

广西铁山港海域砂壳纤毛虫生态学研究

于凌宇^{1,2}, 张文静^{1,2}, 林元烧^{1,2}, 王毅波^{1,2}, 朱可欣^{1,2}, 李安然^{1,2}, 曹文清^{1,2}

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学海洋生物多样性与全球变化实验室, 福建 厦门 361005)

摘 要: 通过采集广西铁山港海域 2010 年春夏季 8 个站点 16 个样品, 依据壳体形态特征对样品中砂壳纤毛虫进行了分类鉴定, 对春夏季节砂壳纤毛虫的种类组成、种类的季节分布、丰度、优势种、多样性指数、均匀度指数等进行了生态学描述, 并对砂壳纤毛虫群落结构与环境理化因子之间的关系进行了研究。结果表明: 该海域共鉴定出砂壳纤毛虫 6 属 15 种, 其中以拟铃虫属和薄铃虫属为主; 春季各站点砂壳纤毛虫的平均丰度值为 4 385.6 ind/m³, 优势种有简单薄铃虫、诺氏薄铃虫、巴拿马网纹虫, 夏季各站点砂壳纤毛虫平均丰度值为 13 967.3 ind/m³, 优势种有根状拟铃虫、坚果拟铃虫、简单薄铃虫、诺氏薄铃虫、妥肯丁拟铃虫; 砂壳纤毛虫种类数、丰度、多样性指数和均匀度指数等均呈现夏季高于春季的总体态势, 其中春季丰度呈现斑块分布, 而夏季丰度则呈现出由近岸向远岸逐渐递减的趋势; 聚类分析和多维尺度分析将 16 个站点的砂壳纤毛虫群落分为两组, 春季组和夏季组, 各自具有明显的季节特征; 冗余分析显示, 夏季溶解性有机碳、温度和总氮是影响该海域砂壳纤毛虫群落组成的主要环境理化因子, 与种群数量有显著的正相关关系, 而春季群落结构则受氨氮、碱度和溶解氧的影响较大。

关键词: 砂壳纤毛虫; 生态学; 群落结构; 环境理化因子; 铁山港海域

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 1671-1556(2014)03-0012-06

Ecological Research on Tintinnids in Tieshan Harbour, Guangxi

YU Ling-yu^{1,2}, ZHANG Wen-jing^{1,2}, LIN Yuan-shao^{1,2}, WANG Yi-bo^{1,2}, ZHU Ke-xin^{1,2},
LI An-ran^{1,2}, CAO Wen-qing^{1,2}

(1. College of Ocean and Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Laboratory of Marine Biodiversity and Global Change, College of Ocean and Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper investigates tintinnids in water samples taken from Tieshan Harbour sea area in Guangxi in spring and summer of 2010. Totally 15 species are found, in which genera *Tintinnopsis* and *Leptotintinnus* are in dominance. In April, the average abundance of tintinnids is 4 385.6 ind/m³ and the dominant species are *Leptotintinnus simplex*, *Leptotintinnus nordqvist* and *Favella panamensis*. In August, the average abundance of tintinnids is 13 967.3 ind/m³ and the dominant species are *Tintinnopsis radix*, *Tintinnopsis nucula*, *Leptotintinnus simplex*, *Leptotintinnus nordqvisti* and *Tintinnopsis tocaninensis*. In this investigation, the species number, abundance, diversity and evenness in summer are higher than those in spring. The abundance distributes in patches in spring, and is higher in coastal water than in offshore water in summer. In the cluster and multidimensional scaling analysis, tintinnids community from 16 stations is divided into two groups, spring group and summer group with seasonal characters respectively. Redundancy analysis reveals that DOC, temperature and TN are the main factors influencing tintinnids community composition in Tieshan Harbour sea area with great positive correlation in summer. In spring, however, ammonia nitrogen, alkalinity and dissolved oxygen have great influence on the community composition.

Key words: tintinnids; community structure; physical and chemical factors; Tieshan Harbour

收稿日期: 2013-06-16 修回日期: 2014-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276133, J1210050); 海湾公益项目(201005012); 海洋局专项项目(530-03-02-02-03); 厦门大学基础创新科研基金项目(中央高校基本科研业务费专项资金项目)(CXB2011020)

作者简介: 于凌宇(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微型浮游动物、分子生物学。E-mail: tonyyule@live.cn

砂壳纤毛虫是微型浮游生物中的一个广泛分布的类群^[1]。该类群是浮游植物的重要捕食者,它们主要以 nano 级的浮游生物为食,如微型藻类和小型鞭毛虫^[2]。而砂壳纤毛虫本身也是一些桡足类等中型浮游动物的食物来源^[3-4],因此砂壳纤毛虫在不同级别浮游生物的能量传递中起着重要作用。

