

春季和秋季东海陆架区浮游纤毛虫的丰度和生物量*

于莹^{1,2} 张武昌^{1**} 周锋³ 刘诚刚^{3,4} 丰美萍^{1,2} 李海波^{1,2} 赵苑¹ 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, 山东青岛 266071; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012; ⁴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)

摘要 于2011年春季(5月)和秋季(11月)在东海陆架区进行浮游纤毛虫丰度和生物量的调查。春季和秋季纤毛虫的平均丰度分别为(614±861)和(934±809) ind·L⁻¹, 平均生物量分别为(1.70±3.91)和(0.93±0.99) μg C·L⁻¹。表层纤毛虫丰度和生物量的高值区春季主要分布在近岸及远岸海区, 秋季主要分布在远岸海区。春季纤毛虫的丰度和生物量在水体上层较高; 秋季纤毛虫主要分布在水体上层, 有时在水体底层也会出现丰度和生物量的高值。春季无壳纤毛虫群落的粒级较大, 秋季较小。砂壳纤毛虫占纤毛虫丰度的平均比例春季和秋季分别为(26.9±34.3)%和(44.9±25.2)%。两个季节共鉴定出砂壳纤毛虫27属52种, 春季丰度较大的种为原始筒壳虫、橄榄领细壳虫及筒状拟铃虫, 秋季丰度较大的种为原始筒壳虫、小领细壳虫及矮小拟铃虫。纤毛虫丰度与温度、叶绿素a(Chl a)浓度呈显著正相关。砂壳纤毛虫丰度与盐度呈显著负相关, 群落结构变化与温度显著相关。

关键词 浮游纤毛虫 丰度 生物量 东海

文章编号 1001-9332(2013)08-2310-09 中图分类号 Q958.8 文献标识码 A

Abundance and biomass of planktonic ciliates in the shelf of East China Sea in spring and autumn. YU Ying^{1,2}, ZHANG Wu-chang¹, ZHOU Feng³, LIU Cheng-gang^{3,4}, FENG Mei-ping^{1,2}, LI Hai-bo^{1,2}, ZHAO Yuan¹, XIAO Tian¹ (¹Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; ⁴State Oceanic Administration Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Hangzhou 310012, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(8): 2310-2318.

Abstract: An investigation was made on the abundance and biomass of planktonic ciliates in the shelf of East China Sea in May (spring) and November (autumn), 2011. The abundance of the ciliates in spring and autumn was averagely (614±861) and (934±809) ind·L⁻¹, and the biomass was averagely (1.70±3.91) and (0.93±0.99) μg C·L⁻¹, respectively. The high abundance and biomass in spring were found in coastal and offshore areas, and those in autumn were in offshore only. In the two seasons, the ciliates tended to accumulate in the waters upper layer, and sometimes flocked in the bottom. In the spring, aloricate ciliate species were larger than those in the autumn. Tintinnids occupied (26.9%±34.3)% and (44.9%±25.2)% of the total ciliates abundance in spring and autumn, respectively. In taxonomy, 52 tintinnid species of 27 genera were identified. The most dominant species were *Tintinnidium primitivum*, *Stenosemella oliva*, and *Tintinnopsis tubulosoides* in spring, and *Tintinnidium primitivum*, *Stenosemella parvicollis*, and *Tintinnopsis nana* in autumn. The ciliates abundance showed significant positive correlations with water temperature and Chl a concentration, the tintinnids abundance showed significant negative correlation with water salinity, and the tintinnids community was significantly related to water temperature.

Key words: planktonic ciliate; abundance; biomass; East China Sea.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB409804)和国家自然科学基金项目(41121064, 40876085)资助。

** 通讯作者。E-mail: wuchangzhang@163.com

2012-11-12 收稿, 2013-05-20 接受。

海洋浮游纤毛虫是一类微小(粒径 $5 \sim 200 \mu\text{m}$)的单细胞原生动物,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-级 ($0.2 \sim 2 \mu\text{m}$) 和 nano-级 ($2 \sim 20 \mu\text{m}$) 浮游生物,同时被中型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^[1-2],在海洋生态系统的物质循环和能量流动中起重要作用。

东海是西太平洋的一个陆架海,受长江冲淡水、黑潮、台湾暖流等影响,生态环境趋于复杂化和多样化,成为有重要研究价值的海区之一^[3-4]。关于东海纤毛虫研究的报道不多,Zhang 等^[5]首次报道了东海纤毛虫丰度和生物量的范围;之后,Ota 和 Taniguchi^[6]、Chiang 等^[7]和张翠霞等^[8]报道了东海陆架区不同季节纤毛虫丰度和生物量的水平分布特点不同。本文研究了 2011 年春季和秋季东海浮游纤毛虫丰度和生物量的水平分布和垂直分布,为该海区纤毛虫分布的长期变化及生态系统的研究提供基础数据。

1 材料与方法

于 2011 年春季(5 月 11 日—6 月 7 日)和秋季(11 月 15—27 日)在东海陆架区进行了浮游纤毛虫的调查,春季搭乘“实验 3”号科考船,秋季搭乘“北斗”号科考船。春季航次设 49 个站位,水深范围为 $14 \sim 1588 \text{ m}$;秋季航次设 26 个站位,水深范围为 $15 \sim 64 \text{ m}$ (图 1)。

在各站位以海鸟-911 型直读式 CTD 测得温度和盐度的垂直剖面数据;用 CTD 自带 Rosette 采水器采水。春季航次分 3~13 层采集表层到 1000 m 以浅的水样;秋季航次分 2~6 层采集表层到底层的水样。每层取 500 mL 水样用 GF/F 滤膜过滤,滤膜置于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存,用 90% 丙酮在黑暗中 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 水样装入样品瓶内,用 Lugol 液固定,终浓度 1%。样品分析按照 Utermöhl 的方法^[9]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 或 400 倍镜检计数。砂壳纤毛虫根据文献^[10-12]鉴定到种。计算砂壳纤毛虫、无壳纤毛虫的丰度,纤毛虫丰度为无壳纤毛虫和砂壳纤毛虫的丰度之和。测量纤毛虫的体长、体宽,按最接近的

