

莱州湾大型砂壳纤毛虫群落季节变化

陈 雪^{1,3} 张武昌^{1*} 吴 强² 栾青杉² 肖 天¹

1 (中国科学院海洋研究所海洋生态与环境重点实验室, 山东青岛 266071)

2 (中国水产科学院黄海水产研究所海洋可捕资源评估与生态系统实验室, 山东青岛 266071)

3 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为揭示莱州湾砂壳纤毛虫群落季节变化规律, 在莱州湾设置8个站位, 于2011年5–11月及2012年3–4月进行了9个航次的调查, 用浅海III型浮游生物网由底至表垂直拖网采集砂壳纤毛虫。结果表明, 莱州湾3–11月砂壳纤毛虫物种丰富度的变化范围为5–19, 周年变化呈现一峰两谷的趋势。丰度的范围为0–318 ind./L, 丰度较大(> 50 ind./L)的种类有运动类铃虫(*Codonellopsis mobilis*)和清兰拟铃虫(*Tintinnopsis chinglanensis*)。各月平均丰度随时间的变化趋势为双峰型, 最大值出现在7月(63 ind./L), 次峰值出现在5月(48 ind./L), 最小值出现在3月(2 ind./L)。黏着壳种类在3–11月均有出现, 透明壳种类仅在温度较高(> 15°C)的6–9月出现。各月的优势种数目为1种(5月)到8种(8月), 其中运动类铃虫在所有月中都是优势种, 对砂壳纤毛虫丰度周年的变化规律产生较大影响。使用各月所有种类的平均丰度对各月砂壳纤毛虫群落进行聚类分析, 得到两个群落(相似度30%): 群落I(7–9月)和群落II(3–6月、10–11月), 说明砂壳纤毛虫群落发生了明显的季节变化。砂壳纤毛虫的物种丰富度、丰度与环境因子(温度、盐度)均没有明显的相关性。

关键词: 砂壳纤毛虫, 群落, 周年变化, 莱州湾

Seasonal change of the community of large-sized tintinnids (Ciliophora, Tintinnida) in Laizhou Bay

Xue Chen^{1,3}, Wuchang Zhang^{1*}, Qiang Wu², Qingshan Luan², Tian Xiao¹

1 Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071

2 Laboratory of Stock Assessment and Ecosystem, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, Shandong 266071

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The abundance and seasonal change of large-sized tintinnids were studied in Laizhou Bay. Large-sized tintinnids were collected by vertical towing using a shallow sea type III plankton net (open area 0.1 m², mesh size 76 µm) during 9 cruises between May and November of 2011 and from March to April, 2012. The samples were fixed in formalin solution to a final concentration of 5% and counted using an inverted microscope in the laboratory. We sampled 8 stations to avoid fluctuations over a short time period. The purpose of this study was to characterize seasonal change of the large-sized tintinnid community. Maximum tintinnid species richness was 19 in August and minimum was 5 in May. Tintinnid abundance ranged from 0 ind./L to 318 ind./L. Average abundance at all stations was highest (63 ind./L) in July and lowest (2 ind./L) in March, and there was a secondary peak of 48 ind./L in May. The abundance of *Codonellopsis mobilis* and *Tintinnopsis chinglanensis* were more than 50 ind./L. Agglutinated species occurred from March to November, while the hyaline species only occurred from June to September when the temperature was > 15°C. *Codonellopsis mobilis* occurred from March to November. The number of dominant species ranged from 1 in May, to 8 in August. *Codonellopsis mobilis* was a dominant species during all time periods and this one species significantly influenced the pattern of total ciliate abundance. Using the average abundance data of 8 sta-

收稿日期: 2013-12-11; 接受日期: 2014-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB409804)和国家自然科学基金(U1406403)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wuchangzhang@163.com

tions, two distinct cluster groups were observed (30% similarity): cluster I (July to September) and cluster II (March to June, October to November). The cluster results showed that there was a seasonal change of the large-sized tintinnid community. Average abundance and species richness were not significantly correlated with temperature and salinity.

Key words: Tintinnid, community, seasonal change, Laizhou Bay

海洋砂壳纤毛虫是海洋中营浮游生活的一类单细胞原生动物, 粒径为10–200 μm , 是海洋微食物环的重要组成部分(Azam *et al.*, 1983), 它连接微食物环和经典食物链, 是微微型(pico-级)和微型(nano-级)生产者的初级消费者, 也是中型(meso-级)浮游动物和幼鱼的食物来源(Laval-Peuto *et al.*, 1986; Pierce & Turner, 1994)。砂壳纤毛虫是浮游原生动物中研究较多的类群, 可以作为海洋生态学研究中的模式种类(Pierce, 1992; Dolan & Gallegos, 2001; Dolan *et al.*, 2013)。

浮游生物群落季节性变化是浮游生态学中的一个重要内容。世界范围内, 已在一些海区进行了砂壳纤毛虫群落季节变化的研究(Dolan *et al.*, 2013), 但这些研究都是在一个站位采样, 没有发现砂壳纤毛虫明显的季节变化。在我国海区进行的砂壳纤毛虫群落季节变化的研究仅限于胶州湾, 其他海区几乎没有资料。

莱州湾位于渤海南部, 三面环陆, 属于半封闭性海区, 周年的温度变化较大。目前在莱州湾进行的纤毛虫研究仅限于丰度和生物量的分布(张武昌和王荣, 2000)。由于砂壳纤毛虫在短时间和局部海区的明显波动非常常见, 所形成的砂壳纤毛虫斑块会影响对砂壳纤毛虫群落季节性变化的研究(Pierce, 1992)。本文在莱州湾设置8个站位进行采样调查, 可以消除砂壳纤毛虫群落在短时间和局部海区的波动所产生的影响, 以期发现莱州湾砂壳纤毛虫群落的变化规律。

