

冬夏季雷州半岛附近海域微微型光合 浮游生物类群变化及环境影响

钟 瑜^{1,2,3}, 黄良民^{1,2,*}, 黄小平^{1,2}, 邱大俊^{1,2}, 宋星宇^{1,2}, 刘华雪^{1,2,4}

(1. 中国科学院海洋生物资源可持续利用重点实验室, 南海海洋研究所, 广州 510301;

2. 中国科学院热带海洋环境动力学重点实验室, 南海海洋研究所, 广州 510301;

3. 中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站, 深圳 518121; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2006 年夏季和冬季对雷州半岛附近海域微微型光合浮游生物类群数量与分布进行分析研究。结果表明: 该海区微微型光合浮游生物的主要类群为聚球藻 (*Synechococcus*) 和微微型真核生物 (pico-eukaryotes), 二者在夏季的数量变化分别为 $(5.74 \pm 5.0) \times 10^4$ cell/ml 和 $(2.33 \pm 1.82) \times 10^3$ cell/ml, 冬季分别为 $(1.57 \pm 2.17) \times 10^3$ cell/ml 和 $(4.17 \pm 4.40) \times 10^3$ cell/ml。聚球藻的丰度夏季高于冬季, 高值区位于雷州湾海区; 而微微型光合真核生物的丰度冬季高于夏季, 冬季高值出现在雷州湾内 D7 站表层。雷州半岛西部海区微微型光合浮游生物的丰度夏、冬季变化比雷州湾附近海区明显, 营养盐、温度、潮汐等是制约其数量变化的主要因子。

关键词: 聚球藻; 微微型真核浮游生物; 类群变化; 雷州半岛附近海区; 环境影响

文章编号: 1000-0933(2009)06-3000-09 中图分类号: Q145, Q178, Q938.1, Q945 文献标识码: A

Distribution of autotrophic picoplankton and its effect factors in the waters around Leizhou Peninsula in summer and winter

ZHONG Yu^{1,2,3}, HUANG Liang-Min^{1,2,*}, HUANG Xiao-Ping^{1,2}, QIU Da-Jun^{1,2}, SONG Xing-Yu^{1,2}, LIU Hua-Xue^{1,2,4}

1 LMB, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences Guangzhou 510301, China

2 LED, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

3 Marine Biology Research Station, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518121, China

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3000 ~ 3008.

Abstract: Abundance of *Synechococcus* and picoeukaryotes around Leizhou Peninsula were estimated using flow cytometry in summer and winter of 2006. In the summer, the abundances of *Synechococcus* and picoeukaryotes were $(5.74 \pm 5.0) \times 10^4$ cell/ml and $(1.81 \pm 1.16) \times 10^3$ cell/ml respectively; and in the winter they were $(1.57 \pm 2.17) \times 10^3$ cell/ml and $(4.17 \pm 4.40) \times 10^3$ cell/ml. *Synechococcus* were much more abundant in the summer than in the winter, and more abundant in Leizhou Bay than in other areas. In contrast, picoeukaryotes were more abundant in the winter than in the summer in most locations, and reached their highest abundance in the surface waters of Leizhou Bay in winter. Seasonal variation of autotrophic picoplankton population was higher in the waters of west than east of Leizhou Peninsula. Nutrients, temperature, and tide were key factors controlled *Synechococcus* and picoeukaryotes population variations around Leizhou Peninsula.

Key Words: *Synechococcus*; picoeukaryotes; abundance variations; environmental factors; Leizhou Peninsula

基金项目: 中国科学院创新方向资助项目 (KZCX2-YW-213); 国家自然科学基金资助项目 (U0633007, 40576052, 40531006); 广东省 908 专项生物生态和海洋化学资助项目

收稿日期: 2008-03-05; 修订日期: 2009-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hlm@scsio.ac.cn

海洋浮游植物是海洋有机物的初级生产者和能量的主要转换者,其数量和组成直接影响整个生态系统的物质循环和能量流动^[1]。微型光合浮游生物是其重要组成部分之一,是海洋初级生产力的最大贡献者^[2],也是微食物环的重要组成部分^[3]。目前,微型光合浮游生物在南海北部已有少量的分布研究^[4~7],但它在雷州半岛的近岸与海湾水体的分布如何,目前尚未见报道。本文选择夏季和冬季,对雷州半岛的主要海湾与近岸水体的微型光合浮游生物的丰度进行测定,探讨其时空分布和环境调控机制,为微型浮游生物生物生态研究提供相关基础数据。

1 研究方法

1.1 采样站点

雷州半岛为典型的热带季风气候区,附近海域主要包括湛江港、雷州湾及流沙湾附近海区。半岛东部沿岸为半日潮,西部为全日潮。根据雷州半岛的地形特征,选择雷州半岛东侧的雷州湾(110.4°~110.8°E, 20.4°~21.1°N)和西侧的流沙湾至东场湾(109.7°~109.8°E, 20.1°~20.5°N)分别设置 8 个和 4 个站点(图 1),由于站点水深较为接近,均小于 20m,因而取采样的水层为表层、中层、底层,并根据具体深度不同进行调整。分别于 2006 年 8 月和 2007 年 1 月在现场利用 5L 有机玻璃采水器采集水样。

