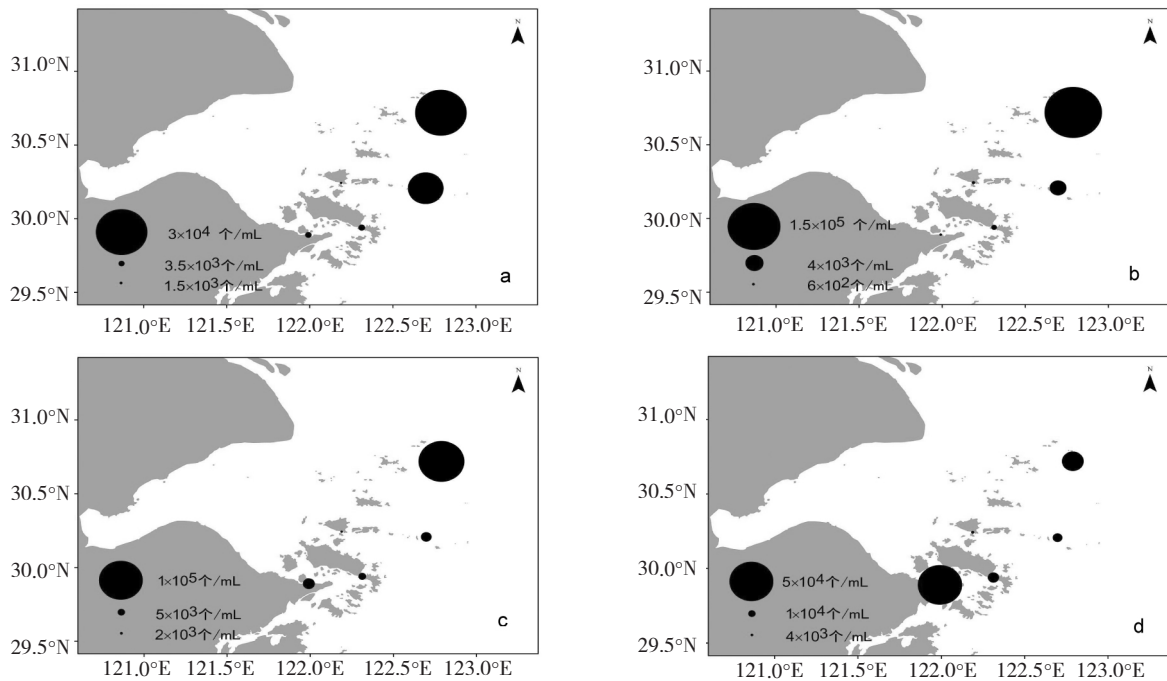
pH 由 Thermo A221 pH 计现场测得,温度、溶解氧由 YSI-550A 溶氧仪现场测得,COD(化学耗氧量)、总磷、氨氮等营养盐指标按照《海洋调查规范:海水化学要素调查》(GB12763.4-2007)规范(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2008),采集表层海水(深度 0.5 m) 500 mL,用 Whatman 公司产孔径为 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤水样至事先清洗干净的塑料瓶中,后放入冷藏保温箱中运回实验室,采用兰州连华科技多参数水质分析仪(5B-2H)测定。

### 1.4 超微型光合浮游生物丰度检测

超微型光合自养浮游生物中含有自发荧光的蛋白,不需要加荧光素可以直接用流式细胞仪检测。将样品 37 °C 水浴中避光解冻后,吸取 1 mL 样品至专用的流式分析试管中,加入 1  $\mu\text{m}$  的标准荧光小球作为内参,混合均匀,将其浓度控制在样品总浓度的 1% 左右,上样分析。

### 1.5 数据分析

运用 FCS Express V3 软件读取超微型光合自养



a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季,下同

图 2 浙江近海海域原绿球藻丰度的分布

Fig. 2 Distribution of *Prochlorococcus* abundance in the coastal waters of Zhejiang

浮游生物丰度数据。采用 arcGIS10.0 地理信息系统软件制作超微型光合自养浮游生物 4 个季节的丰度分布图以及采样站位分布图。利用 SPSS18.0 软件对 4 个季节不同站位超微型光合自养浮游生物丰度的差异性进行分析,并用 Pearson 相关系数法分析超微型光合自养浮游生物丰度与环境因子之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 超微型光合自养浮游生物的分布特征