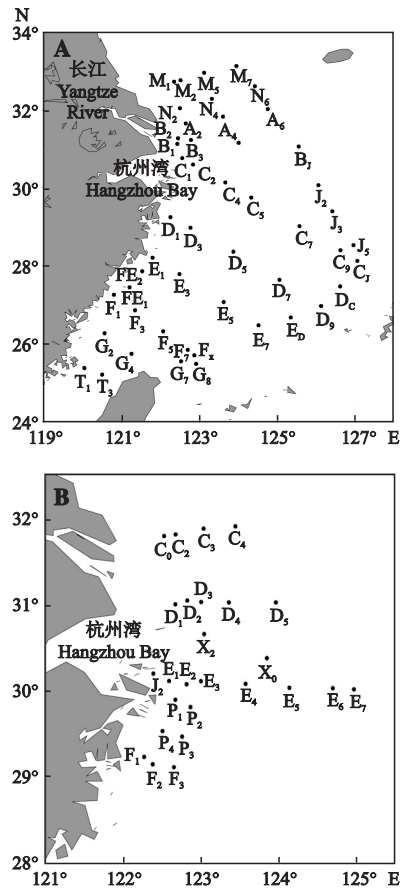


图 1 春季(A)和秋季(B)东海调查站位

Fig. 1 Location of the sampling stations in East China Sea in spring (A) and (B) autumn.

几何形状(如柱体、球体和锥体)计算体积。生物量由体积乘以转换系数($0.19 \text{ pg C} \cdot \mu\text{m}^{-3}$)^[13]得来,砂壳纤毛虫的体积直接按照肉体体积计算。纤毛虫生物量为无壳纤毛虫和砂壳纤毛虫的生物量之和。

按照纤毛虫细胞体积的大小将无壳纤毛虫分成 3 种粒级: $10^3 \sim 10^4 \mu\text{m}^3$ (AC_I)、 $10^4 \sim 10^5 \mu\text{m}^3$ (AC_{II})及 $>10^5 \mu\text{m}^3$ (AC_{III})^[14]。纤毛虫丰度与环境因子采用统计软件 SPSS 16.0 进行 Pearson 相关分析,置信度设为 95%。砂壳纤毛虫群落结构与环境因子的相关性分析采用大型多元统计软件 PRIMER v6.1,采用 BIOENV 模块,显著性检验采用 RELATE 模块。环境因子相似性矩阵的建立采用欧式(Euclidean)距离,生物因子相似性矩阵的建立采用 Bray-Curtis 相似性,数据首先进行对数转换。

2 结果与分析

2.1 表层温度、盐度和 Chl a 浓度

春季,海水表层平均温度为 $(20.27 \pm 3.42) \text{ }^\circ\text{C}$,范围为 $14.69 \sim 26.33 \text{ }^\circ\text{C}$,杭州湾以北海区温度较

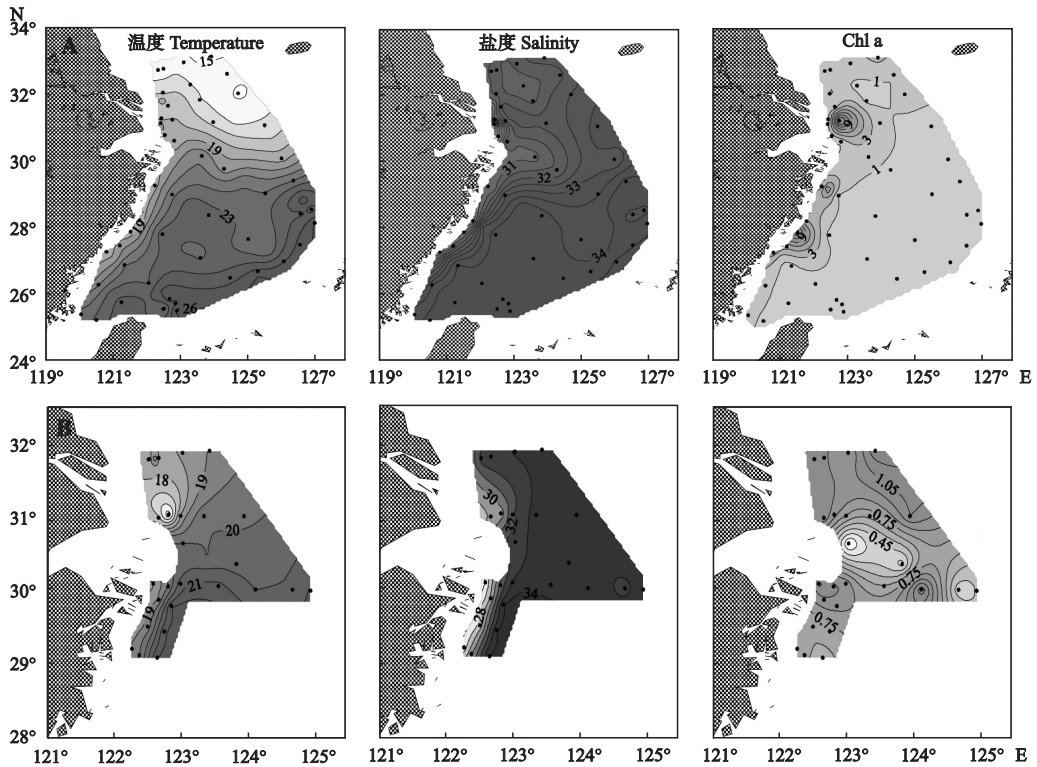


图2 春季(A)和秋季(B)东海表层温度(°C)、盐度和Chl a浓度($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of surface temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity and Chl a concentration ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) in East China Sea in spring (A) and autumn (B).

低,南海区温度较高. 表层平均盐度为(32.44 ± 2.04), 范围为 $24.38 \sim 34.59$, 近长江口及杭州湾海区盐度较低, 远岸盐度较高. 表层平均Chl a浓度为(1.92 ± 3.26) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 范围为 $0.07 \sim 17.15$ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值出现在长江口外侧的 B_3 站, 近岸海区Chl a浓度明显高于远岸海区(图2).