1.2 微型光合生物的样品采集

采集的海水先经 20 μ m 筛绢过滤,转入到 2ml 冻存管;加入甲醛混匀,使之终浓度为 2%;样品移入液氮速冻,后转移到 -20 $^{\circ}$ C 冰箱中保存直至分析。

1.3 微型光合生物的分析

微型光合浮游生物主要类群使用流式细胞仪(FACSCalibur, BD, 488nm 激发)分析。将冰冻水样置于冷水浴中缓慢融化,取 0.5mL 样品加入内标 1 μ mYG 荧光小球(Polysciences INC),混合均匀后上机分析^[8,9]。通过 FL2、FL3 和 FL3、SSC 的双参数图来判别微型光合生物的不同类群^[10]。样品测定和分析使用的软件均为 CellQUEST。

1.4 理化环境参数的测定

水温测量用颠倒温度计,盐度测定用耦合式感应盐度计,营养盐(NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻ 和 SiO₃²⁻)测定用分光光度法,操作程序均按《海洋生物生态调查规程》和《海洋调查规范》进行。

2 结果

2.1 物理环境参数

调查海区大部分站位的夏季温度高于冬季 10 $^{\circ}$ C。夏季,调查海区的水温变化范围为 27.8~31.2 $^{\circ}$ C。海区东部水温较西部水温略高 1 $^{\circ}$ C 左右。冬季调查海区的水温分布范围:17.47~18.61 $^{\circ}$ C。调查海区东部水温比西部水温稍低。

陆源淡水的输入使得夏季海湾内的盐度低于冬季。夏季盐度变化范围在 24.0~34.5 之间。海区东部内湾和湛江港内盐度偏低,仅 24~27.5,向外海逐渐升至 31;西部盐度平均值为 33.96 \pm 0.33,较为稳定。冬季盐度分布范围在 31.0(站点 D1 表层、中层和 D2 表层)到 35.5(海区西部多数站点)之间。

2.2 化学环境参数

N 类营养盐夏季高于冬季。夏季湛江港呈现从湾内向湾外递减趋势,湾内外溶解无机氮(DIN)差异显著,湾内 D1 站点最高值达 0.25mg/L,为 GB3097-1997 海水水质标准中的二类水质,属于中营养水体^[11]。夏

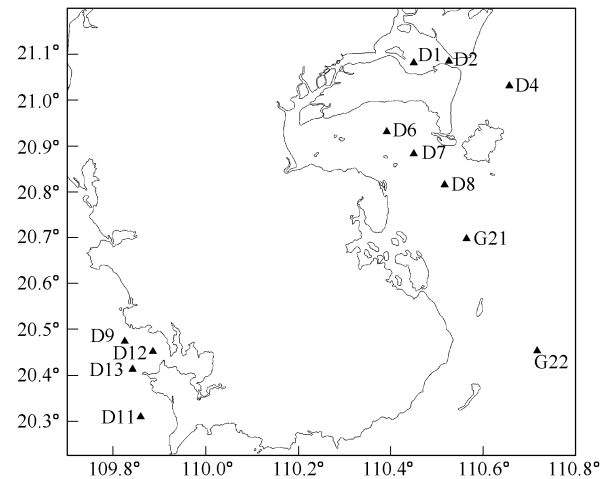


图 1 雷州半岛主要海湾微型光合生物采样站点

Fig. 1 Sampling stations of picoplankton in the sea waters around Leiqzhou Peninsula

季雷州湾内站点除 D7 底层和 G22 站点外,其余站点的 DIN 浓度均在 0.1mg/L 以下,港湾最高值出现于 G22 站点,D7 底层和 G22 站点 NH_4^+ 浓度较高。冬季 DIN 高浓度出现于湾外的 G21 和 G22 站点,同时由于较强烈的水交换,各站点不同水层营养盐浓度也有所差异(图 4,E,G,I)。流沙湾附近的站点,夏季水层差异不大,各站点 DIN 的浓度均在 0.07mg/L 以下,低于东部海区。冬季 NH_4^+ 在 0.01~0.03mg/L 之间变动,DIN 仅比夏季低 0.01mg/L 左右。

磷酸盐(PO_4^{3-})浓度夏季低于冬季。夏季除 D1 站的中层、底层和 G22 站的表层 PO_4^{3-} 浓度高于 0.01mg/L 外,其余水层均低于 0.004mg/L。而冬季浓度在 0.01mg/L 以下的除雷州湾内 D6、D7、D8、G21 站表层和湛江港 D4 站底层及 D2 站底层外,其余站点各水层 PO_4^{3-} 浓度都在 0.015mg/L 左右。湛江港内最高值出现在 D1 站点,而雷州湾内高值位于 G22 站。

2.3 微微型光合浮游生物的分布

本次微微型光合浮游生物调查中,研究海区内未发现原绿球藻的存在,仅检测出聚球藻(*Synechococcus*, SYN)和微微型光合真核生物(pico-eukaryotes, EUK)两大类群,其中 SYN 的丰度较高。SYN 和 EUK 的分布存在明显的时空差异。在时间上,夏季 SYN 的丰度高于冬季,而湾内 EUK 的丰度正好相反,冬季高于夏季。在空间分布上,雷州半岛东部海域 SYN 与 EUK 的丰度高于西部海域,湾内高于湾外。