2.1.1 原绿球藻的分布特征 春季,原绿球藻的丰度范围为  $1.51 \times 10^3 \sim 2.98 \times 10^4$  个/mL,平均值为  $1.19 \times 10^4$  个/mL。夏季,原绿球藻的丰度范围为  $6.01 \times 10^2 \sim 1.53 \times 10^5$  个/mL,平均值为  $3.19 \times 10^4$  个/mL。秋季,原绿球藻的丰度范围为  $2.23 \times 10^3 \sim 1.06 \times 10^5$  个/mL,平均值为  $2.65 \times 10^4$  个/mL。冬季,原绿球藻的丰度范围为  $3.86 \times 10^3 \sim 5.11 \times 10^4$  个/mL,平均值为  $2.09 \times 10^4$  个/mL。春、夏、秋季节原绿球藻丰度均表现为东极和枸杞站位高,宁波、沈家门、岱山站位低。春、夏、秋季节原绿球藻丰度最高值均为枸杞站位,冬季原绿球藻丰度最高值出现在宁波站位。春、秋、冬季节原绿球藻丰度最低值均为岱山站位;夏季,原绿球藻丰度最低值为宁波站位(图 2)。

通过对 4 个季节原绿球藻丰度独立样本均值的检验发现原绿球藻的均值,夏季 > 秋季 > 冬季 > 春

季。各季节均值差异性不大 ( $P > 0.05$ ),均为  $10^4$  个/mL 左右。

2.1.2 聚球藻的分布特征 春季,聚球藻的丰度范围为  $7.47 \times 10^2 \sim 2.59 \times 10^4$  个/mL,平均值为  $7.50 \times 10^3$  个/mL。夏季,聚球藻的丰度范围为  $1.84 \times 10^3 \sim 1.70 \times 10^4$  个/mL,平均值为  $6.23 \times 10^3$  个/mL。秋季,聚球藻丰度范围为  $1.84 \times 10^3 \sim 4.52 \times 10^4$  个/mL,平均值为  $1.80 \times 10^4$  个/mL。冬季,聚球藻丰度范围为  $1.89 \times 10^3 \sim 2.43 \times 10^4$  个/mL,平均值为  $9.84 \times 10^3$  个/mL。冬、夏季聚球藻丰度均表现为东极和枸杞站位高,宁波、沈家门、岱山站位低。春、秋、冬季节聚球藻丰度最高值均为枸杞站位,夏季聚球藻丰度最高值为东极站位;春、秋季节聚球藻丰度最低值均为岱山站位,夏、冬季节聚球藻丰度最低值均为宁波站位(图 3)。

对 4 个季节聚球藻丰度独立样本均值的检验发现,聚球藻的均值秋季 > 冬季 > 春季 > 夏季。各季节聚球藻丰度差异性不大 ( $P > 0.05$ )。

2.1.3 超微型真核浮游植物的分布特征 春季,超微型真核浮游植物的丰度范围为  $2.83 \times 10^2 \sim 4.48 \times 10^3$  个/mL,平均值为  $1.61 \times 10^3$  个/mL。夏季,超微型真核浮游植物的丰度范围为  $5.61 \times 10^2 \sim 4.22 \times 10^3$  个/mL,平均值为  $1.87 \times 10^3$  个/mL。秋季,超微型真核浮游植物的丰度范围为  $6.48 \times 10^2 \sim 3.31$