砂壳纤毛虫的分类研究和系统发育分析主要依据壳体形态特征进行。迄今为止,世界上已有约 900 余种砂壳纤毛虫被描述^[5]。自 1929 年 Kofoed 和 Campbell 建立了纤毛虫的砂壳目后,国际上对该类群的研究主要集中在 20 世纪 30~50 年代,我国对砂壳纤毛虫的研究起步较晚,从 20 世纪中叶开始有对部分海区 and 淡水中的砂壳纤毛虫进行分类和区系分布方面的报道^[6-9]。近十几年,我国对此类群的研究开始增多,如徐奎栋等^[10]依据壳体形态对台湾海峡南部 0~40 m 水层的 40 种砂壳纤毛虫进行了观察;徐大鹏等^[11]对青岛沿海的 9 属 26 种砂壳纤毛虫进行了形态学描述;丰美萍等^[12]在南海北部调查发现了砂壳纤毛虫 7 属 22 种,南海新纪录 7 种。然而,砂壳纤毛虫类群详尽的丰度、时空分布以及与环境因素之间的关系等方面的研究迄今仍十分缺乏。随着海洋微食物环概念的建立,以及观察手段的更新和现代技术的不断引入,人们对该类群的系统地位、演化及其在海洋生物地球化学循环中的作用开始进行重新审视和评估^[10]。由于我国海域辽阔,生态环境多样性丰富,是世界上生物多样性最丰富的国家之一,所以砂壳纤毛虫的种类多样性研究也不应忽视。

本文通过调查广西铁山港及其邻近海域砂壳纤毛虫的丰度、分布以及与环境理化因子之间的关系,从该海域砂壳纤毛虫的种类组成、种类的季节分布、丰度、优势种、多样性指数、均匀度指数等方面进行生态学描述,以期对铁山港海域渔业资源的合理利用和生态系统的评价等提供参考。

1 材料与方法

1.1 调查海域与样品采集

铁山港海域位于北部湾东北部,广西沿海东部,与广东英罗港相邻,为一狭长的喇叭形海湾,全湾岸线长约 170 km,从湾口至顶长达 30 km。铁山港湾滩涂宽阔,湾内水域面积为 100 km²,滩涂面积约为 90 km²,东岸有国家级山口红树林自然保护区,湾口有中国唯一的儒艮自然保护区,西岸是闻名中外的“南珠”养殖基地^[13]。

本次调查于 2010 年春季(4 月)和夏季(8 月)在

广西铁山港海域 8 个站点位置(见图 1)采集 16 份样品,对铁山港及其邻近海域砂壳纤毛虫的丰度、分布以及与环境理化因子之间的关系进行了研究。

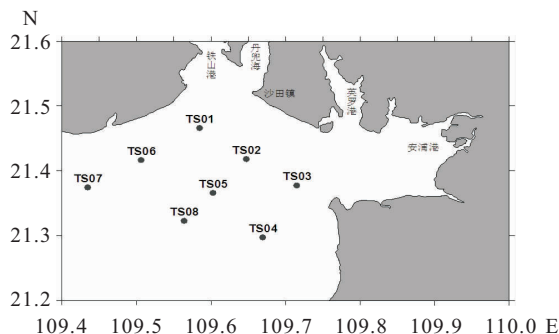


图 1 铁山港海域砂壳纤毛虫调查站点位置图

Fig. 1 Sampling stations in Tieshan Harbour

按照《海洋生物生态调查技术规程》^[14]的规定,在该海域 8 个站点用浅水 III 型网(网口面积 0.1 m²,网目孔径约 77 μm)从底到表垂直拖网采集网样,同时以流量计计算滤过水的体积,所获样品由福尔马林和 Lugol's 固定液分别固定后带回实验室,在显微镜下观察、计数,并依照砂壳纤毛虫的分类学文献^[15-16]进行分类鉴定。

1.2 环境理化因子的测定

环境理化因子包括温度(TEM)、溶解氧(DO)、pH 值、碱度(ALK)、悬浮物(SS)、溶解态有机碳(DOC)、活性硅(ASI)、活性磷(AP)、总磷(TP)、溶解态磷(DP)、亚硝酸盐(NII)、硝酸盐(NIA)、铵盐(AS)、总氮(TN)和总溶解态氮(DN),其测定方法按照《海洋生态环境监测技术规程》^[17]中的标准方法进行。

1.3 数据处理方法

优势度(Y)表示种类的优势程度,其计算公式为

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i \quad (1)$$

式中: n_i 为第 i 种类的丰度; f_i 为第 i 种类的出现频率; N 为总丰度。

本文取优势度 $Y \geq 0.015$ 的类群作为铁山港砂壳纤毛虫的优势类群。

多样性指数 H' 利用香依-威纳(Shannon-Wiener)指数计算,其计算公式为

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

式中: S 为总种类数; P_i 为第 i 个种(类)在样品总丰度中的比值。

均匀度指数 J 的计算公式为

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (3)$$

式中： H' 为香农-威纳指数； S 为总种类数。

本文利用软件 PRIMER 5 将原始数据进行开方和标准化后,基于 Bray-Curtis 相似性系数进行聚类分析,并制作聚类分析图和 MDS(Multidimensional Scaling)分析图;同时运用 CANOCO4.5 进行砂壳纤毛虫的群落结构与环境理化因子之间的关系研究,即先对砂壳纤毛虫的物种数据进行 DCA(Detrended Correspondence Analysis)分析,得到最大梯度长度小于 3,再进行各环境理化因子与砂壳纤毛虫群落结构的 RDA(Redundancy Analysis)分析。

