

Doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2013.03.025

于莹,张武昌,蒋增杰,等. 桑沟湾浮游纤毛虫丰度和生物量分布的季节变化[J]. 海洋学报, 2013, 35(3):215-224.

Yu Ying, Zhang Wuchang, Jiang Zengjie, et al. Seasonal variation of planktonic ciliates in Sanggou Bay, Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2013, 35(3):215-224.

桑沟湾浮游纤毛虫丰度和生物量分布的季节变化

于莹^{1,3}, 张武昌^{1*}, 蒋增杰², 赵苑¹, 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, 山东 青岛 266071; 2. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 于 2011 年 4、8、10 月及 2012 年 1 月对桑沟湾进行了浮游纤毛虫丰度和生物量的季节调查。纤毛虫的平均丰度为 $(7\ 552 \pm 10\ 979)$ 个/L, 范围为 408~61 667 个/L; 纤毛虫的平均生物量(以碳计)为 $(4.79 \pm 5.77) \mu\text{g/L}$, 范围为 0.35~33.09 $\mu\text{g/L}$ 。无壳纤毛虫丰度和生物量主要分布在湾内, 湾中和湾外丰度相对较低; 砂壳纤毛虫丰度和生物量在盐度较高的海区总体较高, 呈现朝向外海分布的趋势。纤毛虫丰度和生物量的高值区春季主要出现在湾的西北, 夏季向湾中部迁移, 秋季主要出现在湾的西南, 冬季主要出现在湾的西部, 高值区随季节大致呈顺时针迁移的趋势。纤毛虫的丰度春季最高, 冬季最低; 生物量夏季最高, 冬季最低。无壳纤毛虫夏季粒级较大, 冬季粒级较小; 砂壳纤毛虫壳的平均口径夏季较大, 秋季较小。共鉴定出砂壳纤毛虫 8 属 27 种, 其中拟铃虫属(*Tintinnopsis*) 种数最多。砂壳纤毛虫在纤毛虫总丰度中的比例平均为 $16.3\% \pm 21.9\%$, 夏季最高($36.3\% \pm 27.8\%$), 冬季最低($4.9\% \pm 5.9\%$)。纤毛虫丰度与温度、盐度、Chl a 浓度及微微型真核浮游生物丰度均没有明显的相关性, 但与蓝细菌及异养细菌丰度呈显著的正相关关系。

关键词: 浮游纤毛虫; 丰度; 生物量; 季节变化; 桑沟湾

中图分类号: P734.22

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2013)03-0215-10

1 引言

海洋浮游纤毛虫是一类微小(粒径 5~200 μm)的单细胞原生动物, 主要包括无壳纤毛虫和砂壳纤毛虫两大类。作为微型浮游动物的重要组成部分^[1], 浮游纤毛虫是连接微食物网和经典食物链的重要中介^[2], 在海洋生态系统的物质循环和能量流动中发挥重要的作用。我国研究者从 20 世纪 90 年代开始关注纤毛虫生态学, 目前已经在渤海、黄海、东海、南海进行了调查^[3]。关于纤毛虫丰度和生物量季节变化

的资料较少, 仅在胶州湾^[4-5]及獐子岛海区^[6]有过报道。

桑沟湾位于山东半岛东端, 呈“C”字型, 东面通过宽 10 km 的湾口与黄海相连, 平均水深 7~8 m, 是我国北方典型的半封闭海湾。有关桑沟湾细菌^[7-8]、浮游植物^[9-10]及浮游动物^[11]的分布已有研究, 但浮游纤毛虫的资料尚未见报道。本文于 2011 年 4、8、10 月及 2012 年 1 月对桑沟湾进行了浮游纤毛虫丰度和生物量的季节调查, 为桑沟湾生态系统研究提供本底资料。

收稿日期: 2012-08-20; 修订日期: 2012-12-20。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB409804); 国家自然科学基金项目(40876085); 创新群体课题(40821004)。