秋季, 海水表层平均温度为(19.48 ± 1.27) $^{\circ}\text{C}$, 范围为 $16.09 \sim 21.45$ $^{\circ}\text{C}$, 长江口附近温度较低, 远岸温度较高. 表层平均盐度为(31.57 ± 2.38), 范围为 $25.04 \sim 33.91$, 自近岸向远岸递增. 表层平均Chl a浓度为(0.77 ± 0.32) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 范围为 $0.13 \sim 1.22$ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 杭州湾南北两侧Chl a浓度较高, 杭州湾外较低(图2).

2.2 纤毛虫的丰度和生物量

2.2.1 变化范围 春季纤毛虫的平均丰度为(614 ± 861) $\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为 5385 $\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 出现在 M_5 站的表层, 一类长约 50 μm 的中型无壳纤毛虫(图3A)贡献最大, 占纤毛虫丰度的一半以上. 秋季纤毛虫的平均丰度为(934 ± 809) $\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为 5757 $\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 出现在 E_6 站的表层, 一类长约 15 μm 的小型无壳纤毛虫(图3B)贡献最大, 占纤毛虫

丰度的一半以上.

春季纤毛虫的平均生物量为(1.70 ± 3.91) $\mu\text{g} \text{C} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为 46.24 $\mu\text{g} \text{C} \cdot \text{L}^{-1}$, 出现在 C_7 站的表层, 一类长约 130 μm 的大型无壳纤毛虫(图3C)贡献最大, 约占纤毛虫生物量的83%. 秋季纤毛虫的平均生物量为(0.93 ± 0.99) $\mu\text{g} \text{C} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为 6.07 $\mu\text{g} \text{C} \cdot \text{L}^{-1}$, 出现在 E_6 站的表层.

2.2.2 表层分布 春季无壳纤毛虫丰度的高值区主要分布在江苏近岸的 M_5 站、浙江近岸的 FE_1 、 G_2 站及远岸的 C_7 站; 砂壳纤毛虫丰度的高值区主要分布在江苏近岸的 M_2 站和浙江近岸的 FE_2 站; 纤毛虫丰度的高值区主要分布在江苏近岸的 M_5 站、浙江

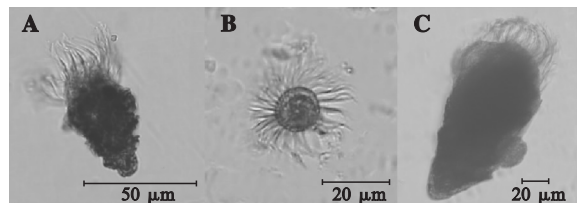


图3 东海无壳纤毛虫照片

Fig. 3 Photos of aloricate ciliates in East China Sea.

A, 中型 Medium aloricate ciliate; B, 小型 Small aloricate ciliate; C, 大型 Large aloricate ciliate.

近岸的 FE₂、G₂ 站及远岸的 C₇ 站. 无壳纤毛虫生物量的高值区主要分布在江苏近岸的 M₅ 站、长江口外侧的 B₃ 站及远岸的 C₇ 站; 砂壳纤毛虫生物量的高值区主要分布在江苏近岸的 M₂ 站、杭州湾外侧的 C₄ 站和浙江近岸的 FE₂ 站; 纤毛虫生物量的高值区与无壳纤毛虫生物量的高值区大体一致(图 4).

秋季无壳纤毛虫丰度的高值区主要分布在远岸的 E₆、E₇ 站; 砂壳纤毛虫丰度的高值区主要分布在浙江近岸的 P₄ 站及远岸的 E₆、E₇ 站; 纤毛虫丰度的高值区与无壳纤毛虫丰度的高值区大体一致. 秋季无壳纤毛虫生物量的高值区主要分布在远岸的 E₅、E₆、E₇ 站; 砂壳纤毛虫生物量的高值区主要分布在远岸的 E₆、E₇ 站; 纤毛虫生物量的高值区与无壳纤毛虫生物量的高值区大体一致(图 5).

2.2.3 断面分布 春季无壳纤毛虫的丰度在 C₄、C₅、C₇ 站的水体上层较高; 砂壳纤毛虫主要分布在近岸 C₁、C₄ 站的水体上层, 在其他站位的丰度较低; 纤毛虫丰度的断面分布模式与无壳纤毛虫的分布模式类似. 春季无壳纤毛虫的生物量在 C₄、C₇ 站的水体上层较高; 砂壳纤毛虫的生物量在近岸 C₁、C₄ 站的水体上层较高; 纤毛虫生物量的断面分布模式与无壳

纤毛虫的分布模式类似(图 6).

秋季无壳纤毛虫的丰度在近岸的 E₂、E₃ 站及远岸的 E₆、E₇ 站的水体上层较高, 另外在 E₃、E₅ 站的底层也有较高的分布. 砂壳纤毛虫主要分布在远岸的 E₅、E₆、E₇ 站, 且其丰度在这 3 个站的上层和底层均有较高的分布. 纤毛虫丰度的断面分布模式与无壳纤毛虫类似. 无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫生物量的断面分布分别与其丰度的断面分布大体一致. 纤毛虫生物量在远岸的 E₅、E₆、E₇ 站的上层较高, 有时在水体底层也有小高值的出现(图 7).

2.2.4 群落结构 春季无壳纤毛虫群落的粒级较大, 秋季较小. 春季 AC_I、AC_{II}、AC_{III} 在无壳纤毛虫丰度中的平均比例分别为 (67.6 ± 30.7)%、(30.2 ± 29.3)% 及 (2.2 ± 9.3)% ; 秋季 AC_I、AC_{II}、AC_{III} 在无壳纤毛虫丰度中的平均比例分别为 (76.7 ± 23.1)%、(22.6 ± 22.3)% 及 (0.8 ± 3.2)% .

春季砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例较低, 秋季较高, 平均比例分别为 (26.9 ± 34.3)%、(44.9 ± 25.2)% .