SYN 的丰度变化范围,夏季在 3.68×10^3 cell/ml(D8 站底层)~ 1.82×10^5 cell/ml(D6 站表层)之间,调查海区总平均值为 $(5.74 \pm 5.0) \times 10^4$ cell/ml;冬季在 0(D1 站)~ 8.38×10^4 cell/ml(D6 站中层)之间,调查海区总平均值为 $(1.57 \pm 2.17) \times 10^3$ cell/ml。EUK 丰度,夏季在 0.34×10^3 cell/ml(D8 底层)~ 8.91×10^4 cell/ml(D1 表层)之间,调查海区总平均值为 $(2.33 \pm 1.82) \times 10^3$ cell/ml;冬季在 1.40×10^3 cell/ml(D2 表层)~ 23.20×10^3 (D7 表层) cell/ml 之间,调查海区总平均值为 $(4.17 \pm 4.40) \times 10^3$ cell/ml(图 2~3)。

SYN 夏季丰度在湛江港内远远高于港外站点,而冬季丰度急剧减少,其中 D1 站仅在底层可检测到(0.03×10^4 cell/ml);夏季雷州湾内 SYN 高值区域分布在湛江东海岛南岸 D6 和靠近湾口的 G21,以 D6 为峰值区域,其表层 SYN 丰度为调查海区夏季最高值,而两站点之间的海域则呈现低值(图 2-A~C);冬季雷州湾内的 SYN 丰度由湾内向海外海站点丰度逐渐降低,整体较夏季有所下降,但 D6 站点的丰度仍保持较高水平(图 2-D~F)。夏季流沙湾海区 SYN 丰度平均值 5.6×10^4 cell/ml,以 D13 站点为 SYN 丰度高值中心;冬季,流沙湾海区 SYN 丰度较夏季有明显降低,海区平均值仅 0.66×10^4 cell/ml,各站点差异不大。

EUK 类群在冬季繁盛,以雷州湾海域最为显著。湾内各站点的 EUK 丰度均较夏季有明显增加,其中 D7 站表层达调查海区的峰值(2.32×10^4 cell/ml),远远高于邻近站点(图 3,图 5-D)。而西部的流沙湾海区 EUK 丰度平均值夏、冬季分别为 2.97×10^3 cell/ml 和 2.79×10^3 cell/ml,季节变化并不明显。

2.4 影响微微型光合浮游生物的分布的环境因子相关分析

使用单因子回归分析,可见影响雷州半岛附近海域微微型光合浮游生物分布的环境因子随季节不同而有所差异,并不完全与某单一环境因子有显著相关关系(表 1)。

表 1 雷州半岛附近海域表层微微型光合浮游生物丰度与环境因子的相关分析

Table 1 Correlation analysis between picoplankton abundance and environmental factors

季节 Season	因子 Factors	温度 Temperature	盐度 Salinity	磷酸盐 Phosphate	硝酸盐 Nitrate	亚硝酸盐 Nitrite	DIN
夏季 Summer	SYN	+0.513 *	-0.069	+0.187	+0.122	+0.267	+0.204
	EUK	+0.302	-0.216	+0.871 **	+0.528 *	+0.754 **	+0.621 *
冬季 Winter	SYN	-0.178	-0.32	-0.567 *	-0.282	-0.215	-0.352
	EUK	-0.133	-0.371	-0.572	-0.27	-0.184	-0.437

+ : 正相关 positive correlation ; - : 负相关 negative correlation ; * : 显著性水平 (p) significance level, * < 0.05, ** < 0.01

EUK 丰度夏季受磷酸盐和亚硝酸盐极显著 ($p < 0.01$) 影响,呈正相关关系,冬季的相关关系不显著;而 SYN 丰度在冬季和夏季,分别受磷酸盐和温度显著 ($p < 0.05$) 影响。

