

冬季和夏季南海北部浮游纤毛虫的分布特点*

于莹^{1,3} 张武昌¹ 蔡昱明² 丰美萍^{1,3} 李海波^{1,3} 肖天¹

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 国家海洋局第二海洋研究所 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室 杭州 310012; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

提要 本文报道 2009 年冬季和夏季南海北部浮游纤毛虫丰度和生物量的水平分布和垂直分布特点。冬季和夏季纤毛虫的平均丰度分别为(486±484)ind/L 和(809±1008)ind/L; 平均生物量分别为(2.84±3.26)μg C/L 和(1.96±3.80)μg C/L。冬季和夏季纤毛虫丰度和生物量的水平分布特点一致, 呈现由近岸向远岸降低的趋势, 珠江口外断面的水体平均纤毛虫丰度和生物量均明显高于海南岛东部断面, 该趋势在夏季表现得更为突出。冬季和夏季纤毛虫丰度和生物量的垂直分布特点不同, 冬季纤毛虫丰度和生物量在水体的次表层较高; 夏季纤毛虫丰度和生物量总体上在表层或中层出现高值。夏季在珠江口外断面远岸 150m 水深处有一个纤毛虫丰度和生物量的高值区, 这个现象在以往的研究中没有发现过。冬季砂壳纤毛虫很少检出, 夏季共鉴定出砂壳纤毛虫 14 属 22 种, 冬季和夏季砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例分别为 1.7%和 22.6%。

关键词 浮游纤毛虫; 丰度; 生物量; 南海北部

中图分类号 Q958.8 doi: 10.11693/hyhz20130307001

海洋浮游纤毛虫个体微小(粒径 5—200 μm), 在海洋中广泛分布, 是海洋微型浮游动物的重要组成部分, 主要包括无壳纤毛虫及砂壳纤毛虫两大类。纤毛虫主要摄食 pico-和 nano-级浮游生物, 同时被 meso-级浮游动物和鱼类幼体等所摄食, 是连接微食物网和经典食物链的重要中介(Azam *et al.*, 1983; Pierce *et al.*, 1992), 在海洋生态系统的物质循环和能量流动中发挥重要作用。

南海是我国最大的边缘海, 以热带海洋性气候为主, 夏季盛行西南季风, 冬季盛行东北季风; 生态环境复杂多样, 既受珠江等径流的影响, 又存在着季节性的上升流和沿岸流(Gan *et al.*, 2010)。Ning 等(2004)认为南海浮游植物生物量的时空变化受到“季风-环流-营养盐”变化的驱动, 存在着明显的物理-化学-生物海洋学耦合过程。南海复杂的物理化学环境可能通过影响浮游植物进一步影响纤毛虫的时空分布。

南海纤毛虫丰度和生物量分布的研究不多, 主要集中在南海北部海域。刘华雪等(2010)报道了 2007 年夏季南海北部 2 个断面表层纤毛虫丰度的水平分布特征; 张翠霞等(2010)报道了 2007 年秋季海南岛东部海域 13 个断面纤毛虫丰度在 0、10 和 30 m 水层的水平分布特征; 郑丽平等(2012)报道了 2009 年冬季(1 月)南海北部 4 个站位纤毛虫丰度的水平分布和垂直分布特征。这些研究主要揭示单个季节纤毛虫丰度的分布特点, 对纤毛虫丰度的断面分布和季节变化没有深入研究。本文报道 2009 年冬季和夏季南海北部纤毛虫丰度和生物量的水平分布和垂直分布特点, 初步探讨纤毛虫的空间分布与南海物理环境的耦合关系, 以为南海浮游生态系统的研究提供基础资料。

1 材料与方法

分别于 2009 年冬季(2月11日—2月21日)和夏季(8

* 国家重点基础研究发展计划, 2014CB441504 号; 国家自然科学基金项目, U1406403 号, 90711006 号, 40876085 号。于莹, 博士研究生, E-mail: yuyingxl001@163.com

通讯作者: 张武昌, E-mail: wuchangzhang@163.com

收稿日期: 2013-03-07, 收修改稿日期: 2013-05-09

月12日—8月24日) 搭乘“中国海监81”船在南海北部进行浮游纤毛虫的调查。两个航次站位一致, 均在111°—117°E、18°—22°N海域内设S1、S2两个主要断面及g、e、h、m站, 共18个站位(图1)。采用Niskin采水器按0、10、25、50、75、100、150和200 m采集表层到底层(或200m以浅)水样, 使用颠倒温度计测定水温, 使用耦合式感应盐度计测定盐度。

每层取500mL水样GF/F滤膜过滤, 滤膜置于-20°C冰箱保存。滤膜带回实验室用90%丙酮在黑暗中-20°C下萃取24 h后, 用Turner II荧光光度计测量叶绿素a(chl a)浓度。

每层取1 L水样装入塑料样品瓶内, 用Lugol's液固定, 终浓度1%。样品分析按照Utermöhl的方法(Utermöhl, 1958)进行, 自然沉淀至少48 h, 用虹吸管将水样上层清液小心吸出, 剩余约150 mL, 倒入小瓶中, 于阴凉处保存。取16 mL放于沉降杯内, 在Olympus IX71倒置显微镜下100倍或400倍镜检。记录无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫的丰度, 无壳纤毛虫经Lugol's液固定后, 鉴定种类难度较大, 本文没有其分类学信息; 砂壳纤毛虫根据文献(Nie, 1934; Nie *et al.*, 1947; 徐奎栋等, 2001; 张武昌等, 2012)鉴定到种。测量纤毛虫虫体的体长、体宽, 按最接近的几何形状(如柱体、球体和锥体)计算体积。生物量由体积乘转换系数($0.19\text{pg C}/\mu\text{m}^3$, Putt *et al.*, 1989)得来, 砂壳纤毛虫的体积直接按照肉体体积计算。