作者简介: 于莹(1986—), 女, 山东省威海市人, 博士生, 主要从事海洋微型浮游动物生态学。E-mail: yuyingxf001@163.com

* 通信作者: 张武昌, 研究员, 主要从事海洋浮游动物生态学。E-mail: wuchangzhang@163.com

2 材料和方法

2011 年 4、8、10 月及 2012 年 1 月在桑沟湾进行 4 个航次纤毛虫样品的采集。共设 19 个站位(图 1),覆盖湾内(13~19 号站)、湾中(8~12 号站)及湾外(1~7 号站),水深范围为 5~21 m。用美国 YSI Professional Plus 便携式水质分析仪测定各站位温度、盐度;用德国 HYDRO-BIOS 公司 Ruttner 水样采集器采集表层(水下 0.5 m)水样,水深大于 10 m 的加采 10 m 层水样。

每层取 500 mL 水样 GF/F 滤膜过滤,滤膜置于 -20℃ 冰箱保存。滤膜带回实验室用 90% 丙酮在黑暗中 -20℃ 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,立即用 Lugol's 液固定,终浓度 1%,颠倒几次使其混合均匀。

样品分析按照 Utermöhl 方法^[12]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。记录无壳纤毛虫和砂壳纤毛虫的丰度,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^[13]鉴定到种。测量纤毛虫虫体的体长、体宽等,按最接近的几何形状(如柱体、球体和锥体)计算体积。生物量(以碳计,后同)由体积乘转换系数($0.19 \text{ pg}/\mu\text{m}^3$)^[14]得来,砂壳纤毛虫体积直接按照肉体积计算。

按照纤毛虫细胞体积的大小将无壳纤毛虫分成 3 种粒级: $10^3 \sim 10^4 \mu\text{m}^3$ (ACI)、 $10^4 \sim 10^5 \mu\text{m}^3$ (ACII)及大于 $10^5 \mu\text{m}^3$ (ACIII)^[15]。纤毛虫的丰度和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%。

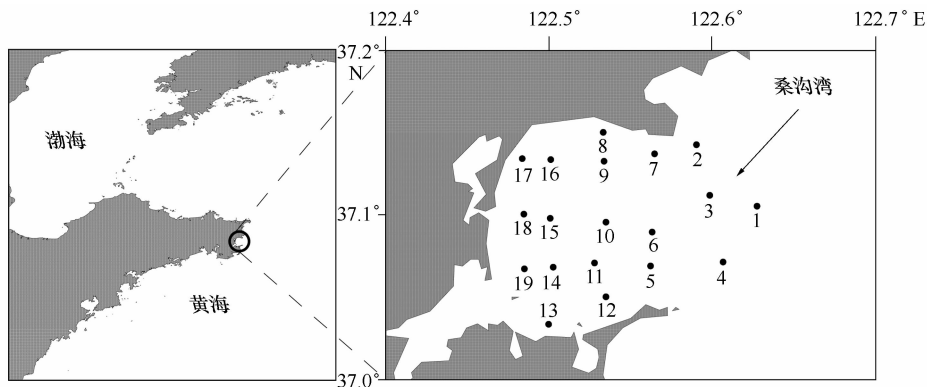


图 1 调查站位图

3 结果

3.1 表层分布特征

3.1.1 春季

表层温度范围为 5.50~11.61℃,平均值为(9.00 ± 2.12)℃,从湾内向湾外递减。表层盐度范围为 30.21~30.74,平均值为 30.51 ± 0.12,除 14 号站出现最低值外,盐度大致从湾内向湾外递减。表层 Chl a 浓度范围为 0.70~2.70 μg/L,平均值为(1.27 ± 0.55) μg/L,在湾内及湾外较高而湾中较低(见图 2)。