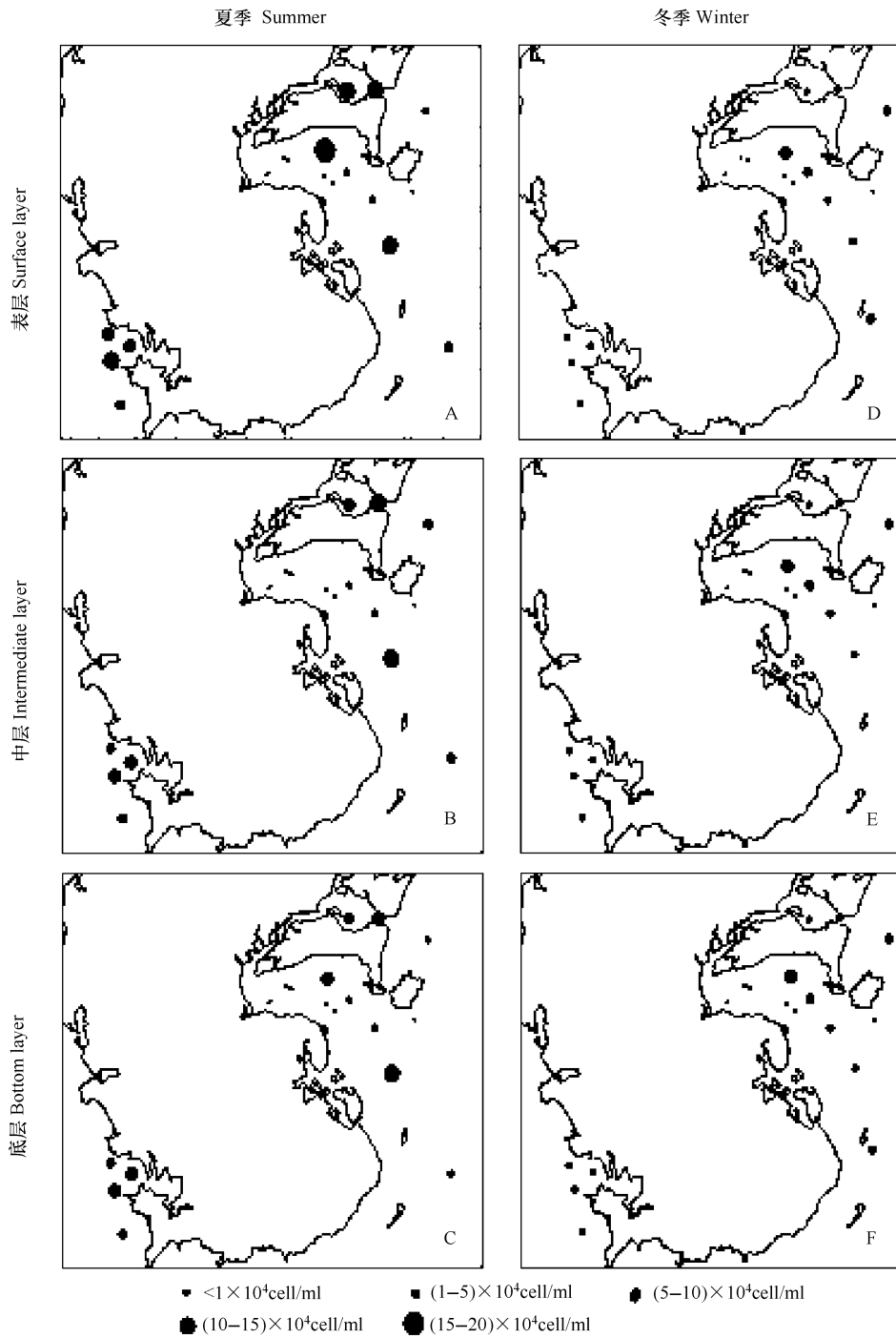


图2 聚球藻(SYN)种群夏季和冬季丰度分布图

Fig. 2 Distribution of *Synechococcus* in summer and winter

A ~ C: 夏季聚球藻种群表、中、底层丰度分布 Abundance of *Synechococcus* in surface, intermediate and bottom layer; D ~ F: 冬季聚球藻种群表、中、底层丰度分布 Abundance of *Synechococcus* in surface, intermediate and bottom layer

3 讨论

3.1 微微型光合浮游生物平面分布的控制因子

上述结果表明,SYN 和 EUK 丰度西部低于东部,而东部海湾呈现出湾内高于湾外的现象。从相关性分析结果来看,EUK 丰度分布受磷酸盐和亚硝酸盐极显著影响,但在冬季这一影响并不显著(表 1)。从陆源影响