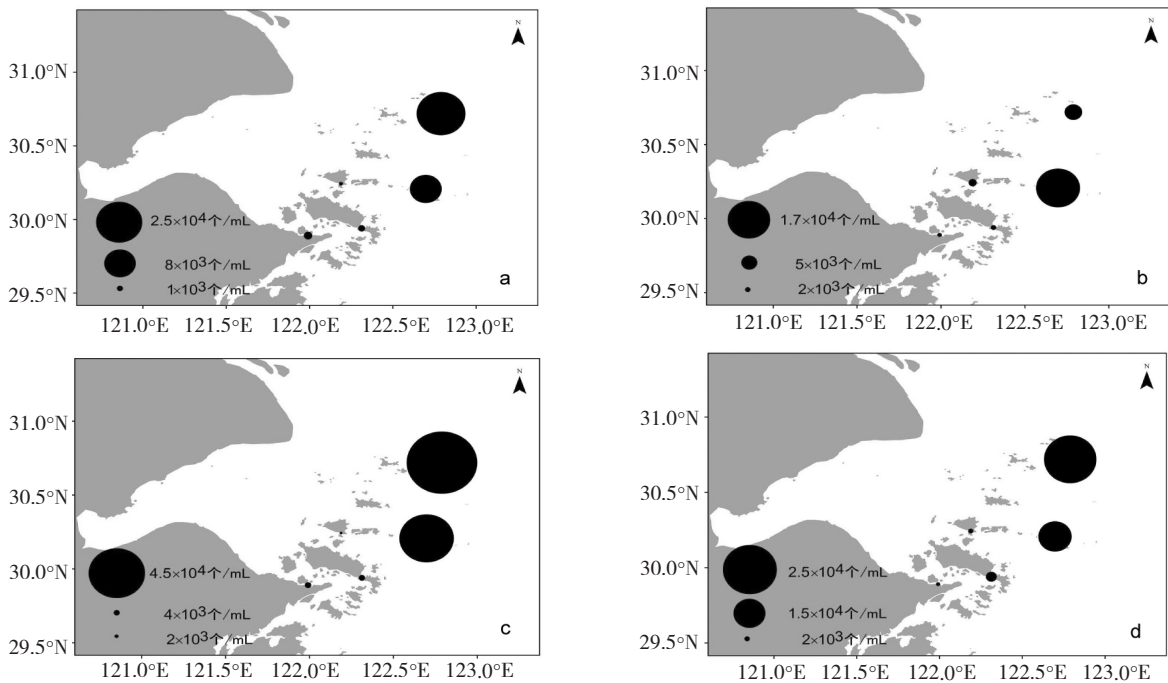


图3 浙江近海海域聚球藻丰度的分布

Fig.3 Distribution of *Synechococcus* abundance in the coastal waters of Zhejiang

$\times 10^3$  个/mL, 平均值为  $1.71 \times 10^3$  个/mL。冬季, 超微型真核浮游植物的丰度范围为  $1.80 \times 10^2 \sim 2.78 \times 10^3$  个/mL, 平均值为  $1.13 \times 10^3$  个/mL。春、夏、秋、冬 4 个季节超微型真核浮游植物丰度的高值区均为东极和枸杞站位, 低值区均为宁波、沈家门、岱山站位。春季, 超微型真核浮游植物丰度最高值为东极站位; 夏、秋、冬季节超微型真核浮游植物丰度最高值为枸杞站位。春、冬季节超微型真核浮游植

物丰度最低值为岱山站位; 夏、秋季节超微型真核浮游植物丰度最低值为宁波站位(图4)。

对 4 个季节超微型真核自养生物丰度独立样本均值的检验发现, 各季节超微型真核浮游植物丰度的均值为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。夏季超微型真核浮游植物丰度最高, 冬季超微型真核浮游植物丰度最低。