水体平均 chl a 浓度(mg/m^3)、水体平均纤毛虫丰度(ind/m^3)和生物量($\text{mg C}/\text{m}^3$)是分别将底层或200 m以浅不同水层的 chl a 浓度、纤毛虫丰度和生物量按水层进行积分, 除以水深(水深大于200 m的站位按照200 m计算)得出。纤毛虫丰度、生物量与环境因子的相关性分析采用统计软件 SPSS 16.0, 采用 Pearson 相关分析方法, 置信度设为95%。

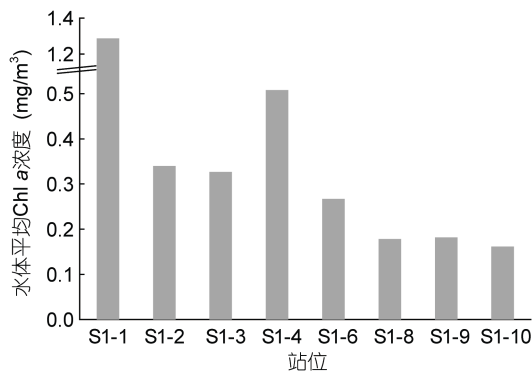


图2 冬季S1、S2断面水体平均chl a浓度的水平分布

Fig.2 Horizontal distribution of depth-weighted average chl a concentration along Transect S1 and S2 in winter

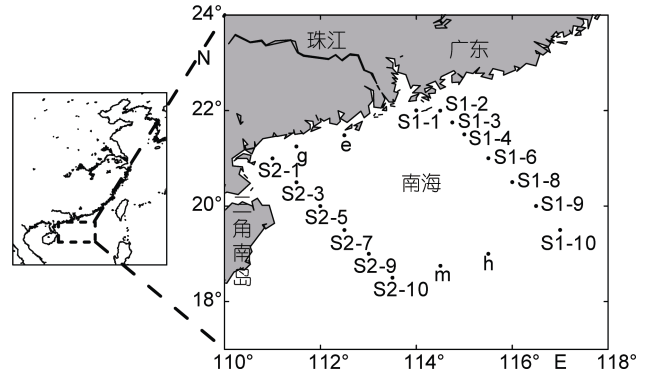


图1 调查站位图

Fig.1 Sampling stations in the northern South China Sea

2 结果

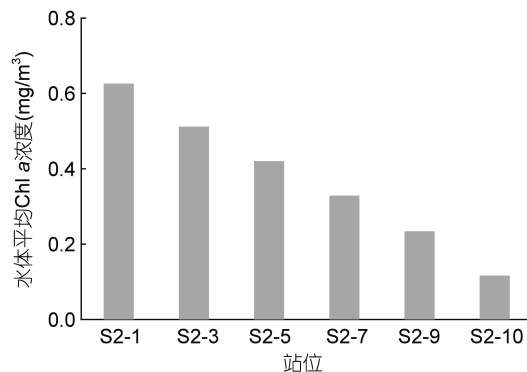
2.1 纤毛虫的丰度和生物量范围

冬季纤毛虫的平均丰度为(486 ± 484)ind/L, 范围为0 ind/L(S2-10站的150m层)—2109 ind/L(S1-6站的10m层); 平均生物量为(2.84 ± 3.26) $\mu\text{g C}/\text{L}$, 范围为0.00 $\mu\text{g C}/\text{L}$ (S2-10站的150m层)—16.89 $\mu\text{g C}/\text{L}$ (S1-2站的10m层)。

夏季纤毛虫的平均丰度为(809 ± 1008)ind/L, 范围为5 ind/L(S2-9站的150m和200层)—5594 ind/L(S1-2站的表层); 平均生物量为(1.96 ± 3.80) $\mu\text{g C}/\text{L}$, 范围为0.01 $\mu\text{g C}/\text{L}$ (S2-9站的100 m层)—29.32 $\mu\text{g C}/\text{L}$ (S1-8站的125m层)。

2.2 水体平均 chl a 浓度、水体平均纤毛虫丰度和生物量的水平分布

2.2.1 近岸到远岸 冬季, S1断面的S1-1站水体平均 chl a 浓度最高, 且明显高于其他站位, 水体平均 chl a 浓度基本呈现从近岸向远岸降低的趋势。S2断面水体平均 chl a 浓度最高值出现在S2-1站, 水体平均 chl a 浓度呈现明显的从近岸向远岸递减的趋势(图2)。



冬季, S1 断面水体平均纤毛虫丰度在 S1-2 和 S1-6 站较高, 基本从近岸向远岸降低, 在最远的 S1-9 和 S1-10 站又略有升高; S1 断面水体平均纤毛虫生物量在 S1-1 和 S1-2 站较高, 基本从近岸向远岸降低。S2 断面水体平均纤毛虫丰度和生物量的水平分布模式类似, 均在 S2-1 站较低, S2-3 站最高, 从 S2-3 站向远岸基本逐渐降低(图 4)。