2 结果与分析

2.1 砂壳纤毛虫的种类组成

本次调查海域两个季节航次采集的 16 份样品中,共鉴定出砂壳纤毛虫 6 属 15 种,分别为:*Tintinnopsis radix* (根状拟铃虫),*Tintinnopsis schotti* (斯氏拟铃虫),*Tintinnopsis nucula* (坚果拟铃虫),*Leprotintinnus simplex* (简单薄铃虫),*Leprotintinnus nordqvisti* (诺氏薄铃虫),*Tintinnopsis tocan-tinensis* (妥肯丁拟铃虫),*Favella panamensis* (巴拿马网纹虫),*Tintinnopsis pistillum* (花瓣拟铃虫),*Tintinnopsis butshlii* (布氏拟铃虫),*Codonellopsis ostenfeldi* (奥氏类铃虫),*Tintinnopsis karajacensis* (卡拉直克拟铃虫),*Wangiella dicollaria* (双厚领铃虫),*Craterella tortulata*,*Tintinnopsis* sp.,*Tintinnopsis orientalis* (虫东方拟铃虫)。其中,*Tintinnopsis*(拟铃虫属)的种数占总种数的 60%,个体数量上以隶属于 *Tintinnopsis*(拟铃虫属)和 *Leprotintinnus*(薄铃虫属)两属的种类个体数占优势。

2010 年春季,观察到的砂壳纤毛虫种类为:*Tintinnopsis radix*,*Tintinnopsis butshlii*,*Tintinnopsis schott*,*Tintinnopsis orientalis*,*Leprotintinnus simplex*,*Leprotintinnus nordqvisti*,*Favella panamensis*,*Codonellopsis ostenfeldi*,共 4 属 8 种。其中,拟铃虫属的种数占到总种数的 50%,而薄铃虫属的种数和其他种类的数目则各占总种数的 25%。2010 年夏季,观察到的砂壳纤毛虫种类为:*Tintinnopsis radix*,*Tintinnopsis schott*,*Tintinnopsis nucula*,*Tintinnopsis tocan-tinensis*,*Tintinnopsis pistillum*,*Tintinnopsis butshlii*,*Tintinnopsis karajacensis*,*Tintinnopsis* sp.,*Leprotintinnus simplex*,*Leprotintinnus nordqvisti*,*Codonellopsis ostenfeldi*,*Favella panamensis*,*Wangiella dicol-laria*,共 5 属 13 种。其中,拟铃虫属的种数占到总

种数的 61.5%,薄铃虫属的种数占总种数的 15.4%,其他种类的数目则占总种数的 23.1%。

2.2 砂壳纤毛虫种类数的分布特征

从铁山港海域春夏季节各站点砂壳纤毛虫出现的种数分布来看(见图 2),两个季节除了在 TS08 站点的砂壳纤毛虫种数相等以外,均是夏季高于春季,但两个季节出现砂壳纤毛虫种数最高值、最低值的站点各不相同,春季和夏季砂壳纤毛虫种数相差最多的站点为 TS06(相差 5 种)。由此可见,在铁山港海域中,砂壳纤毛虫种类数量的季节变化比较明显。

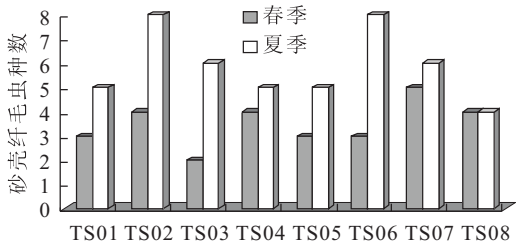


图 2 铁山港海域春夏季各站点砂壳纤毛虫出现的种数分布图

Fig.2 Species numbers of Tintinnids in each investigated station in spring and summer

从铁山港海域砂壳纤毛虫种数的水平分布来看,春季以 TS07 站点出现的砂壳纤毛虫的种数最多,为 5 种,其次是 TS02、TS04、TS08 站点为 4 种,TS01、TS05、TS06 站点为 3 种,而 TS03 站点最少,为 2 种;夏季砂壳纤毛虫出现的种数最多的为 TS02 和 TS06 站点,达 8 种,TS03、TS07 站点为 6 种,TS01、TS04、TS05 站点为 5 种,而 TS08 站点出现的种数则最少,为 4 种。由此可见,在铁山港海域中,春季和夏季砂壳纤毛虫种数水平分布都较为均匀,且分布趋势并不明显。