表层无壳纤毛虫丰度范围为 387~61 667 个/L,最大值出现在 16 号站,一类体长约 10~15 μm 的无壳纤毛虫占优势。无壳纤毛虫丰度的高值区出现在

湾内西北角,湾中及湾外丰度较低。砂壳纤毛虫丰度范围为 0~380 个/L,最大值出现在 19 号站,主要是圆锥拟铃虫。砂壳纤毛虫丰度的高值区主要分布在湾内西部,湾中及湾外丰度较低。纤毛虫总丰度范围为 500~61 667 个/L,高值区出现在湾内西北角,湾中及湾外丰度较低(见图 2)。

表层无壳纤毛虫生物量范围为 0.62~7.12 μg/L,高值区主要出现在湾内西北角和湾中 11 号站,湾外生物量较低。砂壳纤毛虫生物量范围为 0.00~0.76 μg/L,高值区主要出现在湾内西部,湾中和湾外生物量较低。纤毛虫总生物量范围为 0.76~7.12 μg/L,高值区主要出现在湾内西北角和湾中 11 号站,湾外生物量较低。

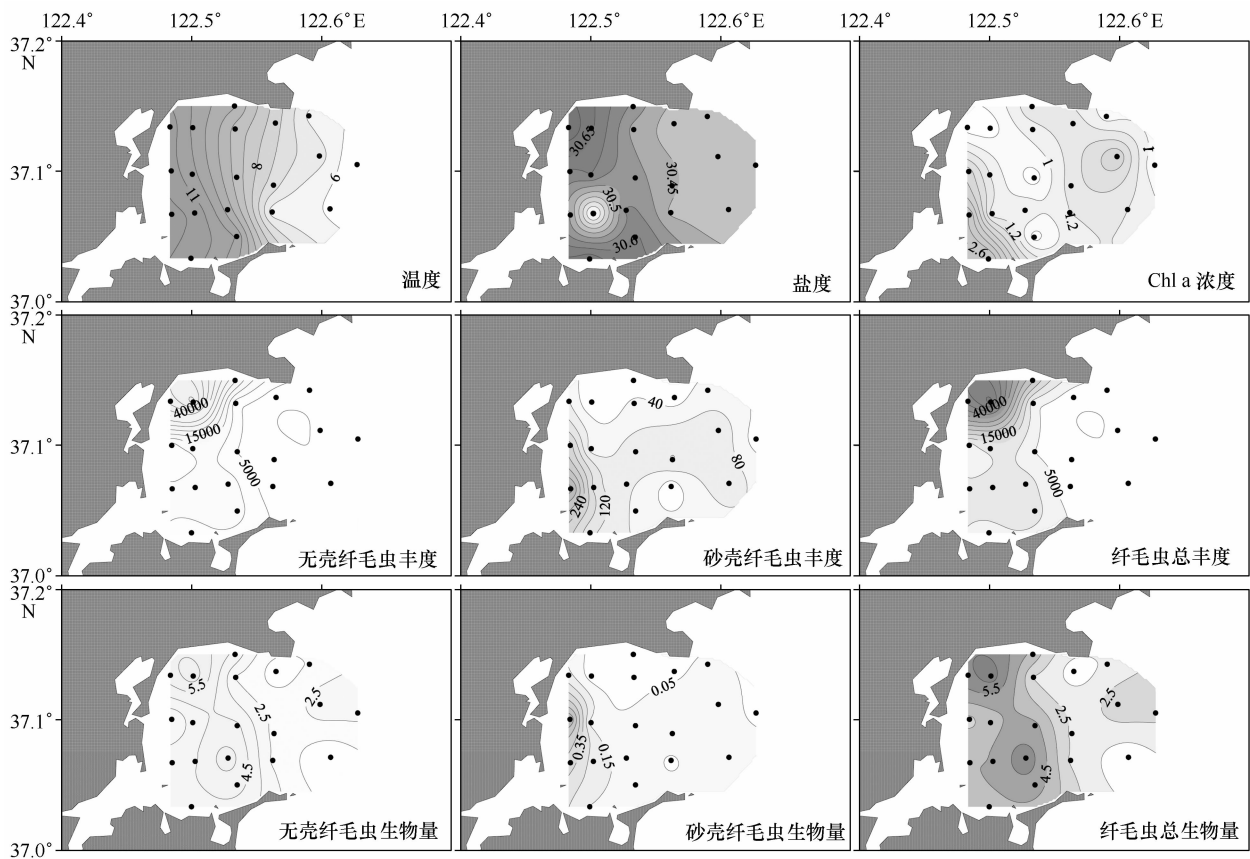


图2 春季表层温度(°C)、盐度、Chl a 浓度($\mu\text{g/L}$)、无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫、纤毛虫总丰度(个/L)及无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫总生物量($\mu\text{g/L}$)的水平分布

3.1.2 夏季

表层温度范围为 $18.50 \sim 24.20^\circ\text{C}$, 平均值为 $(21.36 \pm 2.02)^\circ\text{C}$, 从湾内向湾外递减。表层盐度范围为 $26.17 \sim 31.41$, 平均值为 29.39 ± 1.78 , 从湾内向湾外递增。表层 Chl a 浓度范围为 $5.72 \sim 38.74 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $(14.41 \pm 9.74) \mu\text{g/L}$, 大致从湾内向湾外递减(见图 3)。