夏季, S1、S2 断面水体平均 chl *a* 浓度的水平分

布模式同冬季类似(图 3)。

夏季, S1 断面水体平均纤毛虫丰度在 S1-1 站较低, S1-2 站最高, 从 S1-2 站向远岸基本逐渐降低; S1 断面水体平均纤毛虫生物量在 S1-8 站最高, 除了 S1-8 站外, 水体平均纤毛虫生物量基本从 S1-2 站向远岸降低。S2 断面水体平均纤毛虫丰度和生物量的水平分布模式类似, 均在 S2-1 站最高, 呈现明显的从近岸向远岸递减的趋势(图 5)。

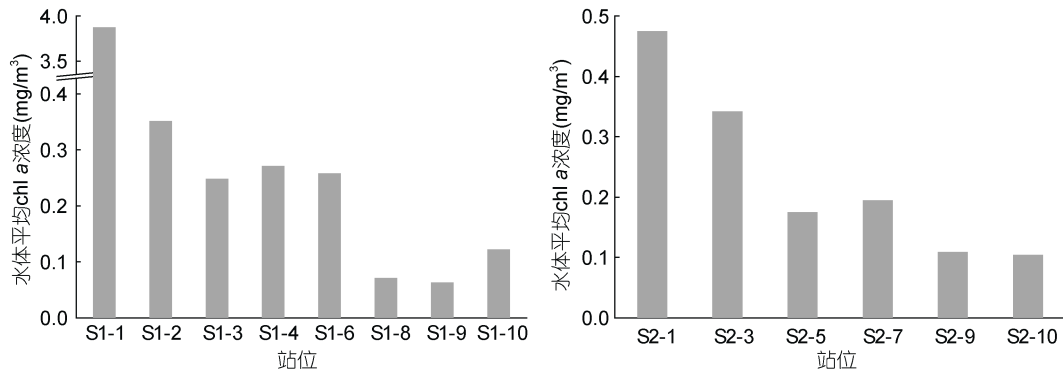


图 3 夏季 S1、S2 断面水体平均 chl *a* 浓度的水平分布

Fig.3 Horizontal distribution of depth-weighted average chl *a* concentration along Transects S1 and S2 in summer

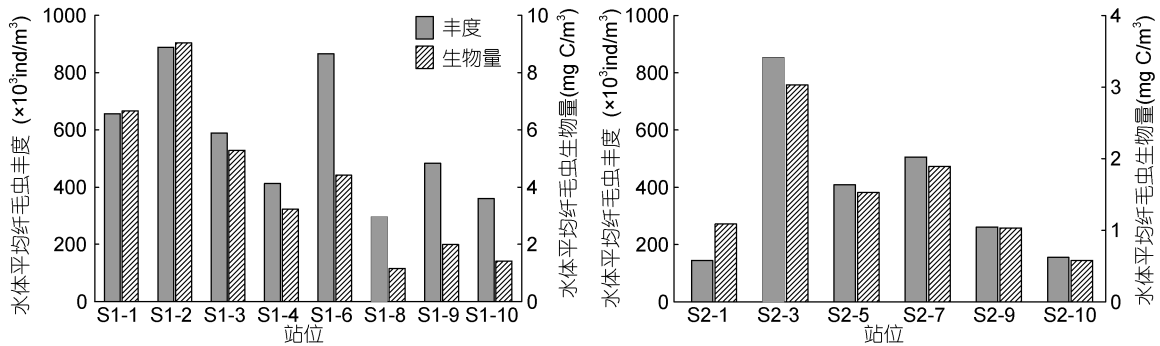


图 4 冬季 S1、S2 断面水体平均纤毛虫丰度和生物量的水平分布

Fig.4 Horizontal distribution of depth-weighted average abundance and biomass of ciliates along Transects S1 and S2 in winter

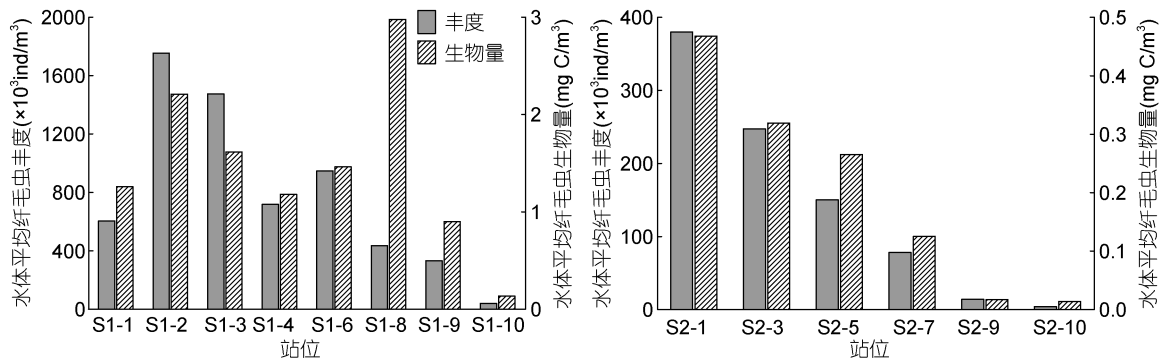


图 5 夏季 S1、S2 断面水体平均纤毛虫丰度和生物量的水平分布

Fig.5 Horizontal distribution of depth-weighted average abundance and biomass of ciliates along Transects S1 and S2 in summer

2.2.2 S1和S2断面比较 冬季, S1断面的水体平均 chl *a* 浓度 $[(0.41\pm 0.37)\text{mg}/\text{m}^3]$ 比 S2断面的 $[(0.37\pm 0.19)\text{mg}/\text{m}^3]$ 略高。S1断面的水体平均纤毛虫丰度 $[(569\pm 223)\times 10^3\text{ind}/\text{m}^3]$ 约为 S2断面 $[(388\pm 268)\times 10^3\text{ind}/\text{m}^3]$ 的 1.5 倍, S1断面的水体平均生物量 $[(4.15\pm 2.76)\text{mg C}/\text{m}^3]$ 约为 S2断面 $[(1.53\pm 0.86)\text{mg C}/\text{m}^3]$ 的 2.7 倍。