2.3 砂壳纤毛虫丰度的分布特征

2010 年春季,铁山港海域各站点砂壳纤毛虫的丰度范围在 1 148.0~12 962.5 ind/m³ 之间,平均丰度值约为 4 385.6 ind/m³,丰度的最大值出现在 TS02 站点,其他站点丰度值从高到低依次为 TS06、TS04、TS08、TS07、TS01、TS05、TS03(见图 3);夏季,各站点砂壳纤毛虫的丰度范围在 1 563.0~27 324.1 ind/m³ 之间,平均丰度值约为 13 967.3 ind/m³,丰度的最大值同样在 TS02 站点,其他站点丰度值从高到低依次为 TS01、TS03、TS06、TS04、TS07、TS05、TS08(见图 4)。总体来看,铁山港海域砂壳纤毛虫春季的丰度值明显低于夏季。

从铁山港海域砂壳纤毛虫丰度水平分布来看,

春季砂壳纤毛虫丰度呈现斑块分布(见图 3),北部沿岸为丰度高值区,最高丰度值达 10 000 ind/m³ 以上,而东侧的安浦港附近出现一个明显的丰度低值中心,丰度值不足 1 200 ind/m³;夏季砂壳纤毛虫丰度的水平分布则呈现由东北向西南方向逐渐递减(见图 4),丰度最高值在沙田镇附近,达 27 000 ind/m³ 以上,丰度最低值在离岸最远的 TS08 站点,丰度值不足 1 600 ind/m³。

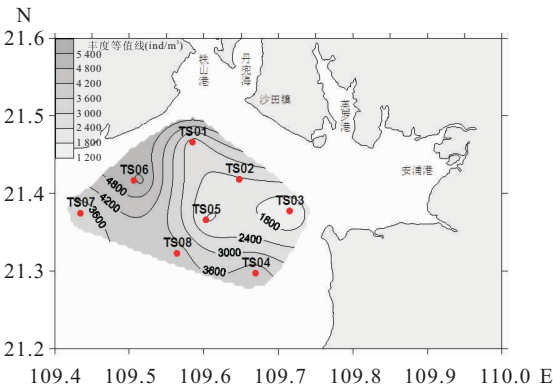


图 3 铁山港海域春季砂壳纤毛虫丰度的水平分布图
Fig. 3 Horizontal distribution of the abundance of tintinnids in spring

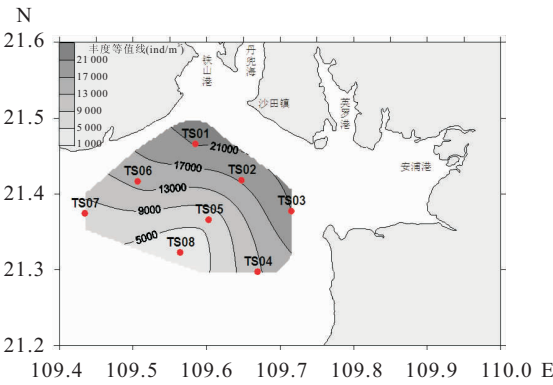


图 4 铁山港海域夏季砂壳纤毛虫丰度的水平分布图
Fig. 4 Horizontal distribution of the abundance of tintinnids in summer

TS08 站点是唯一春季砂壳纤毛虫丰度值高于夏季的站点,两个季节在该站点均出现 4 个砂壳纤毛虫种类,其中有 3 个种类是共同种类,春季该站点的丰度值与其他站点相比并没有明显差异,但夏季该站点各种类的丰度值明显下降,这说明造成这种现象的原因与种类无关,可能与夏季砂壳纤毛虫在 TS08 站点的生活环境有关;而 TS02 和 TS06 站点的情况则十分类似,通过比较发现这两个站点在春季调查中砂壳纤毛虫丰度值达到最高,而在夏季调查中出现砂壳纤毛虫种类数最多,这两个站点在春季砂壳纤毛虫的优势种所占优势更为突出,而夏季砂壳纤毛虫的种类多

且数量相对均匀,春、夏季砂壳纤毛虫优势种不同也说明砂壳纤毛虫优势种具有随季节更替的现象。

2.4 砂壳纤毛虫的多样性和均匀性

经调查铁山港海域夏季各站点砂壳纤毛虫的多样性指数(H')和均匀度指数(J)的平均值均大于春季,见表 1 和表 2。其中,春季的 H' 值在 0.591 67~1.896 24 之间, J 值在 0.421 82~0.886 86 之间(见表 1), H' 的最大值出现在 TS07 站点, J 的最大值出现在 TS01 站点;而夏季的 H' 值在 1.614 33~2.746 91 之间, J 值在 0.628 92~0.931 40 之间(见表 2), H' 的最大值出现在 TS06 站点, J 的最大值出现在 TS05 站点。

表 1 铁山港海域春季各站点砂壳纤毛虫的多样性指数(H')和均匀度指数(J)