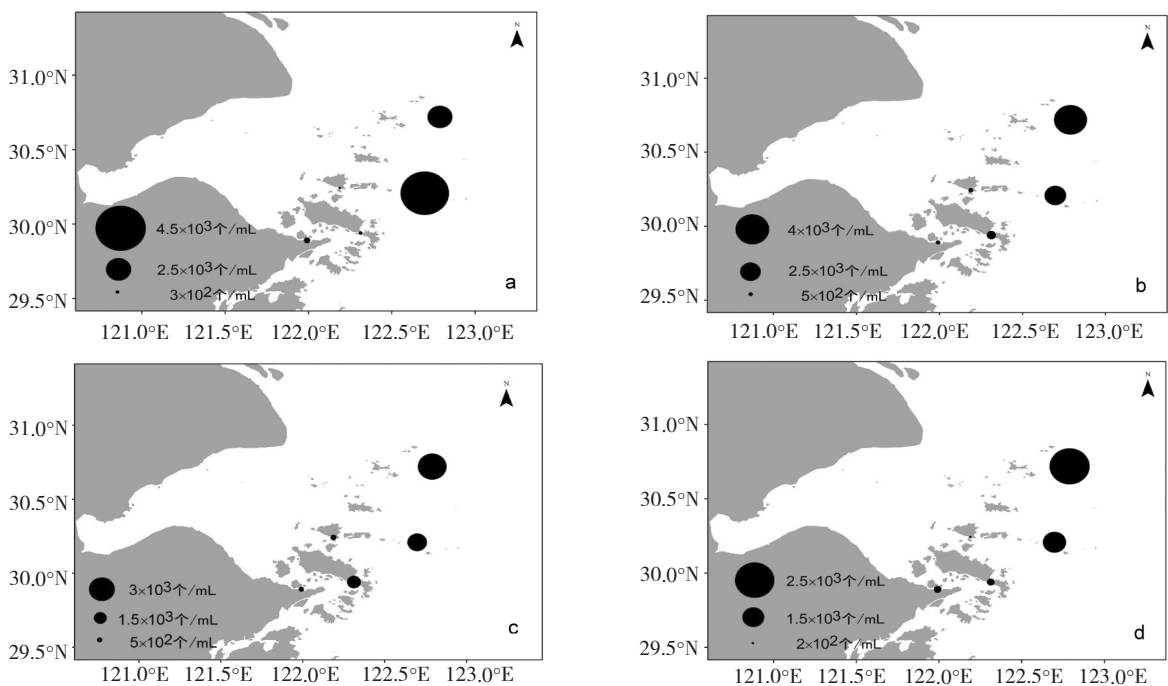


图4 浙江近海海域超微型真核浮游植物丰度的分布

Fig.4 Distribution of picoeukaryotes abundance in the coastal waters of Zhejiang

表 1 春季超微型光合自养浮游生物之间及与环境因子间的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficients among the abundance of picophytoplankton and environmental factors in spring

相关影响因子	Pro	Syn	Euk	Sal	DO	pH	Tem	COD
Syn	0.930**							
Euk	0.753*	0.477						
Sal	0.55	0.474	0.417					
DO	0.617	0.351	0.902**	0.044				
pH	0.811**	0.636*	0.868**	0.497	0.646*			
Tem	0.166	0.262	-0.09	0.676*	-0.5	0.311		
COD	0.58	0.441	0.565	0.972**	0.182	0.646*	0.657*	
TP	-0.741*	-0.753*	-0.446	-0.782**	-0.081	-0.762*	-0.779**	-0.804**
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.642*	-0.432	-0.735*	-0.521	-0.719*	-0.409	0.266	-0.523

注: Pro: 原绿球藻; Syn: 聚球藻; Euk: 超微型浮游植物; Sal: 盐度; DO: 溶解氧; Tem: 温度; COD: 化学耗氧量; TP: 总磷; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 氨氮; \*  $P < 0.05$  水平的显著相关性(双尾  $t$  检验), \*\*  $P < 0.01$  水平的显著相关性(双尾  $t$  检验)。下同。

## 2.2 超微型光合自养浮游生物与环境因子的相关性

春季,原绿球藻丰度与 pH 显著正相关( $P < 0.01$ ,  $r = 0.811$ ) ,与总磷、氨氮显著负相关( $P < 0.05$ ,  $r = -0.741$ ,  $r = -0.642$ )。聚球藻丰度与 pH 显著正相关( $P < 0.05$ ,  $r = 0.636$ ) ,与总磷显著负相关( $P < 0.05$ ,  $r = -0.753$ )。超微型真核浮游植物与

DO、pH 显著正相关( $P < 0.01$ ,  $r = 0.902$ ,  $r = 0.868$ ) ,与氨氮显著负相关( $P < 0.05$ ,  $r = -0.735$ , 表 1)。

夏季,原绿球藻与盐度显著正相关( $P < 0.01$ ,  $r = 0.869$ ) ,与氨氮显著正相关( $P < 0.05$ ,  $r = 0.666$ ) ,与 pH 显著负相关( $P < 0.05$ ,  $r = -0.749$ )。聚球藻丰度与 DO 显著正相关( $P < 0.01$ ,  $r = 0.993$ )。

表 2 夏季超微型光合自养浮游生物之间及与环境因子间的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients among the abundance of picophytoplankton and environmental factors in summer

相关影响因子	Pro	Syn	Euk	Sal	DO	pH	Tem	COD
Syn	0.078							
Euk	0.836**	0.584						
Sal	0.869**	0.005	0.763*					
DO	0.009	0.993**	0.538	-0.041				
pH	-0.749*	0.573	-0.266	-0.598	0.633*			
Tem	0.152	0.579	0.297	-0.287	0.529	0.088		
COD	0.256	0.007	0.231	0.045	0.058	-0.223	0.132	
TP	-0.457	-0.375	-0.693*	-0.752*	-0.391	-0.033	0.395	-0.103
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.666*	0.47	0.784**	0.419	0.466	-0.256	0.44	0.760*