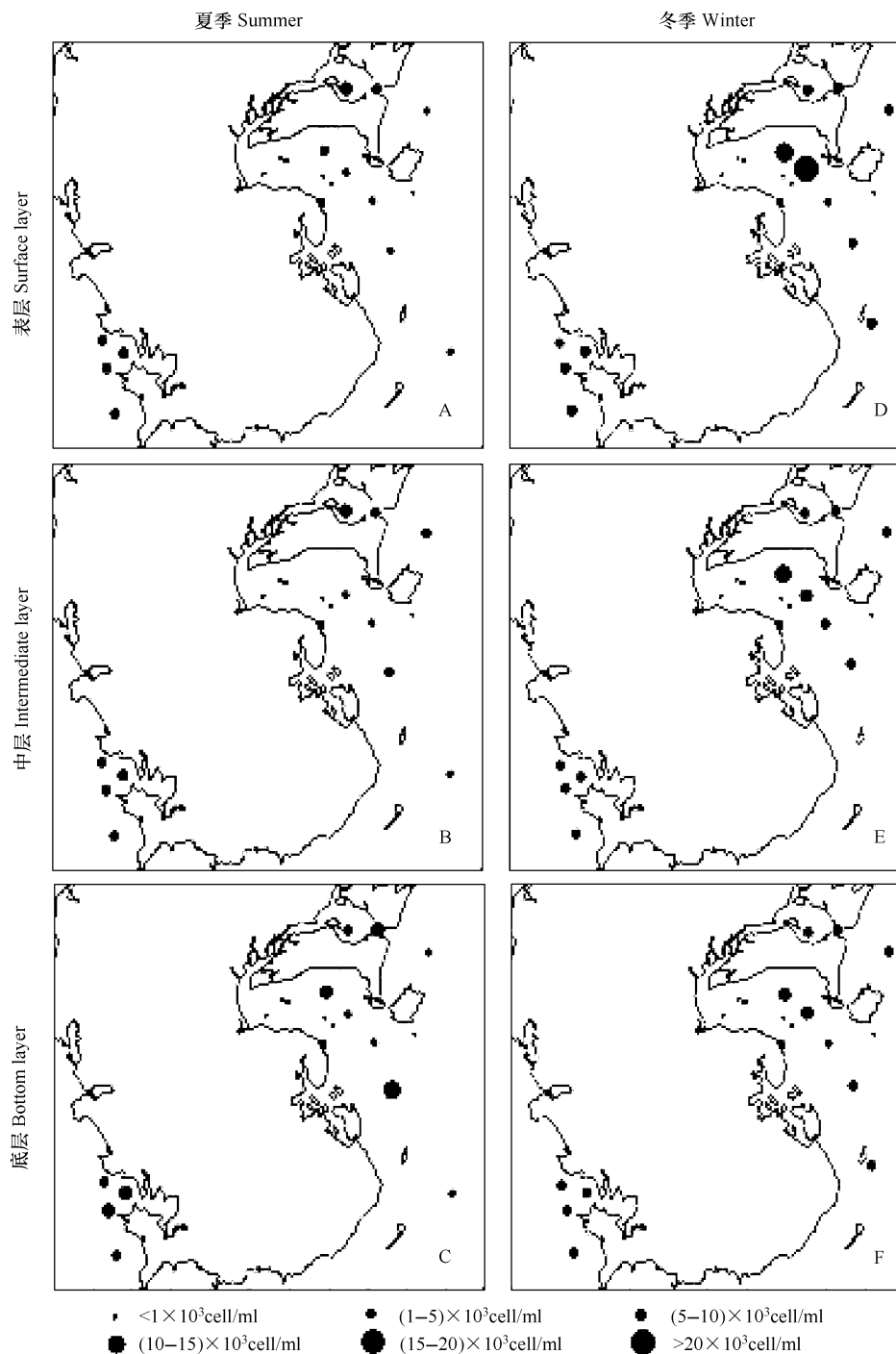


图3 微微型光合真核生物(EUK)种群夏季和冬季丰度分布图

Fig. 3 Distribution of pico-eukaryotes in summer and winter

A ~ C: 夏季微微型光合真核生物表、中、底层丰度分布 Abundance of pico-eukaryotes in surface, intermediate and bottom layer; D ~ F: 冬季微微型光合真核生物表、中、底层丰度分布 Abundance of pico-eukaryotes in surface, intermediate and bottom layer

来看,雷州半岛东部海湾附近的人口数量比西部多,海域环境受人类影响比较大;其次,城月河和南渡河注入到雷州湾海域,使得海域内的陆源物质大量的增加;再者,东部广布的养殖区也使得海区的环境受到影响,如特呈岛和东北大堤附近的网箱养殖是湛江港营养盐输入的主要来源之一^[12],而在湛江港这个相对封闭的港湾,夏季 SYN 丰度在湾内高于湾外。而西部人口较少,环境受人类活动影响比较小。