Table 1 Diversity and evenness of *Tintinnida* in spring(April,2010)

站点	多样性指数(H')	均匀度指数(J)	站点	多样性指数(H')	均匀度指数(J)
TS01	1.405 64	0.886 86	TS05	0.668 56	0.421 82
TS02	1.236 08	0.618 04	TS06	1.238 90	0.781 66
TS03	0.591 67	0.591 67	TS07	1.896 24	0.816 67
TS04	1.491 11	0.745 56	TS08	1.485 06	0.742 53

表 2 铁山港海域夏季各站点砂壳纤毛虫的多样性指数(H')和均匀度指数(J)

Table 2 Diversity and evenness of *Tintinnida* in summer(August,2010)

站点	多样性指数(H')	均匀度指数(J)	站点	多样性指数(H')	均匀度指数(J)
TS01	1.989 45	0.856 81	TS05	2.162 64	0.931 40
TS02	2.195 82	0.731 94	TS06	2.746 91	0.915 64
TS03	1.625 74	0.628 92	TS07	2.228 27	0.862 01
TS04	2.149 26	0.925 63	TS08	1.614 33	0.807 17

2.5 砂壳纤毛虫的群落结构特征

铁山港海域春季砂壳纤毛虫有 3 种优势种,分别为 *Leprotintinnus simplex* ($Y=0.576$)、*Leprotintinnus nordqvisti* ($Y=0.214$)、*Favella panamensis* ($Y=0.093$);春季砂壳纤毛虫优势种类有 5 种,分别为 *Tintinnopsis radix* ($Y=0.429$)、*Tintinnopsis nucula* ($Y=0.061$)、*Leprotintinnus simplex* ($Y=0.237$)、*Leprotintinnus nordqvisti* ($Y=0.089$)、*Tintinnopsis tocaninensis* ($Y=0.055$)。

铁山港海域在春季,*Leprotintinnus simplex* ($Y=0.576$)为最常见种,在 8 个站点中均被观察到,*Leprotintinnus nordqvisti* 和 *Favella panamensis* 为较常见种,出现频率较高;而夏季,*Tintinnopsis radix*,*Leprotintinnus simplex* 和 *Leprotintinnus nordqvisti* 为最

常见种,在 8 个站点中均被观察到,*Tintinnopsis to-*
cantinensis 为较常见种,出现频率较高。

通过对铁山港海域砂壳纤毛虫群落结构进行 Cluster 聚类分析,结果表明 8 个站点两个季节 16 个样品中,按其群落结构相似性分成了两个组(见图 5),其中夏季 8 个站点为第一组,春季 8 个站点为第二组,说明砂壳纤毛虫在不同季节有各自的群落结构特征,表现出清晰的季节性差异。而第一组又分为两个亚组,亚组 I 包含夏季 TS08、TS05、TS04、TS07、TS02 和 TS03 站点,其共同特点为离岸较远;亚组 II 包含夏季 TS06、TS01 站点,其共同特点为距西北沿岸较近,这说明铁山港海域夏季砂壳纤毛虫在远、近岸的群落结构差异比较明显。而春季砂壳纤毛虫的群落结构在空间上的变化则较为均匀,并未出现明显的远、近岸群落结构差异。通过对该海域各站点砂壳纤毛虫群落结构进行 MDS 相似性分析(见图 6),也得到了相同的结果。

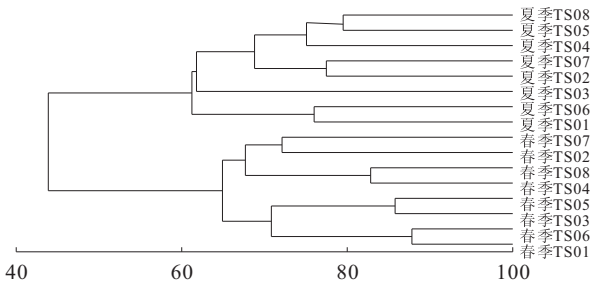


图 5 铁山港海域春夏季 8 个站点砂壳纤毛虫群落结构的聚类分析
Fig. 5 Cluster analysis of tintinnids in 8 investigated stations in spring and summer



图 6 铁山港海域春夏季 8 个站点砂壳纤毛虫群落结构的 MDS 分析
Fig. 6 MDS analysis of tintinnids in 8 investigated stations in spring and summer

2.6 砂壳纤毛虫群落结构与环境理化因子的关系
铁山港海域春季各站点海水表层温度范围为

22.7~24.4℃,盐度范围为 30.2‰~32.0‰,总磷范围为 0.009 6~0.028 0 mg/L,总氮范围为 0.134~0.240 mg/L;夏季各站点海水表层温度范围为 29.8~31.6℃,盐度范围为 26.2‰~29.9‰,总磷范围为 0.014 0~0.042 0 mg/L,总氮范围为 0.186~0.305 mg/L。