表 3 秋季超微型光合自养浮游生物之间及与环境因子间的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients among the abundance of picophytoplankton and environmental factors in autumn

相关影响因子	Pro	Syn	Euk	Sal	DO	pH	Tem	COD
Syn	0.757*							
Euk	0.757*	0.879**						
Sal	0.666*	0.801**	0.833**					
DO	-0.277	0.066	0.252	0.287				
pH	0.538	0.486	0.624	0.904**	0.288			
Tem	0.909**	0.767**	0.839**	0.892**	0.021	0.832**		
COD	-0.132	0.231	-0.128	-0.155	-0.467	-0.436	-0.298	
TP	-0.494	-0.513	-0.514	-0.859**	-0.002	-0.907**	-0.742*	0.058
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.355	0.082	0.408	0.501	0.506	0.718*	0.586	-0.933**

表 4 冬季超微型光合自养浮游生物之间及与环境因子间的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients among the abundance of picophytoplankton and environmental factors in winter

相关影响因子	Pro	Syn	Euk	Sal	DO	pH	Tem	COD
Syn	-0.121							
Euk	0.087	0.942**						
Sal	-0.254	0.765**	0.666*					
DO	0.188	-0.929**	-0.859**	-0.641*				
pH	-0.07	0.455	0.406	0.572	-0.15			
Tem	0.025	0.978**	0.940**	0.768**	-0.910**	0.385		
COD	0.315	0.647*	0.666*	0.727*	-0.442	0.42	0.756*	
TP	-0.448	-0.053	-0.124	-0.12	-0.3	-0.715*	-0.084	-0.48
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.118	0.557	0.531	-0.017	-0.646*	0.119	0.455	-0.17

超微型真核浮游植物与盐度、氨氮显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.763$ ,  $r = 0.784$ ) ,与总磷显著负相关 ( $P < 0.05$ ,  $r = -0.693$  表 2)。

秋季,原绿球藻与温度显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.909$ ) 聚球藻与盐度、温度显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.801$ ,  $r = 0.767$ )。超微型真核浮游植物与盐度、温度显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.833$ ,  $r = 0.839$  表 3)。

冬季,聚球藻与温度显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.978$ ) ,与盐度、COD 显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.765$ ,  $r = 0.647$ ) ,与 DO 显著负相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = -0.929$ )。超微型真核浮游植物与温度显著正相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.940$ ) ,与盐度、COD 显著正相关 ( $P < 0.05$ ,  $r = 0.666$ ,  $r = 0.666$ ) ,与 DO 显著负相关 ( $P < 0.01$ ,  $r = -0.859$  表 4)。

### 3 小结与讨论

#### 3.1 超微型光合自养浮游生物丰度的时空分布差异

本文原绿球藻夏季丰度高于其它季节,表现为由距离大陆较远的站位向近岸站位逐渐减少的趋势。Guo 等发现东海原绿球藻夏季的丰度 ( $5.6 \times 10^4$  个/mL) 为冬季的 4 倍<sup>[15]</sup>,焦念志等也发现原绿球藻在东海分布的丰度变化很大,最高值出现在夏季黑潮南部海域,在陆架区向近岸方向长江冲淡水区逐渐减少<sup>[16]</sup>。夏季近岸陆源淡水输入,近岸海水中的某些物质对原绿球藻有限制作用<sup>[17]</sup>。冬季宁波站位丰度高于其它季节,可能与冬季海流、水团活动剧烈,陆源物质输入、营养盐以及生物间的相互作用有一定关系。

聚球藻同样表现为全年近岸丰度低,外海丰度

高。聚球藻对光照要求较高,调查海域近岸水体浑浊,水色和透明度低<sup>[18]</sup>,不利于聚球藻生长,近岸聚球藻丰度低,这与魏玉秋等对珠江口海域超微型光合自养生物的结果一致<sup>[14]</sup>;从东海海底地貌来看,东极和枸杞站位正处于现代河口水下三角洲之上<sup>[19]</sup>,随着离岸距离增加,水体悬浮体浓度降低,透光性增强。其特殊的地理位置使其深受长江冲淡水影响,长江等其它河流带来了大量营养盐和有机物,除此以外,台湾暖流对该海域影响明显<sup>[20]</sup>,因而聚球藻丰度高于近岸。聚球藻除秋季丰度为  $10^4$  个/mL 之外,其它 3 个季节丰度均为  $10^3$  个/mL 左右。这可能与该海域秋季开始盛行西北季风导致海水垂直运动剧烈,造成聚球藻在水体中的混合,可能与物理-生物海洋学综合作用有关。