夏季, S1断面的水体平均 chl *a* 浓度 $(0.66\pm 1.30\text{mg}/\text{m}^3)$ 约为 S2断面 $[(0.23\pm 0.15)\text{mg}/\text{m}^3]$ 的 2.8 倍。S1断面的水体平均纤毛虫丰度 $[(788\pm 580)\times 10^3\text{ind}/\text{m}^3]$ 约为 S2断面 $[(146\pm 146)\times 10^3\text{ind}/\text{m}^3]$ 的 5.4 倍, S1断面的水体平均生物量 $[(1.47\pm 0.85)\text{mg C}/\text{m}^3]$ 约为 S2断面 $[(0.20\pm 0.18)\text{mg C}/\text{m}^3]$ 的 7.3 倍。

2.3 环境因子、纤毛虫丰度和生物量的垂直分布

冬季, 温度在 S1 和 S2 两个断面的近岸站位出现垂直混合, 远岸站位出现层化。盐度基本在水体上层及近岸较低, 在水体下层及远岸较高。chl *a* 浓度在 S1 断面的 S1-1 站明显较高, 其他站位较低, 且一般在各站的 50m 层出现高值; chl *a* 浓度在 S2 断面各站的差异不大, 一般在各站的 50—75m 层出现高值, 形成狭长的带状分布。在 S1 断面, 纤毛虫丰度一般在各站的 10m 层出现高值, 在 10m 层以下随水深降低; 在 S2 断面, 纤毛虫丰度一般在 10m 层或 25m 层出现高值, 在最大层以下丰度逐渐降低。纤毛虫生物量的垂直分布模式同纤毛虫丰度的基本一致(图 6)。

夏季, 温度在 S1 及 S2 断面各站均出现层化, 随水深逐渐降低。盐度在 S1 及 S2 断面出现层化, 随水深逐渐升高。chl *a* 浓度在 S1 断面的 S1-1 站明显较高, 在其它站位较低, 高值出现在近岸 S1-2、S1-3、S1-4 站的表层及远岸 S1-6、S1-8、S1-9、S1-10 站的 50—75m 层; chl *a* 浓度在 S2 断面各站分布没有明显的差异, 一般在各站的 50—75m 层出现高值, 形成狭长的带状分布。S1 断面纤毛虫丰度的垂直分布没有统一的规律, 高值分别出现在 S1-2、S1-4、S1-8、S1-9 站的表层, S1-3、S1-6 站的 70 m 层及 S1-8、S1-9 站的 150 m 层; 纤毛虫丰度在 S2 断面的 S2-1 站表层出现高值, 在其它各站的 50m 层出现高值。纤毛虫生物量在 S1-8 站的 125m 和 150m 层出现高值, 明显高于其它站位, 分别达到 29.32、22.01 $\mu\text{g C}/\text{L}$, 其中一类体长约 90 μm 的大型无壳纤毛虫占绝对优势, 占纤毛虫生物量的 90% 以上; S2 断面纤毛虫生物量的垂直分布与丰度的类似(图 7)。

2.4 砂壳纤毛虫

冬季砂壳纤毛虫很少检出, 其丰度约占纤毛虫丰度的 1.7%。夏季砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的 22.6%, 共鉴定出砂壳纤毛虫 14 属 22 种, 拟铃虫属(*Tintinnopsis*)种类最多(表 1), 其中较为优势的种类为: 简单薄铃虫(*Leprotintinnus simplex*)、筒状拟铃虫(*Tintinnopsis tubulosoides*)、根状拟铃虫(*Tintinnopsis radix*)、白领细壳虫(*Stenosemella nivalis*)及兆氏类杯虫(*Metacyclis jorgensenii*)。

2.5 纤毛虫丰度、生物量和环境因子的相关性分析

纤毛虫丰度与温度没有明显的相关性, 纤毛虫生物量与温度呈显著的负相关($r = -0.151, P < 0.05$); 纤毛虫丰度与盐度呈显著的负相关($r = -0.150, P < 0.05$), 纤毛虫生物量与盐度没有明显的相关性; 纤毛虫丰度、生物量与 Chl *a* 浓度均没有明显的相关性(表 2)。

3 讨论

本研究中冬季和夏季纤毛虫的平均丰度分别为 $(486\pm 484)\text{ind}/\text{L}$ 和 $(809\pm 1008)\text{ind}/\text{L}$, 与以往的研究结果相当, 如 2007 年夏季南海北部纤毛虫的平均丰度为 796 ind/L (刘华雪等, 2010), 2007 年秋季南海北部纤毛虫的平均丰度为 $(848\pm 776)\text{ind}/\text{L}$ (张翠霞等, 2010), 2009 年冬季南海北部无壳纤毛虫丰度的范围为 20—425 ind/L , 砂壳纤毛虫丰度的范围为 0—162 ind/L (郑丽平等, 2012)。本研究中夏季纤毛虫的丰度较冬季高, 但生物量较冬季低, 这可能是因为夏季纤毛虫的粒级较小, 导致生物量较低。