1 材料与方法

8个站位水深3–26 m, 设置见图1。于2011年5–11月及2012年3–4月搭乘“鲁昌渔4193号”船每月调查1次, 共调查了9次。采用浅海III型浮游生物网(网口面积0.1 m^2 , 网孔直径76 μm)由底至表垂直拖网采集砂壳纤毛虫, 样品用5%的甲醛(终浓度)固定, 保存。同时采用美国YSI ProPlus水质分析仪测定各站位的温度和盐度。

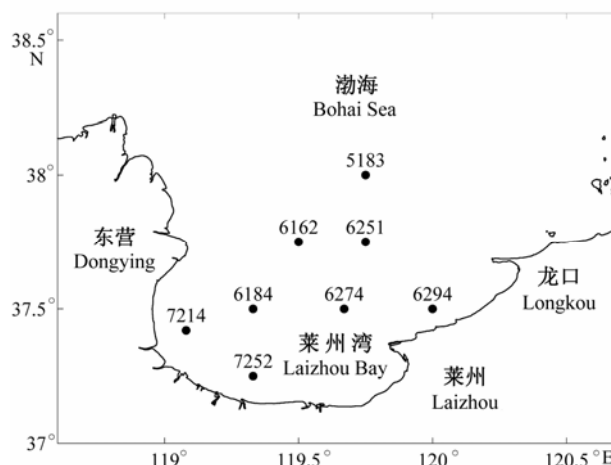


图1 莱州湾调查站位图

Fig. 1 Locations of the sampling stations in Laizhou Bay

在实验室中将样品浓缩至80 mL(V_w)左右, 用定量移液枪从混合均匀的样品中取出1 mL(V_s), 装入浮游生物计数框中, 用Nikon解剖镜计数砂壳纤毛虫的个数(C), 取出部分壳体于Olympus BX51显微镜下测量尺寸并拍照。依据壳的形状和尺寸, 参照分类学文献(Kofoed & Campbell, 1929, 1939; 张武昌等, 2012)进行种类鉴定。

砂壳纤毛虫的丰度(A , ind./L)通过下列公式计算:

$$A = (C \cdot V_w / V_s) / (d \cdot S \cdot 1000) \quad (1)$$

式中 d 为水深, S 为网口面积。

采用 $Y = n_i \cdot f_i / N$ 计算各种的优势度, 式中 n_i 为第 i 种出现的个体数; N 为出现的总个体数; f_i 为第 i 种在各个站位出现的频率。当 $Y > 0.02$ 时, 该种为优势种(徐兆礼和陈亚瞿, 1989)。分别采用Shannon多样性指数(H' , Shannon & Weaver, 1949)和Pielou均匀度指数(J , Pielou, 1966)计算砂壳纤毛虫群落的多样性和均匀度。聚类分析主要采用PRIMER 5.0软件运算, 先在PRIMER软件上对砂壳纤毛虫平均丰度作平方根转换和标准化等处理, 而后计算样品间的

Bray-Curtis相似性距离并建立相似性矩阵。

2 结果

2.1 环境因子

2011年5–11月和2012年3–4月各站表层平均温度整体呈现先上升后下降的趋势, 从3月的3.9℃上升到8月的25.8℃, 随后下降至11月的10.8℃(附图1)。3–11月各站表层平均盐度变化趋势与温度相似, 也是先上升后下降, 3月最低(29.64), 6月最高(32.56)(附图1)。

2.2 砂壳纤毛虫群落物种丰富度

9个航次中共发现砂壳纤毛虫7属26种(表1), 其中黏着壳4属23种, 分别为拟铃虫属(*Tintinnopsis*)18

种、薄铃虫属(*Leprotintinnus*)2种、类铃虫属(*Codonellopsis*)2种、领细壳虫属(*Stenosemella*)1种; 透明壳3属3种, 分别为类瓮虫属(*Amphorellopsis*)1种、真铃虫属(*Eutintinnus*)1种、网纹虫属(*Favella*)1种。有3种仅鉴定到属(*Tintinnopsis* sp.1, *Tintinnopsis* sp.2, *Tintinnopsis* sp.3)。

各月砂壳纤毛虫群落物种丰富度变化范围为5–19, 5月最少, 8月最多, 整体变化趋势为先增加后减少(图2a)。3月至5月砂壳纤毛虫群落物种丰富度稍有下降, 之后显著增加。

砂壳纤毛虫群落物种丰富度与表层平均温度

表1 莱州湾3–11月记录的砂壳纤毛虫种类
Table 1 Species list of tintinnids in Laizhou Bay from March to November

中文种名 Chinese name	拉丁文种名 Latin name	A _{max}	M _{max}
透明壳种类 Hyaline species			
尖底类瓮虫	<i>Amphorellopsis acuta</i>	2.81	8
卢氏真铃虫	<i>Eutintinnus lusus-undae</i>	2.53	7
巴拿马网纹虫	<i>Favella panamensis</i>	4.21	6
黏着壳种类 Agglutinated species			
鲁西塔尼亚类铃虫	<i>Codonellopsis lusitanica</i>	1.04	8
运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	316.72	5
诺氏薄铃虫	<i>Leprotintinnus nordqvisti</i>	0.42	7
简单薄铃虫	<i>L. simplex</i>	7.67	7
白领细壳虫	<i>Stenosemella nivalis</i>	16.93	7
巴西拟铃虫	<i>Tintinnopsis brasiliensis</i>	1.04	3
布氏拟铃虫	<i>T. butschlii</i>	1.18	7
清兰拟铃虫	<i>T. chinglanensis</i>	65.85	7
有角拟铃虫	<i>T. corniger</i>	3.87	7
指状拟铃虫	<i>T. digita</i>	9.44	8
直颈拟铃虫	<i>T. directa</i>	0.53	7
半旋拟铃虫	<i>T. hemispiralis</i>	3.85	11
日本拟铃虫	<i>T. japonica</i>	14.21	4
卡拉直克拟铃虫	<i>T. karajacensis</i>	0.20	3
罗氏拟铃虫	<i>T. lohmanni</i>	6.15	7
梅氏拟铃虫	<i>T. mayeri</i>	0.11	4
根状拟铃虫	<i>T. radix</i>	29.14	7
圆锥拟铃虫	<i>T. rapa</i>	0.59	3
斯氏拟铃虫	<i>T. schotti</i>	12.43	9
妥肯丁拟铃虫	<i>T. tocantinensis</i>	13.38	8
未定种1	<i>Tintinnopsis</i> sp.1	4.84	5
未定种2	<i>Tintinnopsis</i> sp.2	0.39	6
未定种3	<i>Tintinnopsis</i> sp.3	0.80	8