本次调查发现超微型真核浮游植物丰度夏季最高。夏季太阳辐射强烈,光合作用强,水温高可能是导致超微型真核浮游植物丰度明显高于其它季节的主要原因,冬季的低温对超微型真核浮游植物的生长可能有限制作用<sup>[15]</sup>。海水中大量的浮游病毒对浮游植物丰度的影响也有很大作用,对欧洲日内瓦湖中的微生物调查发现 66% 的浮游植物的死亡是由浮游病毒的裂解引起的<sup>[21]</sup>。

#### 3.2 超微型光合自养浮游生物与环境因子的相关性

春季,原绿球藻、聚球藻、超微型真核浮游植物均与 pH 显著正相关,超微型真核浮游植物与 DO 为显著正相关关系。王小平等对广东红海湾水域溶解氧、pH 分布特征的研究发现,光合作用是导致溶解氧含量和 pH 值升高的主要原因<sup>[22]</sup>。石晓勇等对东海溶解氧和 pH 分布的调查中发现,海水 pH 与溶解氧间呈显著正相关<sup>[23]</sup>。本文也表现出类似的调

查结果,说明海水相对较高的 DO 和 pH 值更有利于水生生物的生存。Tsiola 等发现超微型光合自养浮游生物光合作用会对 N、P 进行吸收<sup>[24]</sup>,这也是本文春、夏季节超微型光合浮游生物与氨氮、总磷显著负相关的重要原因。

夏季 7 月正处于长江丰水期,充沛的长江水量入海,此时长江冲淡水对该海区影响最强烈。海水盐度从近岸向外海逐渐增加,本文原绿球藻丰度的分布情况与此相一致,原绿球藻与盐度的正相关关系揭示出一种以盐度为指示的长江冲淡水的综合影响。秋季,温度是影响超微型光合自养浮游生物丰度的关键因素, Lee 等对东海北部超微型光合自养生物的调查中发现原绿球藻的丰度随温度的升高而增大<sup>[25]</sup>。

最近研究表明,浮游病毒的裂解作用会导致  $\text{NH}_4^+$  的产生,浮游病毒对超微型光合自养浮游生物裂解产生溶解有机氮<sup>[26]</sup>,超微型光合自养浮游生物含有较丰富的 N 和 P<sup>[27]</sup>。张一卉对滇池浮游病毒的研究发现,浮游病毒与总磷也存在显著正相关关系,浮游病毒对宿主的裂解作用会加速富营养化水体中磷的循环<sup>[28]</sup>。所以,推测浮游病毒丰度对水体的营养水平的影响作用与本文中超微型光合自养浮游生物丰度与营养盐存在显著正相关性有很大关系。

冬季,聚球藻与超微型真核浮游植物丰度与温度密切相关,较远离大陆的东极、枸杞站位会受到台湾暖流影响,推测冬季聚球藻与超微型浮游植物的优势种应该是温度依赖型。这与最近在东海、黄海及日本海海域超微型光合自养浮游生物的调查结果相一致<sup>[25-29]</sup>。海面表层水温越低溶解氧的浓度会越高<sup>[30]</sup>,所以在溶解氧含量高的海区,超微型光合自养浮游生物丰度反而会更低。冬季的低温可能是限制超微型光合自养浮游生物生长的重要因素。

#### 参考文献:

[1] Olson R J, Chisholm S W, Zettler E R, et al. Spatial and temporal distributions of prochlorophyte picoplankton in the North Atlantic Ocean [J]. Deep-Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers, 1990, 37(6): 1033 - 1051.

[2] Zubkov M V, Sleight 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: Oceanographic Research Papers, 1998, 45(8): 1339 - 1335.

[3] 宁修仁. 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.

[4] Li W K W, Rao S, Harrison W G, et al. Autotrophic picoplankton

in the tropical ocean [J]. Science (Washington), 1983, 219 (4582): 292 - 295.