两个季节共鉴定出砂壳纤毛虫 27 属 52 种. 春季鉴定出砂壳纤毛虫 21 属 33 种, 其中 10 种为中国

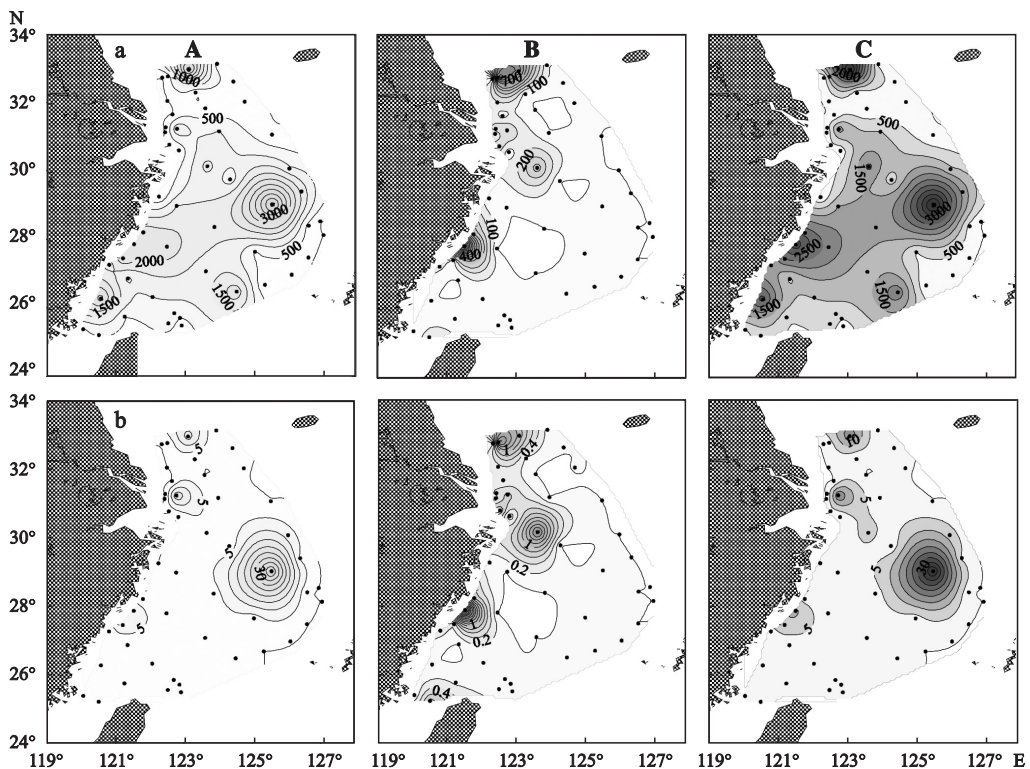


图 4 春季东海表层无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫丰度(ind · L⁻¹, a)、生物量(µg C · L⁻¹, b)的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of surface abundance (ind · L⁻¹, a) and biomass (µg C · L⁻¹, b) of aloricate ciliates, tintinnids and total ciliates in East China Sea in spring.

A: 无壳纤毛虫 Aloricate ciliate; B: 砂壳纤毛虫 Tintinnid; C: 纤毛虫 Total ciliate. 下同 The same below.

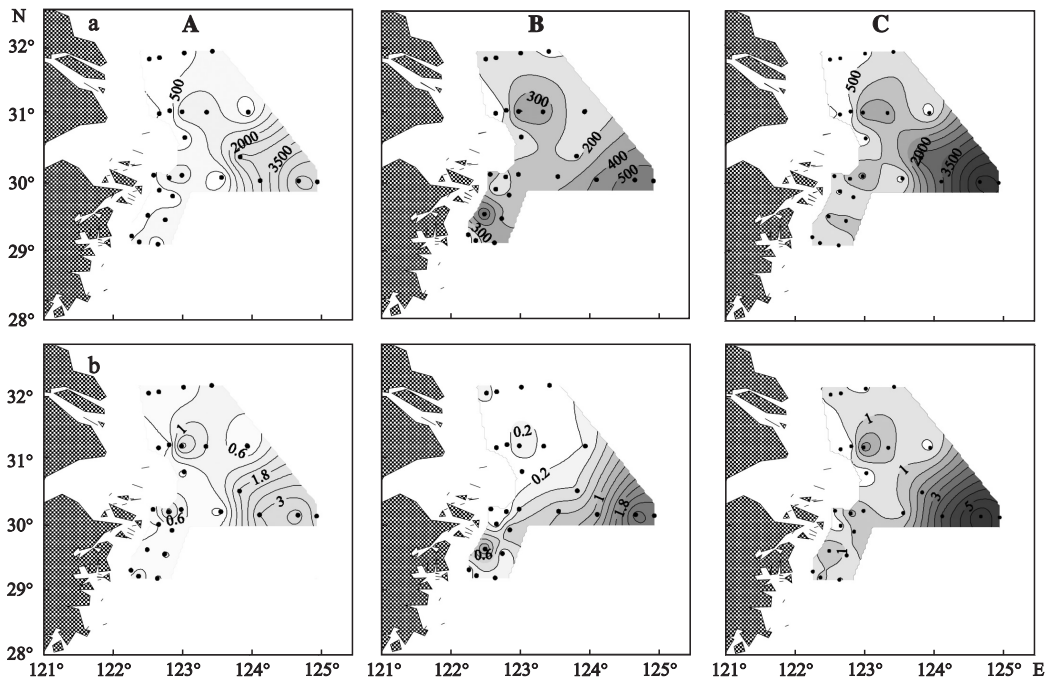


图5 秋季东海表层无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫丰度($\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, a)、生物量($\mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, b)的水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of surface abundance ($\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, a) and biomass ($\mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, b) of aloricate ciliates, tintinnids and total ciliates in East China Sea in autumn.