A_{max}: 最大丰度 Maximum of abundance (ind./L); M_{max}: 最大丰度出现的月 Month with the maximum of abundance

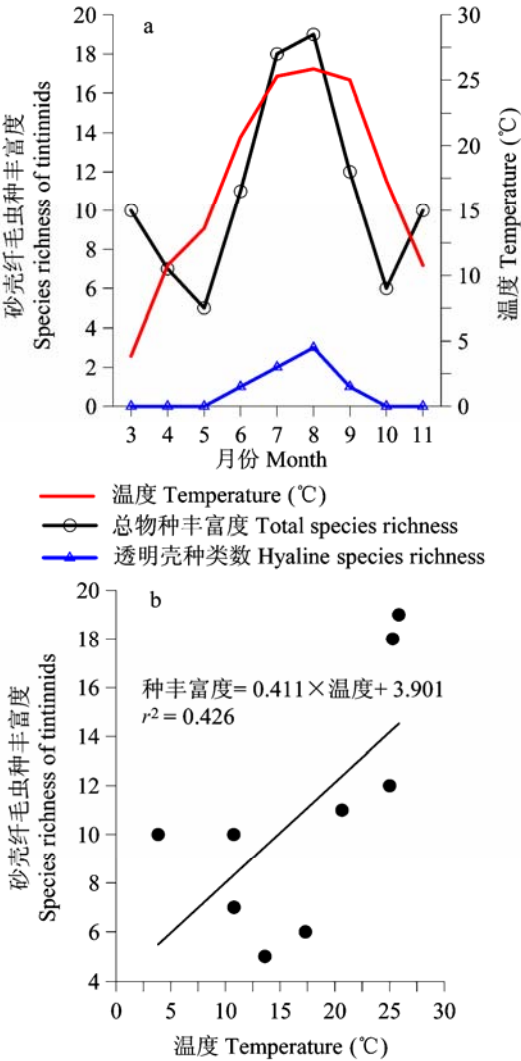


图2 莱州湾3–11月砂壳纤毛虫物种丰富度的变化(a)及温度和物种丰富度的关系(b)
Fig. 2 Variation of species richness of tintinnids in Laizhou Bay from March to November (a), and the relationship between temperature and species richness (b).

(图2b)、盐度相关性均不显著。

2.3 砂壳纤毛虫出现的温度范围

不同种类出现的时间不同(图3a)。运动类铃虫

(*Codonellopsis mobilis*)在3–11月均出现;卡拉直克拟铃虫(*Tintinnopsis karajacensis*)仅在3月出现;圆锥拟铃虫(*T. rapa*)、巴西拟铃虫(*T. brasiliensis*)、梅