[5] Joint I R. Physiological ecology of picoplankton in various oceanographic provinces [M]. Photosynthetic Picoplankton, 1986, 214: 287 - 309.

[6] Zubkov M V, Fuchs B M, Tarran G A, et al. High rate of uptake of organic nitrogen compounds by *Prochlorococcus* cyanobacteria as a key to their dominance in oligotrophic oceanic waters [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(2): 1299 - 1304.

[7] Azam F, Fenchel T, Field J G, et al. The ecological role of water-column microbes in the sea [J]. Marine Ecology Progress Series, 1983, 10(3): 257 - 264.

[8] 焦念志, 张传伦, 李超等. 海洋微生物碳泵储碳机制及气候效应 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(1): 1 - 18.

[9] 俞存根. 舟山渔场渔业生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[10] Vaulot D, Ning X R. Abundance and cellular characteristics of marine *Synechococcus* spp. in the dilution zone of the Changjiang (Yangtze River, China) [J]. Continental Shelf Research, 1988, 8(10): 1171 - 1186.

[11] Jiao N Z, Yang Y H, Mann E, et al. Winter presence of *Prochlorococcus* in the East China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(10): 877 - 878.

[12] 李洪波, 刘述锡, 林凤翔等. 河北沿岸超微型浮游植物的分布特征 [J]. 海洋科学, 2012, 36(7): 49 - 55.

[13] 乐凤凤, 刘诚刚, 郝镭等. 2009 年春季南海黄海聚球藻生长率、被摄食死亡率及其与环境因子的关系 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(1): 34 - 41.

[14] 魏玉秋, 孙军, 丁昌玲. 2014 年夏季南海北部超微型浮游植物分布及环境因子影响 [J]. 海洋学报, 2015(12): 56 - 65.

[15] Guo C, Liu H, Zheng L, et al. Seasonal and spatial patterns of picophytoplankton growth, grazing and distribution in the East China Sea [J]. Biogeosciences, 2014, 11(7): 1847 - 1862.

[16] Jiao N Z, Yang Y H. Ecological studies on *Prochlorococcus* in China seas [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(15): 1243 - 1250.

[17] 焦念志. 海洋微生物生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 315.

[18] 李家彪. 东海区域地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 2008.

[19] 陈中原, 周长振, 杨文达等. 长江口外现代水地下水地貌与沉积 [J]. 海洋学研究, 1986, 4(2): 28 - 37.

[20] 张启龙, 王凡. 舟山渔场及其邻近海域水团的气候学分析 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 48 - 54.

[21] Parvathi A, Zhong X, Ram A S P et al. Dynamics of auto-and heterotrophic picoplankton and associated viruses in Lake Geneva [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(3): 1073 - 1087.

[22] 王小平, 贾晓平, 林钦等. 红海湾水域溶解氧、pH 值、盐度和营养盐分布特征及相互关系研究 [J]. 海洋通报, 1999, 18(5): 35 - 40.

[23] 石晓勇, 王修林, 陆茸等. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨 [J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(5): 404 - 412.

[24] Tsiola A, Pitta P, Fodelianakis S, et al. Nutrient limitation in surface waters of the oligotrophic eastern Mediterranean sea: an enrich-

- ment microcosm experiment [J]. *Microbial Ecology*, 2016, 71(3): 575–588.
- [25] Lee Y, Choi J K, Youn S, et al. Influence of the physical forcing of different water masses on the spatial and temporal distributions of picophytoplankton in the northern East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 88: 216–227.
- [26] Shelford E J, Middelboe M, Møller E F et al. Virus-driven nitrogen cycling enhances phytoplankton growth [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2012, 66(1): 41–46.
- [27] 李升康 李传标. 海洋病毒在海洋微生物群落及生物地球化学循环中的作用研究进展 [J]. *海洋科学* 2013, 37(3): 117–121.
- [28] 张一卉. 富营养化水体中微囊藻、菌、病毒数量关系研究 [D]. 武汉: 华中师范大学硕士学位论文 2009.
- [29] Choi D H, Noh J H, Shim J S. Seasonal changes in picocyanobacterial diversity as revealed by pyrosequencing in temperate waters of the East China Sea and the East Sea [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2013, 71(1): 75–90.
- [30] 李亚力. 长江口季节性低氧及其影响因素的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文 2015.

(责任编辑 陈虹)