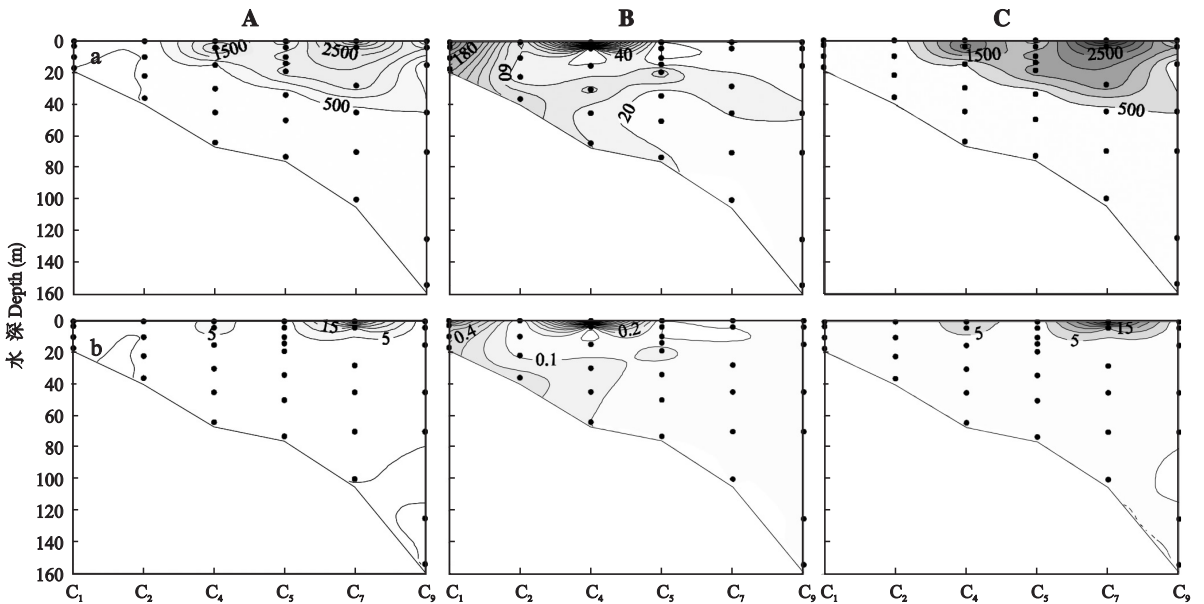


图6 春季C断面无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫丰度($\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, a)、生物量($\mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, b)的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of abundance ($\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, a) and biomass ($\mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, b) of aloricate ciliates, tintinnids and total ciliates along transect C in East China Sea in spring.

海区的新记录种,丰度较大的种类为原始筒壳虫(*Tintinnidium primitivum*)、橄榄领细壳虫(*Stenosemella oliva*)及筒状拟铃虫(*Tintinnopsis tubulosoides*),其丰度分别占砂壳纤毛虫丰度的37.3%、27.3%和16.7%;秋季共鉴定出砂壳纤毛虫18属31种,没有发现新记录种,丰度较大的种类为原始

筒壳虫、小领细壳虫(*Stenosemella parvicollis*)及矮小拟铃虫(*Tintinnopsis nana*)(表1)。

2.3 纤毛虫与温度、盐度、Chl a浓度的相关性分析

无壳纤毛虫丰度及纤毛虫丰度与温度均呈极显著的正相关,砂壳纤毛虫丰度与温度呈显著负相关。无壳纤毛虫丰度及纤毛虫丰度与盐度没有显著的相

关性, 砂壳纤毛虫丰度与盐度呈极显著的负相关. 无壳纤毛虫丰度及纤毛虫丰度与 Chl a 浓度呈极显著

的正相关, 砂壳纤毛虫丰度与 Chl a 浓度呈显著的正相关(表 2).

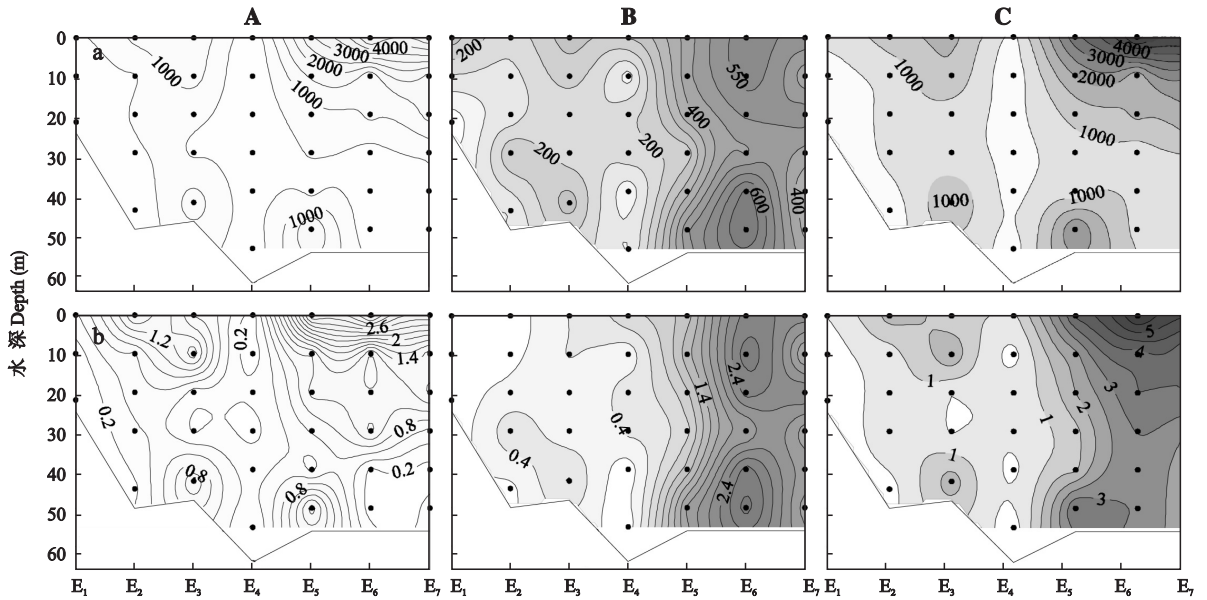


图 7 秋季 E 断面无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫丰度 ($\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, a)、生物量 ($\mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, b) 的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of abundance ($\text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$, a) and biomass ($\mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, b) of aloricate ciliates, tintinnids and total ciliates along transect E in East China Sea in autumn.