通过对铁山港海域砂壳纤毛虫群落组成与环境理化因子进行 RDA 分析(见图 7)显示:第一、第二排序轴的解釋度分别为 39.7%和 16.5%,较好地反映了数据信息;温度(TEM)与第一排序轴呈极其显著的正相关性关系,相关系数为 1.000,溶解性有机碳(DOC)、总氮(TN)与第一排序轴的相关系数分别为 0.956、0.496 3,也呈现显著的正相关性,而铵盐(AS)、碱度(ALK)、溶解氧(DO)则显示出负相关性,相关系数分别为-0.78、-0.70、-0.72;第一排序轴将 16 个站点的砂壳纤毛虫类群分为春季部分和夏季部分,夏季各个站点的砂壳纤毛虫倾向分布在 DOC、TEM、TN 较高的海域,而春季恰好相反,砂壳纤毛虫群落偏向于 DOC、TEM、TN 较低而 AS、ALK 和 DO 较高的海域。

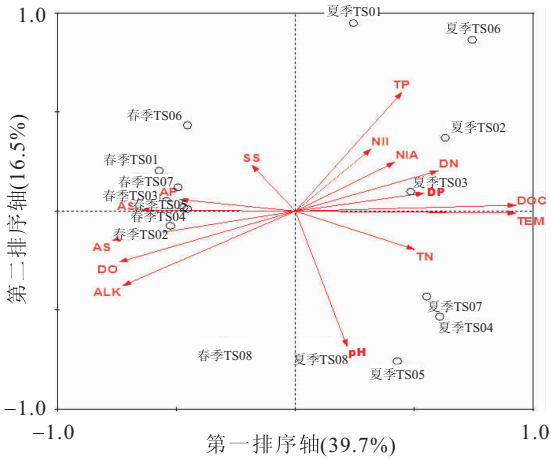


图 7 铁山港海域砂壳纤毛虫群落组成与环境理化因子的 RDA 双序图($P<0.05$)
Fig. 7 RDA ordination of the tintinnids community composition and environmental factors in Tieshan Harbour ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 砂壳纤毛虫的类群

R. W. Pierce 等^[18]根据生物地理学特征将全球已知的砂壳纤毛虫分为 6 个分布类型:广布型(*cosmopolitan*)、近岸浅海型(*neritic*)、北半球型(*boreal*)、南半球型(*austral*)、温水型(*warm water*)和热带太平洋

型(*tropical pacific*)。本次调查所获得的所有砂壳纤毛虫种类中,*Tintinnopsis*、*Leptotintinnus* 和 *Favella* 属于近岸浅海型,*Codonellopsis* 和 *Wangiella*^[19] 属于广布型。*Tintinnopsis*、*Leptotintinnus* 和 *Favella* 3 属之所以分布在近海沿岸海域是由于 *Tintinnopsis* 和 *Leptotintinnus* 中的所有种类在繁殖过程中形成砂壳时需要大量的矿质元素,相对于深海远洋的生存环境,近岸海域能够不断提供大量矿物质以支撑砂壳纤毛虫的生长发育,而在 *Favella* 生活史中如果遇到恶劣的生存条件时自身会形成休眠包囊沉入水底沉积物中^[20],一旦环境适宜,形成包囊的细胞则会浮到水面进行脱包囊(excystment)过程,恢复正常的生命活动^[21-22]。相对于深海,近岸浅水的条件可以保证休眠包囊回到表层水面。

有关南海的砂壳纤毛虫的分类学资料及研究并不多,尤其是雷州半岛以西的北部湾海域。丰美萍等^[12]于 2007 年 10 月在南海北部雷州半岛和海南岛以东广阔的海域研究时发现,砂壳纤毛虫有 7 属共 22 种,其中 *Tintinnopsis*(拟铃虫属)最多,共 10 种,*Codonellopsis*(类铃虫属)次之,共 6 种;谭烨辉等^[23]于 2004 年 8 月对三亚湾的砂壳纤毛虫调查发现,以布氏拟铃虫 *Tintinnopsis butschlii* 为首的拟铃虫是三亚湾海域砂壳纤毛虫的优势种类。本文报道的北部湾铁山港海域 8 月份网样中 *Tintinnopsis*(拟铃虫属)最多,共 8 种,其次 *Leptotintinnus*(薄铃虫属),共 2 种。由此可以看出,同一季节在南海北部雷州半岛东西两侧的海域中砂壳纤毛虫的优势种类是相似的。