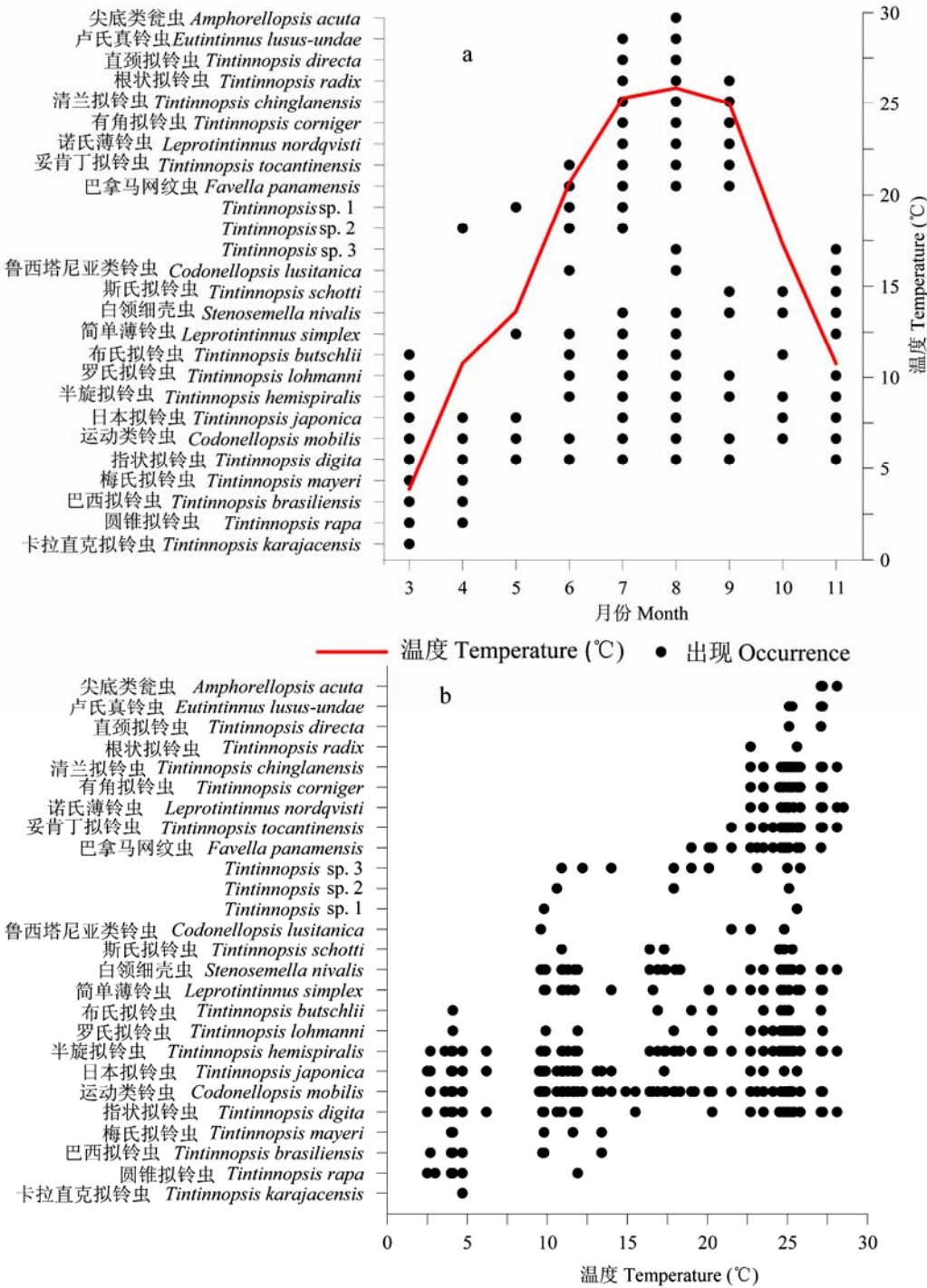


图3 莱州湾3–11月砂壳纤毛虫各种类出现情况(a)及其温度范围(b)

Fig. 3 Temporal variation of temperature (°C), occurrence (a) and temperature range (b) of each tintinnid species in Laizhou Bay from March to November

氏拟铃虫(*T. mayeri*)仅在3、4月出现; 直颈拟铃虫(*T. directa*)、卢氏真铃虫(*Eutintinnus lusus-undae*)、尖底类瓮虫(*Amphorellopsis acuta*)仅在7、8月出现。

不同种类出现的温度范围也不同(图3b)。圆锥拟铃虫、巴西拟铃虫、梅氏拟铃虫、卡拉直克拟铃虫仅在温度低于15℃时出现; 诺氏薄铃虫(*Leprotintinnus nordqvisti*)、有角拟铃虫(*Tintinnopsis corniger*)、清兰拟铃虫(*T. chinglanensis*)、根状拟铃虫(*T. radix*)、直颈拟铃虫、卢氏真铃虫、尖底类瓮虫仅在温度高于22.5℃时出现。其他种类出现的温度范围较广。

黏着壳种类3–11月均有出现, 透明壳种类仅在温度较高(> 15℃)的6–9月出现。

2.4 砂壳纤毛虫群落平均丰度变化及优势种

9个月中各站砂壳纤毛虫群落总丰度的变化范围为0–318 ind./L。各月平均丰度的峰值出现在7月(63 ind./L), 次峰值出现在5月(48 ind./L), 随时间的变化趋势呈双峰型(图4)。去除运动类铃虫之后, 平均丰度在5月没有出现峰值, 呈现先上升后下降的趋势, 与温度的变化趋势较一致(图4)。砂壳纤毛虫的平均丰度与表层平均温度和盐度的相关性均不显著。

在砂壳纤毛虫群落9个月的总丰度中, 3个主要的属占96.45%: 类铃虫属(50.69%)、拟铃虫属

(35.47%)、领细壳虫属(10.29%)。其中运动类铃虫和指状拟铃虫(*Tintinnopsis digita*)两个种3–11月均出现, 运动类铃虫各站平均丰度的峰值出现在5月, 指状拟铃虫各站平均丰度的峰值出现在7、8月(图5)。

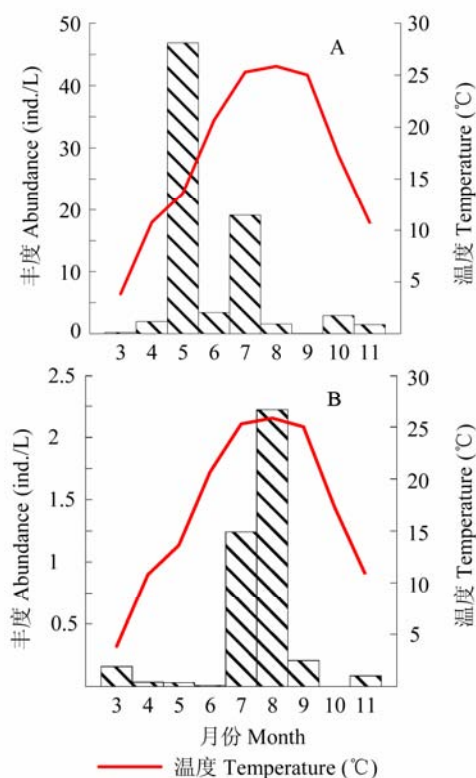


图5 莱州湾3–11月均出现的两种砂壳纤毛虫丰度变化。A: 运动类铃虫, B: 指状拟铃虫。

Fig. 5 Temporal variation of temperature (°C) and tintinnid abundance (ind./L) of 2 species in Laizhou Bay from March to November. A, *Codonellopsis mobilis*; B, *Tintinnopsis digita*.