表层无壳纤毛虫丰度范围为 $790 \sim 42\,199$ 个/L, 最大值出现在 17 号站, 一类体长约 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 的无壳纤毛虫占绝对优势。无壳纤毛虫丰度的高值区同春季大体一致, 主要分布在湾内西北角, 湾外丰度较低。砂壳纤毛虫丰度范围为 $15 \sim 7\,144$ 个/L, 最大值出现在 9 号站, 主要是尖底拟铃虫。砂壳纤毛虫丰度在湾中较高, 湾内及湾外较低。纤毛虫总丰度范围为 $1\,174 \sim 42\,315$ 个/L, 高值区主要分布在湾内西北角, 湾中丰度略有升高, 湾外丰度较低(见图 3)。

表层无壳纤毛虫生物量范围为 $0.26 \sim 23.98 \mu\text{g/L}$, 高值区主要出现在湾中 11 号站, 一类体长约 $40 \sim 60 \mu\text{m}$ 的无壳纤毛虫占生物量的绝对优势, 湾内西北

角生物量也较高, 湾外生物量较低。砂壳纤毛虫生物量范围为 $0.02 \sim 9.11 \mu\text{g/L}$, 在湾中较高, 湾内及湾外较低。纤毛虫总生物量范围为 $0.63 \sim 33.09 \mu\text{g/L}$, 高值区主要出现在湾中 11 号站和湾内西北角, 湾外生物量较低。

3.1.3 秋季

表层温度范围为 $14.90 \sim 17.50^\circ\text{C}$, 平均值为 $(16.47 \pm 0.79)^\circ\text{C}$, 从湾内向湾外递增。表层盐度范围为 $30.57 \sim 31.37$, 平均值为 31.18 ± 0.23 , 从湾内向湾外递增。表层 Chl a 浓度范围为 $0.67 \sim 19.62 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $(6.49 \pm 6.01) \mu\text{g/L}$, 从湾内向湾外递减(见图 4)。

表层无壳纤毛虫丰度范围为 $156 \sim 28\,468$ 个/L, 最大值出现在 18 号站, 一类体长约 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 的无壳纤毛虫占优势。无壳纤毛虫丰度在湾的西部和南部较高, 湾外较低。砂壳纤毛虫丰度范围为 $127 \sim 1\,760$ 个/L, 最大值出现在 6 号站, 主要是矮小拟铃虫。砂壳纤毛虫丰度在湾外较高, 湾中较低。纤毛虫总丰度范围为 $993 \sim 30\,038$ 个/L, 在湾的西部和南部