3.2 砂壳纤毛虫的时空分布

本次调查中砂壳纤毛虫的种类数、丰度、优势度、多样性指数和均匀度指数等各项指标的水平均呈现出夏季高于春季的总体态势。以往在其他海域的调查也都表明夏季是砂壳纤毛虫繁殖的盛季,如赵楠等^[24]在胶州湾连续 3 年的砂壳纤毛虫调查(2001 年 2、5、8 月,2002 年 5、8、11 月以及 2003 年 2 月),张武昌等^[25]于 2005 年 4 个季度对长江口 40 个站点的砂壳纤毛虫的调查。夏季砂壳纤毛虫的平均丰度值高于春季,随着水温的增高经过一个季节生长繁殖的积累,砂壳纤毛虫个体数量已明显增加。丰美萍等^[12]同时发现砂壳纤毛虫丰度在近岸高、远岸低,多呈斑块状分布,大部分砂壳纤毛虫分布区在近岸浅水区。本次调查中,夏季砂壳纤毛虫在远、近岸的群落结构差异比较明显,多分布在铁山港近岸处。可见,夏季砂壳纤毛虫在近岸海域分布上有着相似性。

H. X. Liu 等^[26]在 2010 年对汕头沿海砂壳纤毛虫

进行了多样性研究,研究结果与本文研究结果相比 *H'* 值略微偏大,这表明铁山港海域与汕头附近海域的砂壳纤毛虫相比多样性偏低,平面分布则比较均匀。

3.3 砂壳纤毛虫的群落结构特征

从季节变化的角度来看,*Leptotintinnus*(薄铃虫属)无论在春季还是夏季均表现为优势种,可以说薄铃虫属的优势度受季节影响变化较小;而 *Tintinnopsis*(拟铃虫属)仅在夏季中呈现优势种,说明拟铃虫属的优势度受季节影响变化较大。这是因为夏季的环境条件更适合拟铃虫的生长,故而拟铃虫属的种类在夏季表现出较大的优势。

比较砂壳纤毛虫出现总种数分布图(见图 2)和春夏季丰度分布图(见图 3 和图 4)可以看出,砂壳纤毛虫的种数与丰度分布趋势较为一致,出现种数多的站点丰度值也高,种数少的站点丰度值也低,说明砂壳纤毛虫各种类生态位分化程度较高,不存在明显的种间竞争。

3.4 环境理化因子对砂壳纤毛虫群落结构的影响

铁山港海域夏季砂壳纤毛虫丰度、多样性、均匀度均大于春季,群落之间相互作用更为紧密,群落结构更加复杂,而 DOC、TEM、TN 对砂壳纤毛虫群落结构有显著的影响。其主要原因是:DOC 可以作为砂壳纤毛虫可直接利用的有机碳源,而有机碳源的变化会对砂壳纤毛虫的存活率产生直接影响,同时砂壳纤毛虫更适合生活在温度较高的水体中,铁山港属亚热带季风气候区,夏季水温较高,适于水体中砂壳纤毛虫生存;铁山港海域水体中氮主要来源于地表径流和含氮的生活废水,这些含氮化合物经过各种反应过程形成了稳定的氮循环系统^[27-28],以砂壳纤毛虫为代表的原生动物是氮循环系统的重要组成部分,这使得水体中氮浓度的轻微改变就会对砂壳纤毛虫的丰度和群落结构产生较强的影响。

参考文献:

[1] Lynn, D. The ciliated protozoa: Characterization, classification and guide to the literature[J]. *European Journal of Protistology*, 2010, 2: 153-154.

[2] Dolan, J. R. Morphology and ecology in tintinnid ciliates of the marine plankton; Correlates of lorica dimensions[J]. *Acta Protozoologica*, 2010, 49: 235-244.

[3] Karayanni, H., U. Christaki, W. F. Van, et al. Influence of ciliated protozoa and heterotrophic nanoflagellates on the fate of primary production in the northeast Atlantic Ocean[J]. *Geophys. Research Oceans*, 2005, 110: C07S15, DOI: 10. 1029/2004JC002602.

[4] Stoecker, D. K., J. M. Capuzzo. Predation on protozoa: Its importance to zooplankton[J]. *Plank, Research*, 1990, 12: 891-908.

利学报,2012,43(2):181—185.

[4] 张桂荣,殷坤龙,刘礼领,等. 基于 WEBGIS 和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学,2005,26(8):1312—1317.

[5] 张桂荣,殷坤龙,刘礼领,等. 基于 WebGIS 云南滑坡灾害气象预警分析模型[J]. 地理信息世界,2012,8(4):36—43.

[6] Peng,Z. P. , M. H. Tsou. *Internet GIS : Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Network* [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. , 2003: 506.

[7] 刘洪光,高锡林,马维峰,等. 基于 ArcGIS 的地质灾害地图符号库设计与实现[J]. 国土资源遥感,2011,89(2):147—150.

[8] 陈米思. 地图及位置服务在地质灾害管理中的应用研究[J]. 海峡科学,2012,69(9):28—32.

[9] Yang,C. J. , S. Wu, Y. C. Ren, et al. Loose architecture of multi-level massive geospatial data based on virtual quadtree[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51 (1): 114—123.

[10]刘楠,李欣. 跨平台高质量二维图形库设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2010,31(7):1599—1622.

[11]张玲,陈元春,孙勇. 基于 GDI+ 的通用图形平台设计[J]. 计算机工程,2005,31(12):218—220.