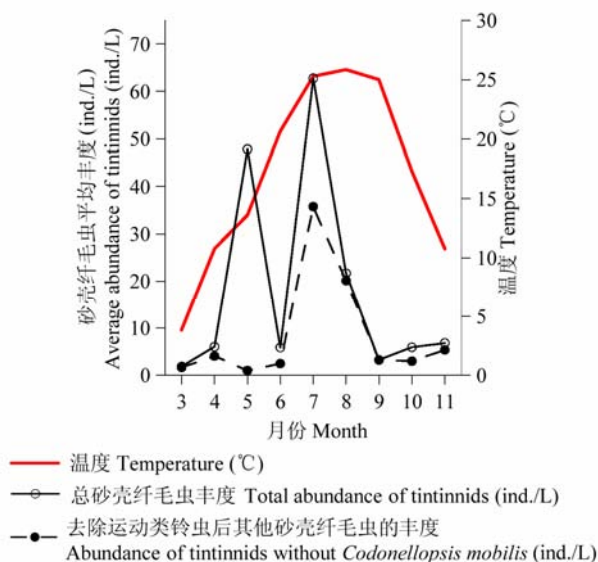


图4 胶州湾3–11月砂壳纤毛虫各站平均丰度(ind./L)的变化 Fig. 4 Temporal variation of temperature (°C), tintinnid average abundance (ind./L) in Laizhou Bay from March to November.

各个月的优势种及其优势度见表2。5月仅有运动类铃虫1种优势种, 且优势度较大; 8月有8个优势种, 且各种类的优势度相对较小。黏着壳种类的丰度在调查时间范围内一直占优势, 而透明壳种类仅在6–9月出现, 其丰度所占比例较小(1.31–25.20%)。

2.5 多样性指数、均匀度和群落结构聚类分析

各月砂壳纤毛虫群落Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数见表3。多样性指数的最大值出现在8月, 此时均匀度指数也相对较大; 最小值均出现在5月。

使用3–11月所有种类的平均丰度对各月砂壳

表2 莱州湾3–11月砂壳纤毛虫的优势种及其优势度
Table 2 The dominant species of tintinnids and their dominance in Laizhou Bay from March to November

	优势种		优势度		优势种		优势度
	Dominant species		Dominance		Dominant species		Dominance
3月	日本拟铃虫	<i>T. japonica</i>	0.293	8月	白领细壳虫	<i>S. nivalis</i>	0.179
	半旋拟铃虫	<i>T. hemispiralis</i>	0.100		清兰拟铃虫	<i>T. chinglanensis</i>	0.129
	运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.065		妥肯丁拟铃虫	<i>T. tocaninensis</i>	0.095
	指状拟铃虫	<i>T. digita</i>	0.065		指状拟铃虫	<i>T. digita</i>	0.077
	巴西拟铃虫	<i>T. brasiliensis</i>	0.065		运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.045
4月	日本拟铃虫	<i>T. japonica</i>	0.637	9月	日本拟铃虫	<i>T. japonica</i>	0.044
	运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.288		罗氏拟铃虫	<i>T. lohmanni</i>	0.040
5月	运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.979		根状拟铃虫	<i>T. radix</i>	0.031
					斯氏拟铃虫	<i>T. schotti</i>	0.220
6月	运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.581		有角拟铃虫	<i>T. corniger</i>	0.042
	巴拿马网纹虫	<i>F. panamensis</i>	0.189		半旋拟铃虫	<i>T. hemispiralis</i>	0.033
		<i>Tintinnopsis</i> sp.1	0.049	指状拟铃虫	<i>T. digita</i>	0.032	
7月	运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.305	10月	根状拟铃虫	<i>T. radix</i>	0.024
	根状拟铃虫	<i>T. radix</i>	0.157		运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.496
	清兰拟铃虫	<i>T.chinglanensis</i>	0.086		白领细壳虫	<i>S. nivalis</i>	0.349
	白领细壳虫	<i>S. nivalis</i>	0.075	11月	白领细壳虫	<i>S. nivalis</i>	0.445
	妥肯丁拟铃虫	<i>T. tocaninensis</i>	0.067		半旋拟铃虫	<i>T. hemispiralis</i>	0.267
	简单薄铃虫	<i>L. simplex</i>	0.033		运动类铃虫	<i>C. mobilis</i>	0.215
					日本拟铃虫	<i>T. japonica</i>	0.030

表3 莱州湾3–11月砂壳纤毛虫的种丰富度、均匀度指数和多样性指数
Table 3 Species richness, evenness index and diversity indices of tintinnids in Laizhou Bay from March to November

	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	11月 November
种丰富度 Species richness	10	7	5	11	18	19	12	6	10
均匀度指数 Evenness index (<i>J</i>)	0.78±0.15	0.62±0.18	0.40±0.30	0.59±0.19	0.57±0.13	0.72±0.08	0.76±0.26	0.55±0.18	0.69±0.11
多样性指数 Diversity index (<i>H'</i>)	1.71±0.60	1.00±0.23	0.42±0.29	1.33±0.34	2.06±0.50	2.38±0.32	1.45±0.75	1.04±0.46	1.71±0.36

纤毛虫群落进行聚类分析(图6), 得到两个群落(相似度30%): 群落I(7–9月), 群落II(3–6月、10–11月)。其中, 群落II中5月与其他月的群落结构差异较大。

3 讨论

3.1 砂壳纤毛虫群落物种丰富度

本研究中砂壳纤毛虫采集使用网孔直径为76 μm的浮游生物网, 获得物属于大型砂壳纤毛虫。在已报道的对沿岸砂壳纤毛虫群落的研究中, 不同海区砂壳纤毛虫物种丰富度差异较大, 有些海区如位于地中海东部的朱尼耶海湾(Jounieh Bay, eastern Mediterranean, 34°N)种丰富度较大, 曾报道有纤毛虫121种(Abboud-Abi Saab, 1989); 有些海区如加利福尼亚的米森湾(Mission Bay, California, 32°N)曾报道的种丰富度较小, 仅11种(Elliott & Kaufmann, 2007)。在莱州湾共发现砂壳纤毛虫7属26种, 在已