从流沙湾的冬季温盐数据来看,冬季四个站点的水温和盐度值较东部站点高(图 4-B),受该低温低盐水

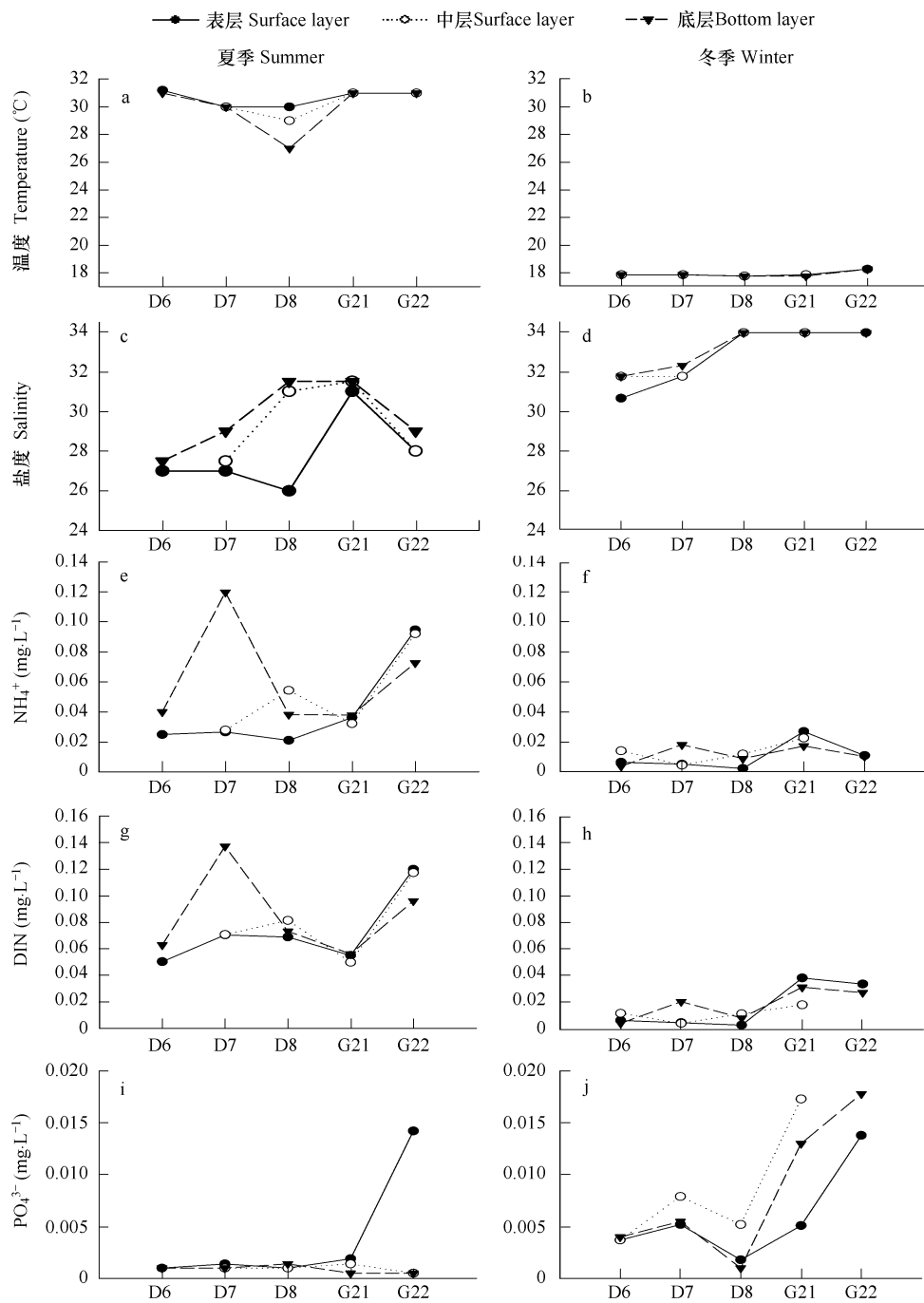


图4 雷州湾断面理化条件状况

Fig. 4 Environmental factors in Leizhou Bay

A, B: 夏、冬季温度 temperature in summer and winter; C, D: 夏、冬季盐度 salinity in summer and winter; E, F: 夏、冬季硝酸盐浓度 concentration of nitrate in summer and winter; G, H: 夏、冬季溶解无机氮浓度 concentration of DIN in summer and winter; I, J: 夏、冬季磷酸盐浓度 concentration of phosphate in summer and winter

的影响不大, 营养盐的改变也不大, 冬夏差异没有西部海区显著, 且雷州半岛西部为全日潮, 潮汐影响较东部的半日潮港湾小, 因而 SYN 和 EUK 平面丰度差异比西部海区小。

夏季雷州半岛附近海域的潮流比较大, 潮位落差在两米附近。雷州湾及附近的海域的微微型光合生物分布也受其影响, D7、D8 站在湾内与湾外的连接处, 受潮水和河水冲刷影响较大, 微微型光合生物生长也受到影响, 同时在这些站位的停留也比较短。D6 和 G21 站位的水体环境较 D7、D8 稳定, 较为适合微微型光合生

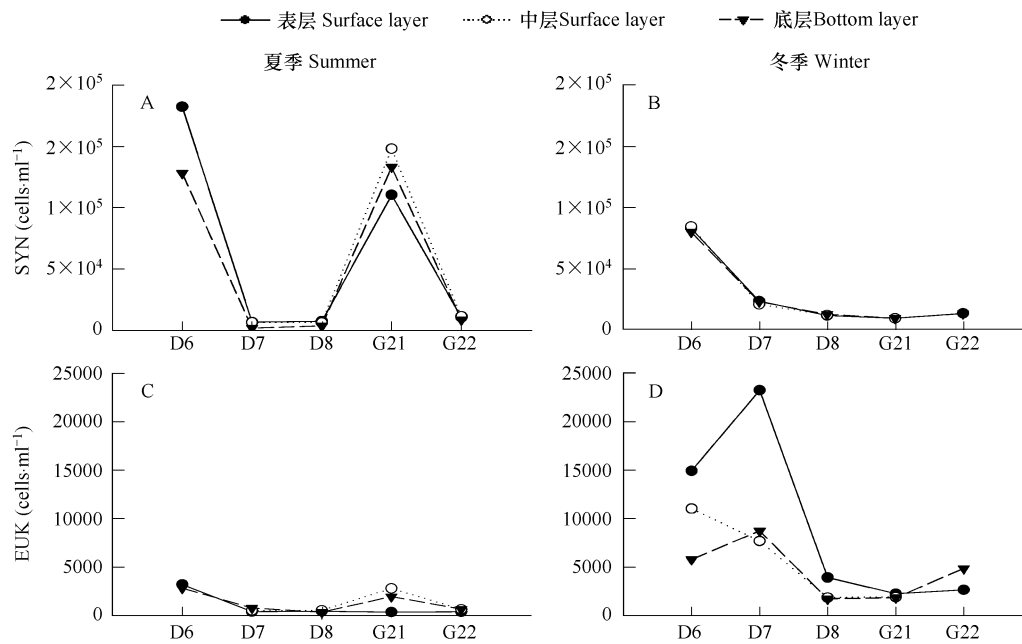


图5 雷州湾断面微微型浮游生物分布状况

Fig. 5 Distribution of picoplankton abundance in Leizhou Bay

A, B: 夏、冬季聚球藻丰度分布 *Synechococcus* abundance in summer and winter; C, D: 夏、冬季微微型光合真核生物丰度分布 picoeukaryotes abundance in summer and winter