表 1 春季和秋季鉴定的砂壳纤毛虫的种类

Table 1 Species list of tintinnids in East China Sea in spring and autumn

中文名 Chinese name	拉丁学名 Latin name	春 Spring	秋 Autumn	中文名 Chinese name	拉丁学名 Latin name	春 Spring	秋 Autumn
双曲棘口虫	<i>Acanthostomella conicoides</i>		+	透明拟波膜虫	<i>Parundella pellucida</i> *	+	
小棘口虫	<i>Acanthostomella minutissima</i>		+	克氏原孔虫	<i>Proplectella claparedei</i>		+
尖底类瓮虫	<i>Amphorellopsis acuta</i>	+	+	极小原孔虫	<i>Proplectella perpusilla</i>	+	
四线瓮状虫	<i>Amphorides quadrilineata</i>		+	简单原纹虫	<i>Protorhabdonella simplex</i>		+
钝囊坎虫	<i>Ascampbelliella retusa</i>	+	+	变形条纹虫	<i>Rhabdonella amor</i>		+
隐藏勃兰虫	<i>Brandtiella palliate</i> *	+		纤弱条纹虫	<i>Rhabdonella exilis</i>	+	
梯状网纹虫	<i>Climacocyclus scalaroides</i>	+		三亚条纹虫	<i>Rhabdonella sanyahensis</i>	+	
鲁西塔尼亚类铃虫	<i>Codonellopsis lusitanica</i> *	+		有爪角口虫	<i>Salpingacantha unguiculata</i> *	+	
运动类铃虫	<i>Codonellopsis mobilis</i>		+	尖锐号角虫	<i>Salpingella acuminata</i>		+
酒瓶类铃虫	<i>Codonellopsis morchella</i>	+	+	小号角虫	<i>Salpingella minutissima</i>		+
奥氏类铃虫	<i>Codonellopsis ostfeldi</i>		+	纤弱细瓮虫	<i>Steenstrupiella gracilis</i>	+	
酒杯类管虫	<i>Dadayiella ganymedes</i>	+	+	白领细壳虫	<i>Stenosemella nivalis</i>	+	+
厚趾类管虫	<i>Dadayiella pachytoecus</i> *	+		橄榄领细壳虫	<i>Stenosemella oliva</i> *	+	
拉鲁网膜虫	<i>Epiplocyclus ralumensis</i>	+		小领细壳虫	<i>Stenosemella parvicollis</i>		+
网状拟网膜虫	<i>Epiplocyloides reticulata</i>	+	+	黏粘筒壳虫	<i>Tintinnidium mucicola</i>	+	+
微小真铃虫	<i>Eutintinnus exigua</i> *	+		原始筒壳虫	<i>Tintinnidium primitivum</i>	+	+
卢氏真铃虫	<i>Eutintinnus lusus-undae</i>	+		百乐拟铃虫	<i>Tintinnopsis beroidea</i>		+
薄壳真铃虫	<i>Eutintinnus tenuis</i>		+	布氏拟铃虫	<i>Tintinnopsis butschlii</i>	+	+
亚速岛网纹虫	<i>Favella azorica</i>	+		具壳拟铃虫	<i>Tintinnopsis cochleata</i>	+	
钟状网纹虫	<i>Favella campanula</i>	+		橡果拟铃虫	<i>Tintinnopsis glans</i> *	+	
长形旋口虫	<i>Helicostomella longa</i>		+	膨胀拟铃虫	<i>Tintinnopsis inflata</i>		+
诺氏薄铃虫	<i>Leptotintinnus nordqvisti</i>		+	矮小拟铃虫	<i>Tintinnopsis nana</i>		+
简单薄铃虫	<i>Leptotintinnus simplex</i>	+	+	根状拟铃虫	<i>Tintinnopsis radix</i>	+	+
卵形类杯虫	<i>Metacyclus oviformis</i>		+	斯氏拟铃虫	<i>Tintinnopsis schotti</i>		+
爱普汀领砂虫	<i>Ormosella apsteini</i> *	+		筒状拟铃虫	<i>Tintinnopsis tubulosoides</i>	+	+
长拟波膜虫	<i>Parundella longa</i>	+		微小平顶虫	<i>Xystonella minuscula</i> *	+	

+出现 Recorded; * 中国海区的新记录种 New record in China seas.

表2 纤毛虫丰度与环境因子的 Pearson 相关系数
Table 2 Pearson's correlation coefficients between ciliate abundance and environmental factors in East China Sea

		温度 Temperature	盐度 Salinity	Chl a 浓度 Chl a concentration
丰度 Abundance	无壳纤毛虫 aloricat ciliate	0.219 **	-0.045	0.212 **
	砂壳纤毛虫 Tintinnid	-0.114 *	-0.158 **	0.138 *
	纤毛虫 Total ciliate	0.159 **	-0.095	0.244 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

BIOENV 分析表明,砂壳纤毛虫群落结构的变化与温度相关性最高 ($r = 0.268$),其次为温度和 Chl a 浓度的组合 ($r = 0.222$).

3 讨论

本文春季和秋季东海纤毛虫丰度和生物量与 1998 年春、秋季^[7]和 2006 年秋季^[8]东海纤毛虫的数据相比偏高;与其他海区相比,均在以往报道的范围之内^[15].

3.1 空间分布

本研究中,春季东海表层纤毛虫丰度和生物量呈斑块状分布,高值区主要分布在近岸海区及远岸的 C₇ 站,这与 1998 年春季东海纤毛虫的水平分布特点不同,1998 年春季纤毛虫丰度从近岸向远岸递增^[7].本文纤毛虫丰度总体在 Chl a 浓度较高的近岸海区较高,这可能是由于纤毛虫与浮游植物之间存在紧密的摄食和被摄食的营养关系,饵料的上行效应在纤毛虫丰度和生物量的分布中起重要作用^[16].但有时纤毛虫丰度的高值区与 Chl a 浓度的高值区并不一致,如 C₇ 站,Chl a 浓度较低但纤毛虫丰度较高,这与大西洋东北部的研究结果类似^[17],这可能是由于纤毛虫只摄食某一粒级范围内的浮游植物,而总的 Chl a 浓度并不总能很好地指示纤毛虫的饵料水平^[18].

本研究中,秋季纤毛虫主要分布在远岸的中陆架海区,这与 1998 年秋季^[7]及 2006 年秋季^[8]东海纤毛虫的水平分布特点一致.本文中陆架海区的纤毛虫主要是体长约为 15 μm 的小型无壳纤毛虫,根据寡毛类纤毛虫最佳的饵料粒级相当于自身体长的 15% (范围为 5% ~ 30%)^[19]来估算,pico-级浮游生物如聚球藻等可能是其重要的饵料.秋季聚球藻丰度在中陆架海区较高,相关性分析表明纤毛虫丰度与聚球藻丰度存在显著的正相关(未发表数据),这

表明它们之间可能存在密切的摄食与被摄食的关系^[7],是纤毛虫丰度在远岸出现高值的主要原因之一.