3.1 纤毛虫丰度和生物量的水平分布

本文冬季和夏季纤毛虫的水平分布模式类似, 纤毛虫丰度和生物量均基本由近岸向远岸降低, 这与南海北部以往的研究结果一致(刘华雪等, 2010; 张翠霞等, 2010; 郑丽平等, 2012)。这种近岸高、远岸低的水平分布特点在其他海区也有报道, 如 Patagonian 南部海区, 砂壳纤毛虫丰度近岸较高, 陆架海区较低(Santoferrara *et al.*, 2011)。本文研究海区位于珠江口附近, 受珠江冲淡水的影响较大, 大量的陆源营养物质随珠江径流被带入珠江口及其邻近海域。此外, 冬季在东北季风的作用下, 高营养盐的沿岸水从东海经台湾海峡进入南海, 在南海北部沿岸形成西南向的沿岸流(Fang *et al.*, 1998); 夏季在西南季风的作用下, 广东沿岸形成上升流区, 底层水涌升, 将营养盐带入真光层中(Gan *et al.*, 2009)。上述这些复杂的物理过程均给南海北部沿岸带来丰富的营养盐, 从而使得沿

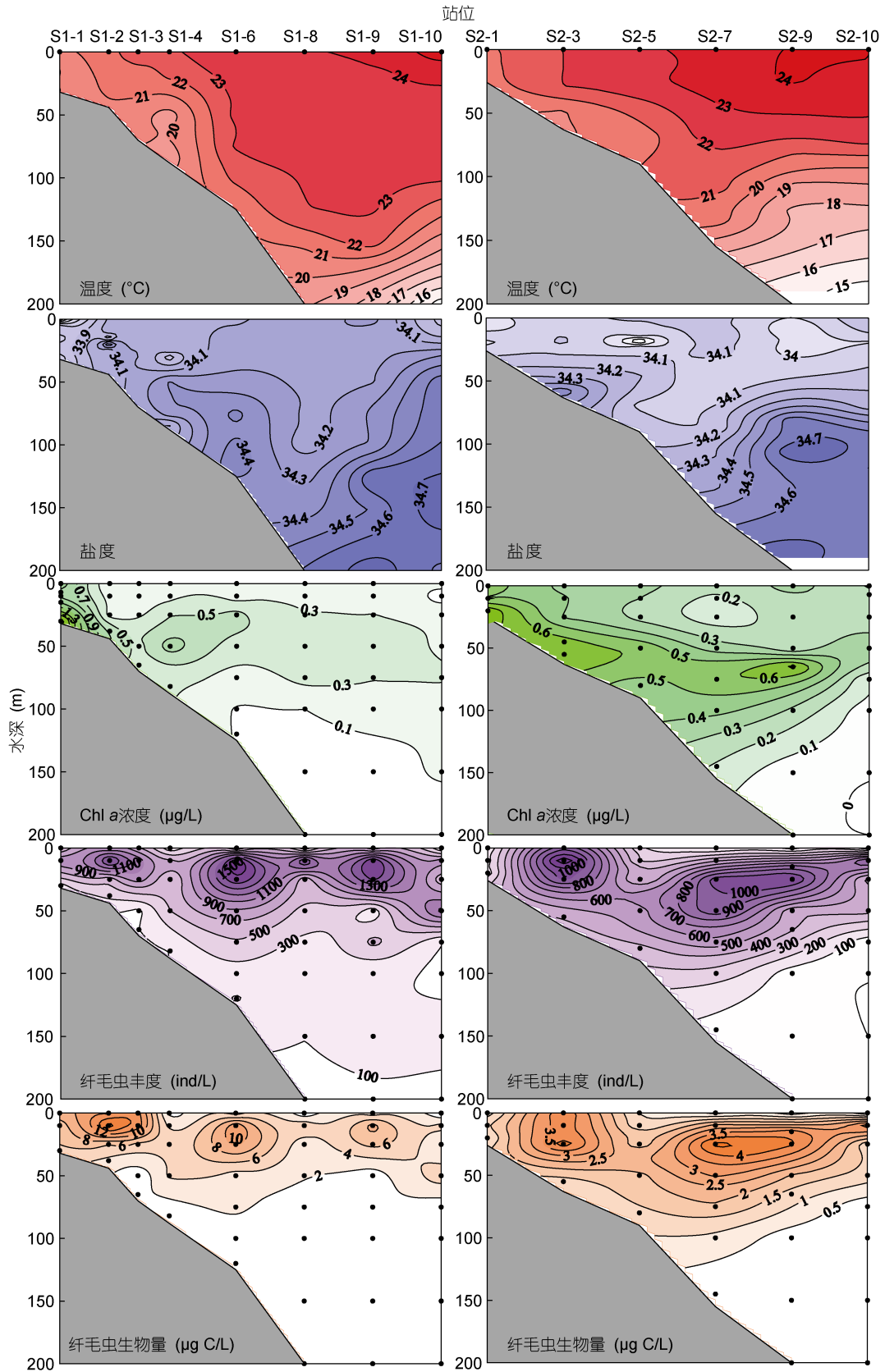


图 6 冬季 S1 及 S2 断面温度、盐度、chl a 浓度、纤毛虫丰度和生物量的垂直分布

Fig.6 Vertical distribution of temperature, salinity, chl a concentration, ciliate abundance and biomass along Transects S1 and S2 in winter