有研究中处于中间水平。

不同种类砂壳纤毛虫周年出现的规律不同。Verity(1987)根据季节的变化将纳拉干西特湾发现的29种砂壳纤毛虫总结为三种类型: 周年出现种, 冬–春季种和夏季种。本文中运动类铃虫在3–11月均有出现, 布氏拟铃虫、罗氏拟铃虫、半旋拟铃虫和指状拟铃虫适合的温度范围较广, 这5个种是周年出现种。圆锥拟铃虫、巴西拟铃虫、梅氏拟铃虫、卡拉直克拟铃虫在温度低于15℃时出现, 适合的温度较低, 是冬–春季种。诺氏薄铃虫、有角拟铃虫、清兰拟铃虫、根状拟铃虫、直颈拟铃虫、卢氏真铃虫、尖底类瓮虫在温度高于22.5℃时出现, 适合的温度较高, 是夏季种。

Gold等(1975)研究报道海水温度和物种丰富度之间的关系, 将不同属的砂壳纤毛虫分为3种类型: 常见种(同上述周年出现种)、季节性种(只发生在特

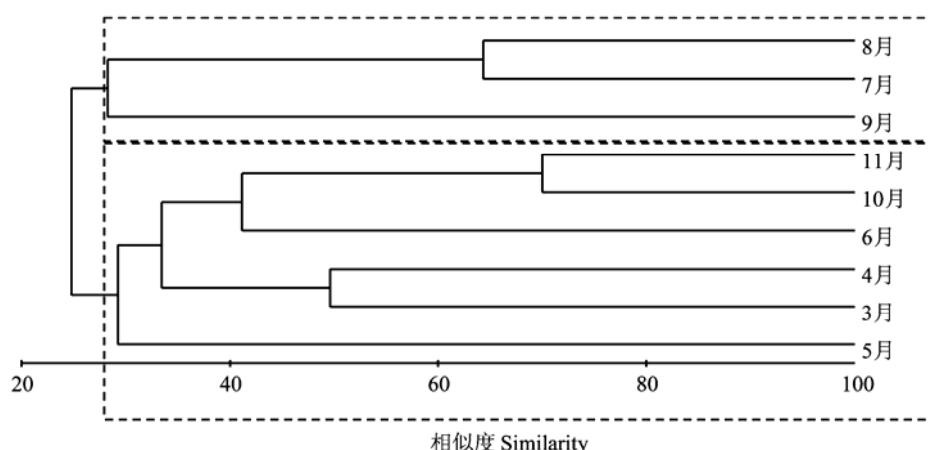


图6 莱州湾3–11月砂壳纤毛虫群落聚类分析结果

Fig. 6 Cluster analysis based on Bray-Curtis similarity matrix of average species abundance (ind./L) of 8 stations in Laizhou Bay from March to November

定时间段)和偶发种(出现没有明显的规律)。在本研究中,除明显全年出现和季节性出现的种类外,其他种类可认为是偶发性的种类,例如*Tintinnopsis* sp.1, *Tintinnopsis* sp.2, *Tintinnopsis* sp.3, 鲁西塔尼亚类铃虫(*Codonellopsis lusitanica*)等。

本研究中砂壳纤毛虫种丰富度的周年变化呈现一峰两谷的趋势,在5月和10月出现低值。莱州湾5月表层温度的变化范围是10.9–16.6°C,平均值为13.61°C,从图3b中可以看出,在这个温度范围内,冬–春季种已经消退,而夏季种还未出现,这可能是导致砂壳纤毛虫种丰富度在5月出现低值的原因。8月之后,莱州湾表层水温逐渐下降,砂壳纤毛虫种丰富度也在8月达到峰值后逐渐降低,仅在11月有所上升,主要是由*Tintinnopsis* sp.3和鲁西塔尼亚类铃虫等偶见种的出现所致。莱州湾砂壳纤毛虫种丰富度的变化趋势与世界其他海区不同,在加拿大芬迪湾(Bay of Fundy)、美国达马里斯科塔河口(Damariscotta Estuary)、地中海爱奥尼亚海(Ionian Sea)、美国纳拉干西特湾(Narragansett Bay)、埃及杜姆亚特港(Damietta Harbor)、美国长岛海湾(Long Island Sound)、美国纽约湾(New York Bight)、亚德里亚海马里亚斯通湾(Mali Ston Bay)、爱琴海(Aegean Sea)、西非毛利塔尼亚海(Mauritania Sea)、意大利圣雷莫港(San Remo)、西班牙布拉内斯(Blanes)沿岸海区、葡萄牙卡斯凯什湾(Bay of Cascais)、西班牙内尔韦恩河河口(Nervion Estuary)、瑞典古尔马峡湾(Gullmar Fjord)等海区,砂壳纤毛虫的种丰富度周

年变化没有明显的峰和谷,在夏、冬两季交替的时间(即春、秋两季)种丰富度会稍大,因为此时夏季和冬季的优势种类交替,可能会同时出现(Dolan *et al.*, 2013)。

3.2 砂壳纤毛虫丰度周年变化

本研究中砂壳纤毛虫丰度的变化范围为0–318 ind./L。在已有的研究中,不同海区砂壳纤毛虫丰度不同,有的海区如美国纳拉干西特湾(Narragansett Bay),砂壳纤毛虫的最大丰度可达到 10^5 ind./L (Verity, 1987);而在黎巴嫩棕榈岛自然保护区(Palm Island Nature Reserve),砂壳纤毛虫的丰度变化范围为< 1–39 ind./L(Abboud-Abi Saab, 2002)。本研究中莱州湾砂壳纤毛虫的丰度相对于已有的其他海区的研究报道较低。