本研究中,虽然秋季纤毛虫丰度和生物量的高值有时出现在水体底层,但是纤毛虫主要分布在水体上层.这与大部分海区纤毛虫的垂直分布特点一致,如日本内海^[20]及 Kaštela 湾^[21],纤毛虫主要分布在水体表层.此种垂直分布格局的形成可能是纤毛虫主动的垂直运动行为及环境因子的影响两方面综合作用的结果. Jonsson^[22]认为,浮游纤毛虫具有一定的负向趋地性及运动趋向上层,使得纤毛虫倾向于分布在表层或密度跃层附近.此外,温度、盐度^[23]、饵料^[24]及中型浮游动物的摄食^[25]也可能是影响纤毛虫垂直分布的重要因素.

3.2 无壳纤毛虫的粒级结构

本研究中,春季和秋季无壳纤毛虫群落均以小型无壳纤毛虫为主,且春季纤毛虫群落的粒级组成较大,这与其他海区的研究结果类似.一般在温带海区,如缅甸湾^[14]、波罗的海^[26]及 Kaštela 湾^[27]等,纤毛虫群落的粒级均在春季较大,而夏季或秋季较小. Johansson 等^[26]认为,其原因可能与饵料的粒级组成及中型浮游动物选择性摄食大型纤毛虫有关.本文没有分粒级 Chl a 和浮游动物生物量的背景资料,故无法用数据来验证,只能用历史资料来推测.与 2000 年秋季相比,2001 年春季东海 nano-级和 pico-级浮游植物对浮游植物总生物量的贡献率较低^[28].东海 4 个季节的研究表明,春季的浮游动物生物量低于秋季^[29],这说明春季纤毛虫的饵料粒级较秋季大,浮游动物对大型纤毛虫的摄食压力较秋季小,这可能是纤毛虫群落的粒级春季较大、秋季较小的重要原因.

3.3 砂壳纤毛虫丰度的比例

本文春季和秋季砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例分别为 26.9% 和 44.9%,与其他海区相比略高.如在开阔的太平洋,砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的 9% ~ 17%^[30];东海秋冬季节砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例分别为 39% 和 12%^[8].本文秋季砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例较高,这与其他海区的研究结果类似.一般情况下,砂壳纤毛虫在夏季或秋季占优势^[31],如 Kaštela 湾,秋季砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例较高,达到 65%^[21];在法国近岸海区,砂壳纤毛虫丰度比例在夏秋最高,可达 70%^[32].相比无壳寡毛类纤毛虫,砂壳纤毛虫更偏向摄食 nano-级浮游植物^[33],东海 nano-级浮游

植物对浮游植物总生物量的贡献在秋季明显高于春季^[28], 这可能是东海砂壳纤毛虫丰度占纤毛虫丰度的比例在秋季较高的原因之一。

3.4 纤毛虫分布与环境因子的关系

本研究中, 纤毛虫丰度与温度呈极显著的正相关, 同时砂壳纤毛虫群落结构的变化与温度显著相关, 这与 Damariscotta 河口^[34]及胶州湾^[35]的研究结果类似。温度不但能够影响纤毛虫的内禀生长率^[36], 同时温度升高可能改变纤毛虫的群落组成^[37], 是影响纤毛虫分布和群落结构的重要因素。

本研究中, 砂壳纤毛虫丰度与盐度呈极显著的负相关, 这与 Naples 湾^[38]的研究结果一致。这可能表明, 盐度对砂壳纤毛虫的分布有重要的影响, 也可能是盐度随其他环境因子变化的间接反映。本文春季和秋季砂壳纤毛虫丰度总体在近岸较高, 而近岸受长江冲淡水的影响较大, Chl a 浓度较高, 与盐度的变化趋势相反。砂壳纤毛虫丰度一般在 Chl a 浓度较高的海区较高^[39], 这可能间接导致砂壳纤毛虫丰度与盐度出现负相关。

参考文献

- [1] Pierce RW, Turner JT. Ecology of planktonic ciliates in marine food webs. *Reviews in Aquatic Sciences*, 1992, **6**: 139–181
- [2] Azam F, Fenchel T, Field JG, *et al.* The ecological role of water column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, **10**: 257–263
- [3] Wang D (王 丹), Sun J (孙 军), An B-Z (安佰正), *et al.* Phytoplankton assemblages on the continental shelf of East China Sea in autumn 2006. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2008, **19** (11): 2435–2442 (in Chinese)
- [4] Zhou W-H (周伟华), Huo W-Y (霍文毅), Yuan X-C (袁翔城), *et al.* Distribution features of chlorophyll a and primary productivity in high frequency area of red tide in East China Sea during Spring. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2003, **14** (7): 1055–1059 (in Chinese)
- [5] Zhang WC, Xiao T, Wang R. Abundance and biomass of copepod nauplii and ciliates and herbivorous activity of microzooplankton in the East China Sea. *Plankton Biology and Ecology*, 2001, **48**: 28–34
- [6] Ota T, Taniguchi A. Standing crop of planktonic ciliates in the East China Sea and their potential grazing impact and contribution to nutrient regeneration. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, **50**: 423–442
- [7] Chiang KP, Lin CY, Lee CH, *et al.* The coupling of oligotrich ciliate populations and hydrography in the East China Sea: Spatial and temporal variations. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*,