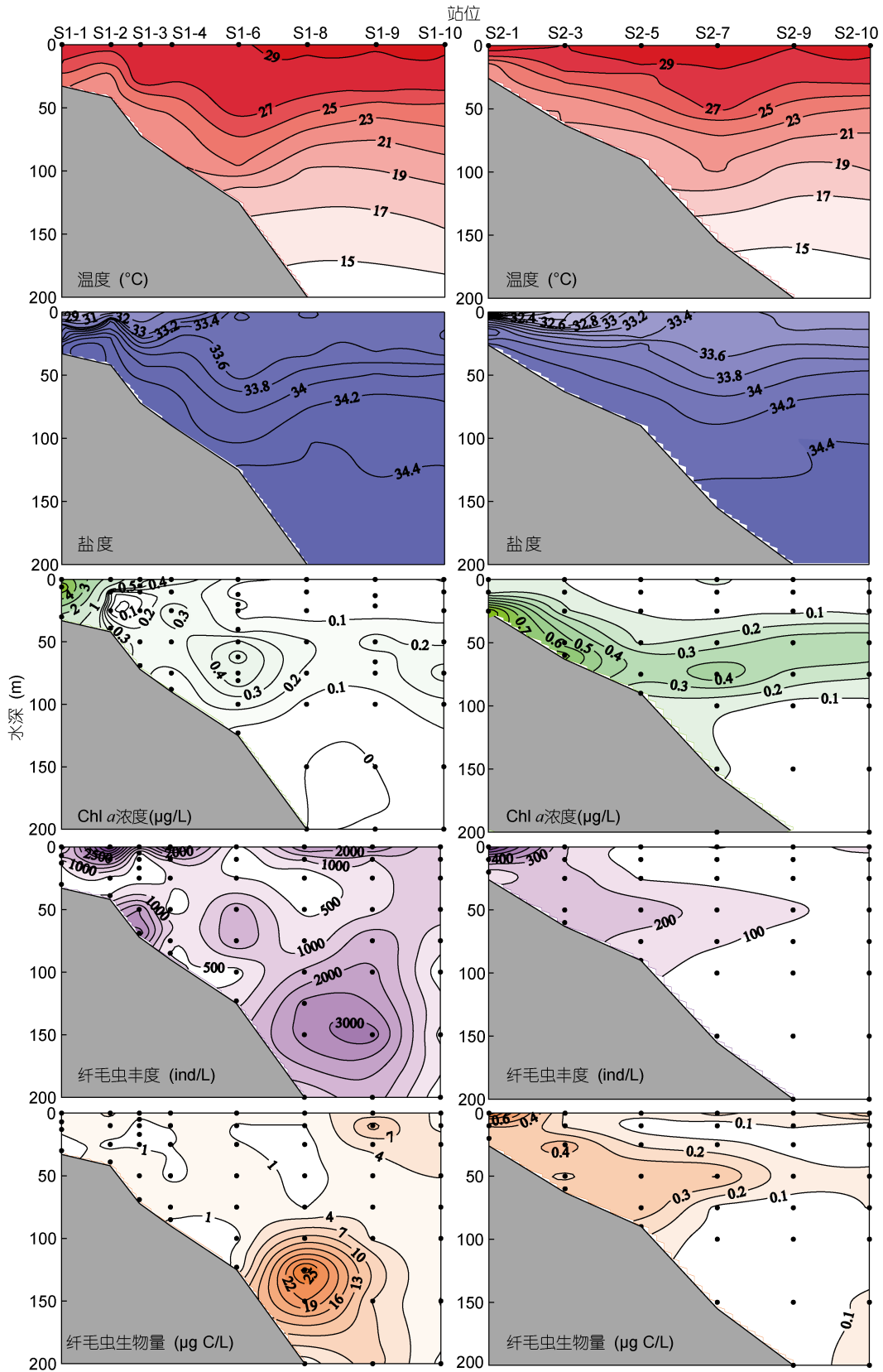


图 7 夏季 S1 及 S2 断面温度、盐度、chl a 浓度、纤毛虫丰度和生物量的垂直分布

Fig.7 Vertical distribution of temperature, salinity, chl a concentration, ciliate abundance and biomass along Transects S1 and S2 in summer

表 1 夏季砂壳纤毛虫种类名录
Tab.1 List of tintinnid species in summer

学名	中文名	学名	中文名
<i>Codonellopsis mobilis</i>	运动类铃虫	<i>Proplectella perpusilla</i>	极小原孔虫
<i>Dadayiella ganymedes</i>	酒杯类管虫	<i>Protorhabdonella curta</i>	缩短原纹虫
<i>Epiplocyloides reticulata</i>	网状拟网膜虫	<i>Stenosemella nivalis</i>	白领细壳虫
<i>Eutintinnus tenuis</i>	薄壳真铃虫	<i>Tintinnidium primitivum</i>	原始筒壳虫
<i>Favella panamensis</i>	巴拿马网纹虫	<i>Tintinnopsis amoyensis</i>	厦门拟铃虫
<i>Leprotintinnus nordqvisti</i>	诺氏薄铃虫	<i>Tintinnopsis brasiliensis</i>	巴西拟铃虫
<i>Leprotintinnus simplex</i>	简单薄铃虫	<i>Tintinnopsis brevicollis</i>	短颈拟铃虫
<i>Metacyclis jorgensenii</i>	兆氏类杯虫	<i>Tintinnopsis chinglanensis</i>	清兰拟铃虫
<i>Metacyclis oviformis</i>	卵形类杯虫	<i>Tintinnopsis radix</i>	根状拟铃虫
<i>Metacyclis sanyahensis</i>	三亚类杯虫	<i>Tintinnopsis tubulosoides</i>	筒状拟铃虫
<i>Parundella aculeata</i>	棘尾拟波膜虫	<i>Xystonellopsis favata</i>	费瓦拟平顶虫