本研究中砂壳纤毛虫的平均丰度在各月之间变化较大,分别在5月和7月出现峰值,其他月丰度较低。已有的关于砂壳纤毛虫丰度周年变化的研究主要集中在温带近岸海域,不同海区砂壳纤毛虫丰度的变化情况不一致。有些海区纤毛虫丰度变化规律与本研究结果类似,一年之中分别在春季和夏秋季出现两个峰值,冬季丰度较低,如胶州湾(于莹等, 2011)、缅因湾(Montagnes *et al.*, 1988)、格丹斯克港(Witek, 1998)及卡斯特拉湾(Bojanić *et al.*, 2005)等。而有的海区纤毛虫丰度一年之中只出现一个峰值,通常在晚春–夏季,而冬季丰度较低,如比斯开湾(Urrutxurtu *et al.*, 2003)、地中海西北部水域(Vaqué *et al.*, 1997)、切萨皮克湾(Dolan, 1991)和南

安普敦近岸水域(Leakey *et al.*, 1993)。

去除运动类铃虫之后砂壳纤毛虫平均丰度呈现单峰型, 峰值出现在7月, 因此5月砂壳纤毛虫平均丰度的增加主要是由于运动类铃虫的大量暴发造成的, 而7月砂壳纤毛虫平均丰度的增加则与砂壳纤毛虫种类数的增加有关。

目前纤毛虫群落丰度与环境因子(如温度、盐度等)的相关性研究很多, 但没有一致结论。有些海区如达马里斯科塔河河口区(Sanders, 1987), 温度是影响纤毛虫分布的主要因素; 有些海区如卡斯特拉湾(Bojanić, 2001), 盐度对纤毛虫分布的影响更重要。本研究中, 砂壳纤毛虫平均丰度与海水表层平均温度和盐度之间均没有显著的相关性, 可能是由于采集的数据量不够所致。

3.3 透明壳种类和黏着壳种类的比例

Dolan等(2013)认为, 透明壳和黏着壳种类的比例与海区的浑浊程度有关, 黏着壳种类更适应较浑浊的海区, 这些种类可以将水体中的矿物质颗粒黏附在壳表面。有的研究(Verity, 1987; Kamiyama & Tsujino, 1996; Modigh & Castaldo, 2002; Elliott & Kaufmann, 2007)认为, 砂壳纤毛虫中的透明壳种类在夏季为优势种, 黏着壳种类在冬季为优势种, 这主要是由于这些海区冬季水体较为浑浊, 而夏季水体较为清澈; 在有些海区(如northern Irish Sea)黏着壳种类全年占优势(Graziano, 1989), 可能是这些海区全年浑浊度较高。本研究中, 黏着壳种类3–11月在丰度上均占优势, 透明壳种类仅在6–9月出现, 而且丰度所占比例较小, 可能是莱州湾全年浑浊度较高所致。

3.4 砂壳纤毛虫种类多样性及群落结构变化

多样性指数和均匀度指数常用来指示生物群落的稳定性, 一般来说, 种类越丰富、各种类数量分布越均匀, 多样性指数就越高, 此时的群落较稳定(孙军等, 2003)。莱州湾7–9月砂壳纤毛虫丰富度、多样性指数和均匀度指数在调查时间范围内相对较大, 说明夏季砂壳纤毛虫群落相对稳定, 受外界的干扰较小; 而5月、10月砂壳纤毛虫丰富度、多样性指数和均匀度指数相对较小, 可能是春秋两季环境因素变化较大, 对砂壳纤毛虫的群落稳定性造成了一定影响。

目前关于砂壳纤毛虫群落变化的研究较少。Sitran等(2007)对爱奥尼亚海的砂壳纤毛虫进行聚

类分析, 划分出3个群落, 但没有明显的季节性。Modigh等(2002)对意大利那不勒斯湾(The Gulf of Naples)在1997–2001年采集的砂壳纤毛虫样品进行聚类分析, 在相似度10%划分出4个群落(冬季群落I、夏季群落II、春季群落III、冬季群落IV)。对莱州湾3–11月所有种类的平均丰度进行聚类结果说明砂壳纤毛虫群落季节变化明显, 随着温度的升高, 从3–6月到7–9月砂壳纤毛虫群落发生了变化, 到10–11月又发生变化。7–9月有一些种类是其他月没有的, 如根状拟铃虫、有角拟铃虫、清兰拟铃虫和诺氏薄铃虫。这些种类的出现是导致7–9月砂壳纤毛虫群落不同于其他月的原因。群落II中5月与其他月的群落结构差异较大, 可能是由于运动类铃虫在5月丰度突然大幅度增加, 会对砂壳纤毛虫群落结构产生影响。

参考文献

- Abboud-Abi Saab M (1989) Distribution and ecology of tintinnids in the plankton of Lebanese coastal waters (eastern Mediterranean). *Journal of Plankton Research*, **11**, 203–222.
- Abboud-Abi Saab M (2002) Annual cycle of the microzooplankton communities in the waters surrounding the Palm Island Nature Reserve (north Lebanon), with special attention to tintinnids. *Mediterranean Marine Science*, **3**, 55–76.
- Azam F, Fenchel T, Field JG, Gray JS, Meyer-Reil LA, Thingstad F (1983) The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, **10**, 257–263.
- Bojanić N (2001) Seasonal distribution of the ciliated protozoa in Kastela Bay. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **81**, 383–390.
- Bojanić N, Šolić M, Krstulović N, Šestanović S, Marasović I, Ninčević Ž (2005) Temporal variability in abundance and biomass of ciliates and copepods in the eutrophicated part of Kaštela Bay (Middle Adriatic Sea). *Helgoland Marine Research*, **59**, 107–120.
- Dolan JR (1991) Guilds of ciliate microzooplankton in the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **33**, 137–152.
- Dolan JR, Gallegos CL (2001) Estuarine diversity of tintinnids (planktonic ciliates). *Journal of Plankton Research*, **23**, 1009–1027.
- Dolan JR, Montagnes DJ, Agatha S, Coats DW, Stoecker DK (2013) *The Biology and Ecology of Tintinnid Ciliates: Models for Marine Plankton*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.
- Elliott DT, Kaufmann RS (2007) Spatial and temporal variability of mesozooplankton and tintinnid ciliates in a