[12]Chand, M. *Graphics Programming with GDI +* [M]. Boston: Pearson Education, Inc. , 2004:1—3.

[13]Microsoft. MSDN [EB/OL]. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/zccx11ha%28v=vs.71%29.aspx>.

[14]Shemanarev, M. *AGG Reference Manual* [EB/OL]. <http://www.antigrain.com/doc/index.html>.

[15]鲁力,李欣. 基于 AGG 算法库的通用图形接口设计[J]. 微机计算机信息,2009,25(2-3):266—267.

[16]Wikipedia. *Rasterisation* [EB/OL]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Rasterisation>.

[17]*FreeType Project* [EB/OL]. <http://www.freetype.org/freetype2/index.html>.

[18](美)怀特. GDI+ 程序设计[M]. 杨浩,张哲峰,译. 北京:清华大学出版社,2002:99—100.

(上接第 17 页)

[5] Lee, J. J. , G. E. Leedale, P. Bradbury. *An Illustrated Guide to the Protozoa* [M]. 2nd ed. Lawrence: Allen Press, 2000: 827—860, 1054—1084.

[6] Wang, C. Notes on tintinninea from the gulf of Pe-Hae [J]. *Sinensia*, 1936, 7(3): 353—370.

[7] Nie, D. , P. Chéng. Tintinninea of the Hainan region [J]. *Contr-Biol Lab SciSoc China Zoological Series*, 1947, 16: 41—86.

[8] Wang, C. , D. Nie. A survey of the marine protozoa of Amoy [J]. *Contr-Biol Lab SciSoc China Zoological Series*, 1932, 8: 285—385.

[9] 尹光德. 胶州湾砂壳纤毛虫之初步调查[J]. 山东大学学报, 1952 (2): 36—56.

[10]徐奎栋,洪华生,宋微波,等. 台湾海峡的砂壳纤毛虫研究(纤毛动物门:砂壳亚目)[J]. 动物分类学报,2001,26(4):454—466.

[11]徐大鹏,宋微波. 青岛沿海砂壳纤毛虫(原生动物,纤毛门,砂纤目)[J]. 动物分类学报,2005,30(3):501—508.

[12]丰美洋,张武昌,张翠霞,等. 南海北部大型砂壳纤毛虫的水平分布[J]. 热带海洋学报,2010,29(3):141—150.

[13]李树华,黎广钊. 中国海湾志·第十二分册·广西海湾[M]. 北京:海洋出版社,1993.

[14]国家海洋局 908 专项办公室. 海洋生物生态调查技术规程[M]. 北京:海洋出版社,2006.

[15]沈韞芬. 原生动物学[M]. 北京:科学出版社,1999:656.

[16]宋微波. 原生动物学专论[M]. 青岛:青岛海洋大学出版社,1999.

[17]国家海洋局. 海洋生态环境监测技术规程[Z]. 北京:国家海洋局,2002.

[18]Pierce, R. W. , J. T. Turner. Global biogeography of marine tintinnids [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1993, 94: 11—26.

[19]Nie, D. S. Notes on tintinninea from the bay of Amoy [A]. In *Third Annual Report* [C]. China: The Marine Biological Association of China, 1934: 71—80.

[20]Krsinic, F. On the ecology of tintinnines in the Bay of MaliSton (Eastern Adriatic) [J]. *Estuar. Coast. Shelf*, 1987, 24: 401—408.

[21]Kamiyama, T. , Y. Aizawa. Excystment of tintinnid ciliates from marine sediment [J]. *Plankton*, 1990, 36: 137—139.

[22]Kamiyama, T. , Y. Aizawa. Effects of temperature and light on tintinnid excystment from marine sediments [J]. *Nippon Suisan Gakk*, 1992, 58: 877—884.

[23]谭辉辉,黄良民,黄小平,等. 三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系[J]. 生态学报,2010,30(24): 6835—6844.

[24]赵楠,张武昌,孙松,等. 胶州湾中大型砂壳纤毛虫的水平分布[J]. 海洋与湖沼,2007,38(5):468—475.

[25]张武昌,王克,肖天. 长江口 2005 年 4 个航次中大型砂壳纤毛虫的水平分布[J]. 海洋科学,2009,33(7):6—9.

[26]Liu, H. X. , L. M. Huang, Y. H. Tan, et al. Seasonal variations in species composition and abundance of tintinnids in Santou coastal water [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 13(1): 81—86.

[27]Boyer, E. W. , C. L. Goodale, N. A. Jaworski, et al. Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern U. S. A. [J]. *Biogeochemistry*, 2002, 57 (1): 137—169.

[28]Caraco, N. F. , J. J. Cole. Human impact on nitrate export: An analysis using major world rivers [J]. *Ambio*, 1999, 28(2): 167—170.

通讯作者: 张文静(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事环境生物学方面的研究. E-mail: zhangwenjing@xmu.edu.cn