表 2 纤毛虫丰度、生物量和环境因子的相关性分析
Tab.2 Pearson's correlation coefficients between ciliate abundance and biomass and environmental factors

相关性系数	$T(^{\circ}\text{C})$	S	$\text{Chl } a(\mu\text{g/L})$
纤毛虫丰度(ind/L)	0.114	-0.150*	0.091
纤毛虫生物量($\mu\text{g C/L}$)	-0.151*	0.044	0.065

*: 差异显著($P<0.05$); **: 差异极显著($P<0.01$)

岸 chl a 浓度保持较高水平(郝镛等, 2011), 导致纤毛虫可利用的饵料增多(Chen *et al.*, 2009), 从而使纤毛虫丰度和生物量呈现近岸高远岸低的趋势。

本研究中冬季和夏季 S1 断面的纤毛虫平均丰度和生物量均明显高于 S2 断面, 且该趋势在夏季表现得更为突出; 同时, Chl a 浓度也表现出类似的水平分布特征。我们推测, 这可能是由于 S1 断面更靠近珠江口, 受珠江冲淡水的影响较大, 大量的陆源营养物质随珠江径流被带入珠江口及其邻近海域, 刺激浮游植物、细菌等的生长(杨阳等, 2010), 从而为纤毛虫提供丰富的饵料, 支持了 S1 断面较高的丰度和生物量。同时, 夏季珠江径流较大, 这可能导致夏季 S1 和 S2 断面纤毛虫丰度和生物量的差异更为明显。

3.2 纤毛虫丰度和生物量的垂直分布

本文冬季和夏季纤毛虫的垂直分布模式不同, 冬季纤毛虫丰度和生物量的高值一般出现在次表层; 夏季纤毛虫的垂直分布没有统一的规律, 纤毛虫丰度和生物量的高值在表层、中层和近底层都有分布。

冬季纤毛虫的垂直分布特点在其他海区较为常见, 如 Sargasso Sea (Andersen *et al.*, 2011)和 Disko Bay (Levinsen *et al.*, 1999); 但本研究中纤毛虫丰度和生物量的最大值层(10 或 25m 层)与 chl a 最大值层(50m 层)

并不相同, 相关性分析也表明纤毛虫丰度、生物量与 chl a 浓度没有明显的相关性。这种分布不一致的现象在其他研究中也有报道(Tsuda *et al.*, 1989; Suzuki *et al.*, 1998), 当 chl a 最大值层分布较深时, 纤毛虫丰度的最大值层趋向分布在表层和 chl a 最大值层之间。Suzuki 等(1998)认为这可能与无壳纤毛虫(本文冬季无壳纤毛虫占纤毛虫丰度的 98%以上)趋向利用 chl a 最大值层之上的再生生产力有关。

夏季纤毛虫的垂直分布特点在其他海区并不多见, 大多数海区纤毛虫一般趋向分布在水体的中上层, 如 Irminger Sea(Montagnes *et al.*, 2010)及东海(Tsai *et al.*, 2011)。本研究中夏季 S1 断面的远岸站位 S1-8、S1-9 的近底层出现了纤毛虫丰度和生物量的高值区, 这在以往的研究中没有发现过, 我们无法判定这种垂直分布格局的成因。此处 chl a 浓度较低, 在计数样品时, 发现样品中的沉积物较多, 我们猜测该水层可能存在纤毛虫的其他饵料, 如异养的鞭毛虫和甲藻等。所以这个现象还需要深入研究。

3.3 砂壳纤毛虫

本研究中冬季砂壳纤毛虫很少检出, 夏季共鉴定出砂壳纤毛虫 14 属 22 种, 与以往的报道相比, 砂壳纤毛虫种数偏少。张翠霞等(2010)在 2007 年秋季南海北部共鉴定砂壳纤毛虫 16 属 49 种, 刘华雪等(2010)在 2007 年夏季南海北部共鉴定出砂壳纤毛虫 15 属 27 种, 这可能是由于采样时间、站位的不同所致。

本文不同季节砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例差异显著, 冬季较低(1.7%), 夏季较高(22.6%)。这种季节变化在其它海区也有报道, 砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例一般在温度较高的季节, 如

夏季或秋季, 较高。如 Adriatic Sea 的北部, 砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例夏季较冬季高(Revelante *et al*, 1985); 胶州湾砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例在夏季最高(于莹等, 2011)。