- seasonally hypersaline estuary. *Estuaries and Coasts*, **30**, 418–430.
- Gold K, Morales EA (1975) Seasonal changes in lorica sizes and the species of Tintinnida in the New York Bight. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, **22**, 520–528.
- Graziano C (1989) On the ecology of tintinnids (Ciliophora: Oligotrichida) in the North Irish Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **29**, 233–245.
- Kamiyama T, Tsujino M (1996) Seasonal variation in the species composition of tintinnid ciliates in Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea of Japan. *Journal of Plankton Research*, **18**, 2313–2327.
- Kofoed CA, Campbell AS (1929) *A Conspectus of the Marine and Fresh-water Ciliata 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, **34**, 1–403.
- Kofoed CA, Campbell AS (1939) *The Ciliata: the Tintinninea. Reports on the Scientific Results of the Expedition to the Eastern Tropical Pacific 1904–1905*. Bulletin of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College, **84**, 1–473.
- Laval-Peuto M, Heinbokel JF, Anderson OR, Rassoulzadegan F, Sherr BF (1986) Role of micro- and nanozooplankton in marine food webs. *International Journal of Tropical Insect Science*, **7**, 387–395.
- Leakey R, Burkill PH, Sleight M (1993) Planktonic ciliates in Southampton Water: quantitative taxonomic studies. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **73**, 579–594.
- Modigh M, Castaldo S (2002) Variability and persistence in tintinnid assemblages at a Mediterranean coastal site. *Aquatic Microbial Ecology*, **28**, 299–311.
- Montagnes D, Lynn D, Roff J, Taylor W (1988) 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*, **99**, 21–30.
- Pielou EC (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, **13**, 131–144.
- Pierce RW (1992) Ecology of planktonic ciliates in marine food webs. *Reviews in Aquatic Sciences*, **6**, 139–181.
- Pierce RW, Turner JT (1994) Plankton studies in Buzzards Bay, Massachusetts, USA. IV. Tintinnids, 1987 to 1988. *Marine Ecology Progress Series*, **112**, 235–240.
- Sanders RW (1987) Tintinnids and other microzooplankton: seasonal distributions and relationships to resources and Hydrography in a Maine estuary. *Journal of Plankton Research*, **9**, 65–77.
- Shannon CE, Weaver W (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Sitran R, Bergamasco A, Decembrini F, Guglielmo L (2007) Temporal succession of tintinnids in the northern Ionian Sea, central Mediterranean. *Journal of Plankton Research*, **29**, 495–508.
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳) (2003) The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), **26**, 62–75. (in Chinese with English abstract)
- Urrutxurtu I, Orive E, de la Sota A (2003) Seasonal dynamics of ciliated protozoa and their potential food in an eutrophic estuary (Bay of Biscay). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **57**, 1169–1182.
- Vaqu   D, Blough H, Duarte C (1997) Dynamics of ciliate abundance, biomass and community composition in an oligotrophic coastal environment (NW Mediterranean). *Aquatic Microbial Ecology*, **12**, 71–83.
- Verity PG (1987) Abundance, community composition, size distribution, and production rates of tintinnids in Narragansett Bay, Rhode Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **24**, 671–690.
- Witek M (1998) Annual changes of abundance and biomass of planktonic ciliates in the Gda  nsk Basin, southern Baltic. *International Review of Hydrobiology*, **83**, 163–182.
- Xu ZL (徐兆礼), Chen YQ (陈亚瞿) (1989) Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **4**, 13–15. (in Chinese with English abstract)
- Yu Y (于莹), Zhang WC (张武昌), Zhao N (赵楠), Sun XX (孙晓霞), Zhang CX (张翠霞), Feng MP (丰美萍), Xiao T (肖天) (2011) Annual variations in the abundance and biomass of planktonic ciliate in the Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **42**, 690–701. (in Chinese with English abstract)
- Zhang WC (张武昌), Wang R (王荣) (2000) Microzooplankton and their grazing pressure on phytoplankton in Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **31**, 252–258. (in Chinese with English abstract)
- Zhang WC (张武昌), Feng MP (丰美萍), Yu Y (于莹), Zhang CX (张翠霞), Xiao T (肖天) (2012) *An Illustrated Guide to Contemporary Tintinnids in the World* (砂壳纤毛虫图谱). Science Press, Beijing. (in Chinese)

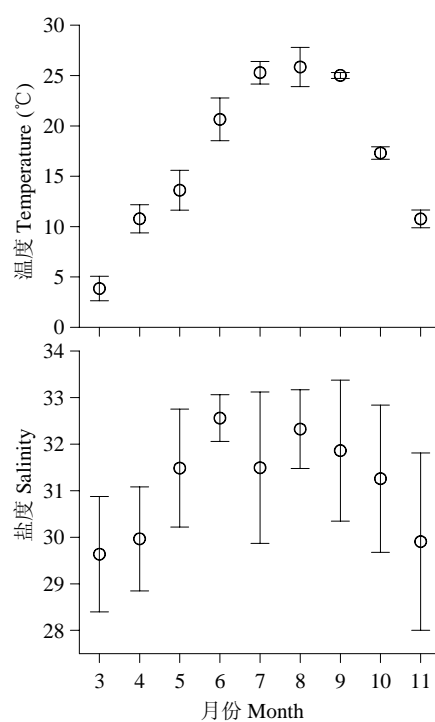
(责任编辑: 孙军 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附图1 莱州湾3–11月表层温度( C)和盐度的变化

Fig. S1 Temporal variation of temperature ( C) and salinity in Laizhou Bay from March to November. Data are averages of the 8 stations with standard deviation.

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2013-257-1.pdf>



附图1 莱州湾3-11月表层温度(°C)和盐度的变化

Fig. S1 Temporal variation of temperature(°C) and salinity in Laizhou Bay from March to November. Data are averages of the 8 stations with standard deviation.