- 2003, **50**: 1279–1293
- [8] Zhang C-X (张翠霞), Zhang W-C (张武昌), Zhao N (赵 楠), *et al.* Distribution of planktonic ciliates in autumn and winter in the shelf areas of the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica (海洋学报)*, 2011, **33** (1): 127–137 (in Chinese)
- [9] Utermöhl H. On the perfecting of the quantitative phytoplankton methodology. *Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 1958, **9**: 1–38
- [10] Zhang W-C (张武昌), Feng M-P (丰美萍), Yu Y (于 莹), *et al.* An Illustrated Guide to Contemporary Tintinnids in the World. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese)
- [11] Nie DS. Tintinninea of the Hainan region. *Contributions from the Biological Laboratory of the Science Society of China: Zoological Series*, 1947, **16**: 41–86
- [12] Kofoid CA, Campbell AS. A conspectus of the marine fresh-water ciliate belonging to the suborder Tintinninea, with descriptions of new species principally from the Agassiz expedition to the eastern tropical Pacific 1904–1905. *University of California Publications in Zoology*, 1929, **34**: 1–403
- [13] Putt M, Stoecker DK. An experimentally determined carbon: Volume ratio for marine ‘oligotrichous’ ciliates from estuarine and coastal waters. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**: 1097–1103
- [14] Montagnes DJS, Lynn DH, Roff JC, *et al.* The annual cycle of heterotrophic planktonic ciliates in the waters surrounding the Isles of Shoals, Gulf of Maine: An assessment of their trophic role. *Marine Biology*, 1988, **99**: 21–30
- [15] Zhang W-C (张武昌), Xiao T (肖 天), Wang R (王 荣). The abundance and biomass of microzooplankton in marine ecosystem. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2001, **21** (11): 1893–1908 (in Chinese)
- [16] Montagnes DJS, Allen J, Brown L, *et al.* Role of ciliates and other microzooplankton in the Irminger Sea (NW Atlantic Ocean). *Marine Ecology Progress Series*, 2010, **411**: 101–115
- [17] Quevedo M, Viesca L, Anadón R, *et al.* The protistan microzooplankton community in the oligotrophic north-eastern Atlantic: Large- and mesoscale patterns. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**: 551–563
- [18] Dolan JR, Coats DW. Seasonal abundance of planktonic ciliates and microflagellates in mesohaline Chesapeake Bay waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, **31**: 558–565
- [19] Jonsson PR. Particle size selection, feeding rates and growth dynamics of marine planktonic oligotrichous ciliates (Ciliophora: Oligotrichina). *Marine Ecology Progress Series*, 1986, **33**: 265–277
- [20] Uye S, Nagano N, Tamaki H. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan. *Journal of Oceanography*, 1996, **52**: 689–703
- [21] Bojanić N, Šolić M, Krstulović N, *et al.* Seasonal and

- vertical distribution of the ciliated protozoa and micro-metazoa in Kaštela Bay (central Adriatic). *Helgoland Marine Research*, 2001, **55**: 150–159
- [22] Jonsson PR. Vertical distribution of planktonic ciliates: An experimental analysis of swimming behaviour. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, **52**: 39–53
- [23] Taniguchi A. Microzooplankton biomass in the Arctic and Subarctic Pacific Ocean in summer. Proceeding of the Sixth Symposium on Polar Biology, Tokyo, 1984: 63–80
- [24] Leakey RJG, Burkill PH, Sleigh MA. Planktonic ciliates in the northwestern Indian Ocean: Their abundance and biomass in waters of contrasting productivity. *Journal of Plankton Research*, 1996, **18**: 1063–1071
- [25] Levinsen H, Nielsen TG, Hansen BW. 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*, 1999, **16**: 217–232
- [26] Johansson M, Gorokhova E, Larsson U. Annual variability in ciliate community structure, potential prey and predators in the open northern Baltic Sea proper. *Journal of Plankton Research*, 2004, **26**: 67–80
- [27] Bojanic N, Šolic M, Krstulovic N, *et al.* Temporal variability in abundance and biomass of ciliates and copepods in the eutrophicated part of Kaštela Bay (Middle Adriatic Sea). *Helgoland Marine Research*, 2005, **59**: 107–120
- [28] Huang B-Q (黄邦钦), Liu Y (刘媛), Chen J-X (陈纪新), *et al.* Temporal and spatial distribution of size-fractionized phytoplankton biomass in East China Sea and Huanghai Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2006, **28**(2): 156–164 (in Chinese)
- [29] Xu Z-L (徐兆礼), Chao M (晁敏), Chen Y-Q (陈亚瞿). Distribution characteristics of zooplankton biomass in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2004, **26**(3): 93–101 (in Chinese)
- [30] Gómez F. Trends on the distribution of ciliates in the open Pacific Ocean. *Acta Oecologica*, 2007, **32**: 188–202
- [31] Leakey RJG, Fenton N, Clarke A. The annual cycle of planktonic ciliates in nearshore waters at Signy Island, Antarctica. *Journal of Plankton Research*, 1994, **16**: 841–856
- [32] Dupuy C, Ryckaert M, Le Gall S, *et al.* Seasonal variations in planktonic community structure and production in an atlantic coastal pond: The importance of nanoflagellates. *Microbial Ecology*, 2007, **53**: 537–548
- [33] Rassoulzadegan F, Laval-Peuto M, Sheldon RW. Partitioning of the food ration of marine ciliates between pico- and nanoplankton. *Hydrobiologia*, 1988, **159**: 75–88
- [34] Sanders RW. Tintinnids and other microzooplankton-seasonal distributions and relationships to resources and hydrography in a Maine estuary. *Journal of Plankton Research*, 1987, **9**: 65–77
- [35] Jiang Y, Xu HL, Al-Rasheid KAS, *et al.* Planktonic ciliate communities in a semi-enclosed bay of Yellow Sea, northern China: Annual cycle. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2011, **91**: 97–105
- [36] Fenchel T, Finlay B. Respiration rates in heterotrophic, free-living protozoa. *Microbial Ecology*, 1983, **9**: 99–122
- [37] Aberle N, Lengfellner K, Sommer U. Spring bloom succession, grazing impact and herbivore selectivity of ciliate communities in response to winter warming. *Oecologia*, 2007, **150**: 668–681
- [38] Modigh M. Seasonal variations of photosynthetic ciliates at a Mediterranean coastal site. *Aquatic Microbial Ecology*, 2001, **23**: 163–175
- [39] Revelante N, Gilmartin M, Smoldaka N. The effects of Po River induced eutrophication on the distribution and community structure of ciliated protozoan and micro-metazoan populations in the Northern Adriatic Sea. *Journal of Plankton Research*, 1985, **7**: 461–471

作者简介 于莹,女,1986年生,博士研究生.主要从事海洋浮游动物生态学研究. E-mail: yuyingxl001@163.com

责任编辑 肖红