致谢 温度和盐度数据由国家海洋局南海分局环境监测中心提供, 中国海监 81 调查船全体船员对海上采样工作提供无私帮助, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 于 莹, 张武昌, 赵 楠等, 2011. 胶州湾浮游纤毛虫丰度和生物量的周年变化. 海洋与湖沼, 42(5): 690—701
- 刘华雪, 谭焯辉, 黄良民等, 2010. 夏季南海北部纤毛虫群落组成及其水平分布. 生态学报, 30(9): 2340—2346
- 杨 阳, 孟 强, 夏华永等, 2010. 2006 年夏季珠江冲淡水扩展及生态响应. 热带海洋学报, 29(6): 15—21
- 张武昌, 丰美萍, 于 莹等, 2012. 砂壳纤毛虫图谱. 北京: 科学出版社, 1—499
- 张翠霞, 张武昌, 肖 天, 2010. 2007 年 10 月南海北部浮游纤毛虫的丰度和生物量. 生态学报, 30(4): 0867—0877
- 郑丽平, 相卫国, 黄邦钦, 2012. 冬季南海北部海域微型浮游动物及其对浮游植物摄食压力研究. 台湾海峡, 31(1): 72—78
- 郝 锵, 宁修仁, 蔡昱明等, 2011. 南海北部初级生产力的物理-生物海洋学耦合特征及其对固碳量的影响. 海洋学研究, (02): 46—57
- 徐奎栋, 洪华生, 宋微波等, 2001. 台湾海峡的砂壳纤毛虫研究(纤毛动物门: 砂壳亚目). 动物分类学报, 26(4): 454—466
- Andersen N G, Nielsen T G, Jakobsen H H *et al*, 2011. Distribution and production of plankton communities in the subtropical convergence zone of the Sargasso Sea. II. Protozooplankton and copepods. Marine Ecology Progress Series, 426: 71—86
- Azam F, Fenchel T, Field J G *et al*, 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. Marine Ecology Progress Series, 10: 257—263
- Chen Y H, Yang Y F, 2009. Characteristics of the microzooplankton community in Jiaozhou Bay, Qingdao, China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 27(3): 435—442
- Fang G, Fang W, Fang Y *et al*, 1998. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation. Acta Oceanographica Taiwanica, 37(1): 1—16
- Gan J, Cheung A, Guo X *et al*, 2009. Intensified upwelling over a widened shelf in the northeastern South China Sea. Journal of Geophysical Research, 114: C09019, doi:10.1029/2007JC004660
- Gan J, Lu Z, Dai M *et al*, 2010. Biological response to intensified upwelling and to a river plume in the northeastern South China Sea: A modeling study. Journal of Geophysical Research, 115: C09001, doi:10.1029/2009JC005569
- Levinsen H, Nielsen T G, Hansen B W, 1999. Plankton community structure and carbon cycling on the western coast of Greenland during the stratified summer situation. II. Heterotrophic dinoflagellates and ciliates. Aquatic Microbial Ecology, 16: 217—232
- Montagnes D J S, Allen J, Brown L *et al*, 2010. Role of ciliates and other microzooplankton in the Irminger Sea (NW Atlantic Ocean). Marine Ecology Progress Series, 411: 101—115
- Nie D S, 1934. Notes on Tintinninea from the Bay of Amoy. Annual Report of the Marine Biology Association of China, 3: 71—80
- Nie D S, Cheng P S, 1947. Tintinninea of the Hainan region. Contributions from the Biological Laboratory of the Science Society of China: Zoological Series, 16(3): 41—86
- Ning X, Chai F, Xue H *et al*, 2004. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea. Journal of Geophysical Research, 109: C10005, doi:10.1029/2004JC002365
- Pierce R W, Turner J T, 1992. Ecology of planktonic ciliates in marine food webs. Reviews in Aquatic Sciences, 6(2): 139—181
- Putt M, Stoecker D K, 1989. An experimentally determined carbon: volume ratio for marine “oligotrichous” ciliates from estuarine and coastal waters. Limnology and Oceanography, 34(6): 1097—1103
- Revelante N, Gilmartin M, Smodlaka N, 1985. The effects of Po River induced eutrophication on the distribution and community structure of ciliated protozoan and micrometazoan populations in the Northern Adriatic Sea. Journal of Plankton Research, 7(4): 461—471
- Santoferrara L F, Gomez M I, Alder V A, 2011. Bathymetric, latitudinal and vertical distribution of protozooplankton in a cold-temperate shelf (southern Patagonian waters) during winter. Journal of Plankton Research, 33(3): 457—468
- Suzuki T, Taniguchi A, 1998. Standing crops and vertical distribution of four groups of marine planktonic ciliates in relation to phytoplankton chlorophyll *a*. Marine Biology, 132(3): 375—382
- Tsai A Y, Gong G C, Chiang K P *et al*, 2011. Long-term (1998—2007) trends on the spatial distribution of heterotrophic ciliates in the East China Sea in summer: effect of the Three Gorges Dam construction. Journal of Oceanography, 67(6): 725—737
- Tsuda A, Furuya K, Nemoto T, 1989. Feeding of micro- and macrozooplankton at the subsurface chlorophyll maximum in the subtropical North Pacific. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 132(1): 41—52
- Utermöhl H, 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton Methodik. Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 9: 1—38

DISTRIBUTION PATTERNS OF PLANKTONIC CILIATES IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA IN WINTER AND SUMMER, 2009

YU Ying^{1,3}, ZHANG Wu-Chang¹, CAI Yu-Ming², FENG Mei-Ping^{1,3}, LI Hai-Bo^{1,3}, XIAO Tian¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract We investigated the abundance and biomass of planktonic ciliates in the northern South China Sea in winter and summer, 2009. The average abundance of ciliates in the winter and summer were (486 ± 484) and (809 ± 1008) ind/L, respectively. The average biomass of ciliates in winter and summer were (2.84 ± 3.26) and (1.96 ± 3.80) $\mu\text{g C/L}$, respectively. The depth-weighted average ciliate abundance and biomass decreased from coastal areas to off-shore areas in both seasons, and were higher along Transects S1 than Transect S2. Ciliates tended to accumulate in the sub-surface layers in winter. Ciliate abundance and biomass were usually higher in the surface or middle layers in summer, although sometimes ciliates were located near the bottom layers in the off-shore stations. Tintinnids were rarely detected in winter, while 22 tintinnid species of 14 genera were identified in summer. Tintinnids occupied 1.7% and 22.6% of the total ciliate abundance in winter and summer, respectively.

Key words planktonic ciliate; abundance; biomass; northern South China Sea