物生长,同时这些站位部分的微微型光合生物可能不是原位生长,而是外延输入^[13],二者的共同作用导致 D6, G21 两个站位微微型光合生物的数量大量增加(图 5-A, C)。

3.2 微微型光合浮游生物季节分布的控制因子

本研究海域为海湾及邻近区域,受季风、陆源淡水径流输入和潮汐变化影响。对比冬夏两季度的温盐参数和微微型光合浮游生物的丰度分布,可以看出随之变化的趋势比较明显。季风和海流的季节差异造成了该海区两季温度、盐度、营养盐等环境参数的季节变动,从而造成相应的生物学反馈。

SYN 夏季丰度均值与太平洋西部沿岸亚热带海域^[17]、北部湾^[5]和台湾海峡中部海域^[15]、象山港^[16]的调查结果相近;EUK 冬季丰度均值与台湾海峡中部海域及海南岛东部沿岸带相近。SYN 夏季丰度远远高于冬季,与上述大部分海区的调查结果一致;而 EUK 在冬季繁盛,这与东海海域的研究结果^[18]相一致,而与其他海区结果有所差异(表 2)。

SYN 对温度变化敏感^[19],相关研究表明,其丰度与温度存在正相关关系^[14,18],相对于硝酸盐来说,个体比较小的浮游植物优先利用水中的氨氮^[21]。体积比 EUK 更小的 SYN 在温度不受限制的夏季,对氨氮的吸收具有更强的竞争力^[22],对该海区的营养盐响应更迅速,比微微型真核种群在夏季的竞争优势更强,故夏季东部海湾 SYN 的丰度比较高。而在东北季风盛行的冬季,海区平均温度比夏季低 10℃,低温的限制作用引起 SYN 冬季丰度的降低。虽然海区无机氮浓度有所降低,但磷酸盐浓度的适度增加将有利于 pico 级浮游生物的生长^[23],于是在 SYN 生长受温度限制的冬季,EUK 竞争压力减小^[24],丰度较夏季有明显增加。EUK 类群构成复杂,有可能存在种群的季节演替^[18],温度和海区营养盐的季节变化促进了适应低温的 EUK 类群的生长。东海的相关研究证明了适应低温的硅藻类群的存在^[18],而可能由于地域分布差异造成不同海区 EUK 季节丰度变化的不一致,这还有待进一步的研究加以验证。

表 2 部分近岸海区 SYN 与 EUK 丰度季节变化比较

Table 2 Comparison of seasonal variation of *Synechococcus* and pico-eukaryote abundance in other coastal areas

研究海区 Study area	调查时间 Time	类群 Species	丰度 Abundance ($\times 10^4$ cell/ml)	相关文献 Reference
胶州湾 Jiaozhou Bay	2004-01-02	SYN	0.3 ~ 0.4	[14]
	2003-08 ~ 09	SYN	2.0 ~ 4.0	
海南岛东部沿岸带 coastal waters around eastern Hainan Island	1999-08	SYN	8.38 \pm 9.72	[5]
		EUK	0.19 \pm 0.09	
北部湾 North Gulf	1999-08	SYN	4.84 \pm 4.59	
		EUK	0.28 \pm 0.14	
台湾海峡中部海域 Taiwan Strait	1998-02 ~ 03	SYN	0.817	[15]
		EUK	0.0195	
	1998-08	SYN	5.8696	
		EUK	0.227	
象山港 Xiangshan Bay	1992-02	SYN	0.123	[16]
		EUK	0.037	
	1992-08	SYN	3.29	
		EUK	0.161	
东海 East China Sea	1997 冬季 winter	SYN	0.2	[18]
		EUK	0.21	
	1998 夏季 summer	SYN	8.5	
		EUK	0.043	
雷州半岛附近海区 Waters around Leizhou Peninsula	2006-08	SYN	5.74 \pm 5.0	本文 This study
		EUK	0.233 \pm 0.182	
	2007-01	SYN	1.57 \pm 2.17	
		EUK	0.417 \pm 0.44	

References:

- [1] Turner J T, Roff F C. Trophic levels and trophospecies in marine plankton: Lessons from microbial food web. *Aquatic Microbial Ecology*, 1993, 7: 225—248.
- [2] Li W K W, Rao D V S, Harrison W G, *et al.* Autotrophic picoplankton in the tropical ocean. *Science*, 1983, 219:292—295.
- [3] Azam F, Fenchel T, Field J G, *et al.* The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 10(3):257—263.
- [4] Liu H, Chang J, Tseng C M, *et al.* Seasonal variability of picoplankton in the Northern South China Sea at the SEATS station. *Deep-Sea Research II*, 2007, 54:1602—1616.
- [5] Ning X R, Cai M M, Li G W, *et al.* Photosynthetic picoplankton in the northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(3): 83—97.
- [6] Cai Y M, Ning X R, Liu C G, *et al.* Distribution pattern of photosynthetic picoplankton and heterotrophic bacteria in the northern South China Sea. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(3): 282—298.
- [7] Jiao N Z, Yang Y H. Ecological studies on *Prochlorococcus* in China Seas. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(15): 1243—1250.
- [8] Olson R J, Zettler E R, Chisholm S W, *et al.* Advances in oceanography through flow cytometry. In: Demers S ed. *Particle Analyses in Oceanography*. Berlin: Springer Press, 1991. 351—369.
- [9] Qiu D J, Jiao N Z, Qian L M. Advance in measured techniques of aquatic bacterial counting and cell sizes. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2004, 23(3): 376—385.
- [10] Olson RJ, Vaulot D, Chisholm S W. Marine phytoplankton distributions measured using shipboard flow cytometry. *Deep Sea Research Part A — Oceanographic Research Papers*, 1985, 32: 1273—1280.
- [11] Guo W D, Zhang X M, Yang Y P, *et al.* Potential eutrophication assessment for Chinese coastal waters. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1998, 17(1): 64—70.

- [12] Chen W Z, Lin X, Deng X Q, *et al.* Analyses of nitrogen and phosphorus contents and potential eutrophication in the aquatic farming areas in Zhanjiang Port. *Marine Fisheries*, 2004, 26(2):99–102.
- [13] Calvo-Díaz A, Morán X A G, Suárez L Á. Seasonality of picophytoplankton chlorophyll a and biomass in the central Cantabrian Sea, southern Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, 2008, 72: 271–281.
- [14] Zhao S J, Xiao T, Li H B, *et al.* Distribution of *Synechococcus* spp. In Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6):534–540.
- [15] 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. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(4): 72–82.
- [16] Ning X R, Shi J X, Liu Z L, *et al.* Abundance and distribution of photosynthetic picoplankton and the environmental limitation in Xiangshan Bay. *Acta Oceanographica Sinica*, 1997, 10: 87–95.
- [17] Tsai A Y, Chiang K P, Chang J, *et al.* Seasonal diel variations of picoplankton and nanoplankton in a subtropical western Pacific coastal ecosystem. *Limnology Oceanography*, 2005, 50(4): 1221–1231.
- [18] Jiao N Z, Yang Y H, Hong N, *et al.* Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2005, 25: 1265–1279.
- [19] Chiang K P, Kuo M C, Chang J, *et al.* Spatial and temporal variation of the *Synechococcus* population in the East China Sea and its contribution to phytoplankton biomass. *Continental Shelf Research*, 2002, 22:3–13.
- [20] Ning X R, Shi J X, Liu Z L, *et al.* *Synechococcus* and photosynthetic picoeukaryotes abundance and distribution in the southern Ocean. *Science in China (Series C)*, 1996, 26(2): 164–171.
- [21] Sin Y, Wetzel R L, Anderson I C. Seasonal Variations of size fractionated phytoplankton along the salinity gradient in the York River Estuary, *Journal of Plankton Research*, 2000, 22(10): 1945–1960.
- [22] Jiao N Z, Wang R. Ammonium uptake and regeneration fluxes of the microplankton assemblages in the Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(3): 217–225.
- [23] Fang T, Li D J, She L H, *et al.* Effect of Irradiance and Phosphate on Growth of Nanophytoplankton and Picophytoplankton, *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2783–2790.
- [24] Furuya K, Hayashi M, Yabushita Y, *et al.* Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50:367–387.

参考文献:

- [5] 宁修仁,蔡昱明,李国为,等. 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*, 2003, 25(3), 83~97.
- [9] 邱大俊,焦念志,钱鲁闽. 水生细菌数量与菌体大小测定技术的进展. *台湾海峡*, 2004, 23(3): 376~385.
- [11] 郭卫东,章小明. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价. *台湾海峡*, 1998, 17(1):64~70.
- [12] 陈伟珍,林轩,邓秀清,等. 湛江港水产养殖区水体氮磷含量及潜在性营养化程度分析. *海洋渔业*, 2004, 26(2):99~102.
- [14] 赵三军,肖天,李洪波,等. 胶州湾聚球菌(*Synechococcus* spp.)蓝细菌的分布及其对初级生产力的贡献, *海洋与湖沼*, 2005, 36(6):534~540.
- [15] 黄邦钦,洪华生,林学举,等. 台湾海峡微微型浮游植物的生态研究 I. 时空分布及其调控机制. *海洋学报*, 2003, 25(4):72~82.
- [16] 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. *海洋学报*, 1997, 10:87~95.
- [20] 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. *中国科学:C辑*, 1996, 26(2):164~171.
- [22] 焦念志,王荣. 胶州湾浮游生物群落 NH_4^+ -N 的吸收与再生通量. *海洋与湖沼*, 1993, 24(3): 217~225.
- [23] 方涛,李道季,余立华,等. 光照和营养盐磷对微型及微微型浮游植物生长的影响. *生态学报*, 2006, 26(9):2783~2790.