较高,湾外较低(见图 4)。

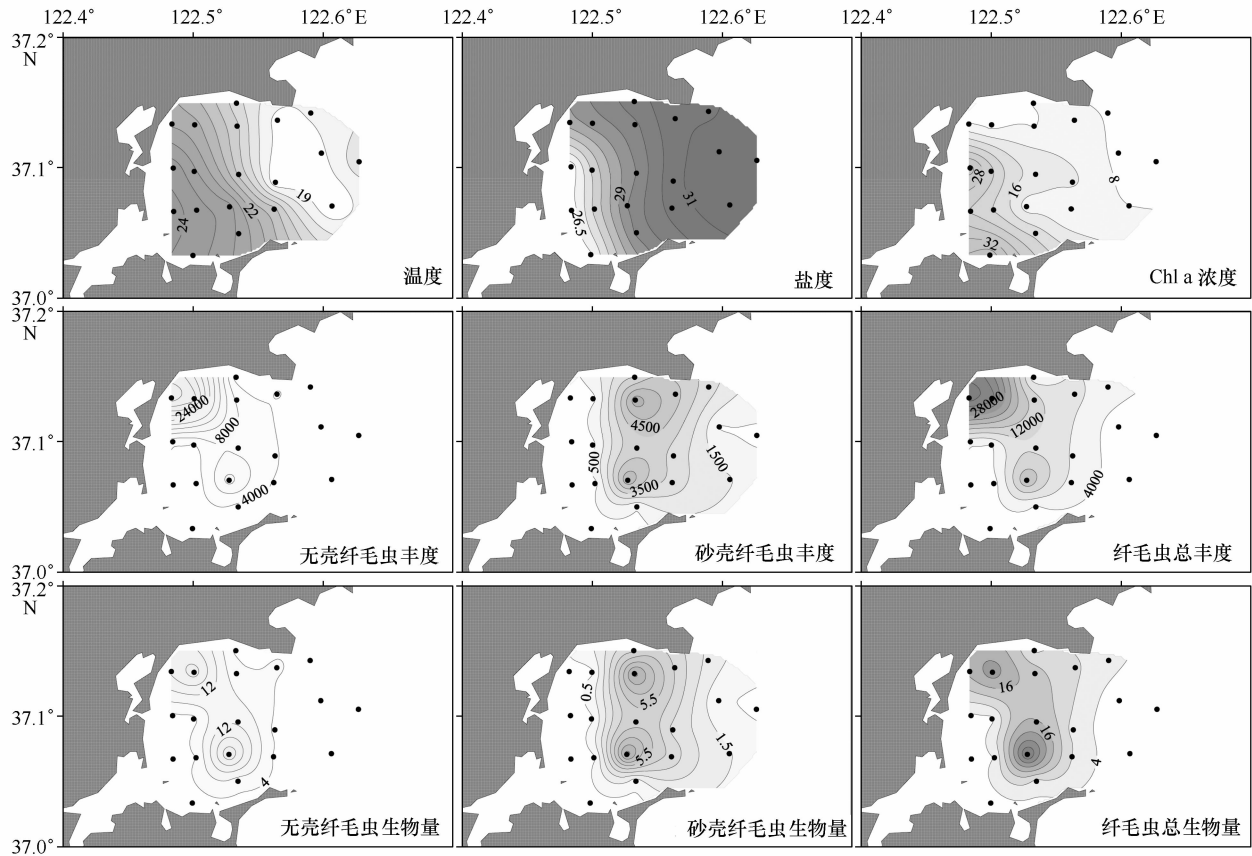


图 3 夏季表层温度($^{\circ}\text{C}$)、盐度、Chl a 浓度($\mu\text{g/L}$)、无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫、纤毛虫总丰度(个/L)及无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫总生物量($\mu\text{g/L}$)的水平分布

表层无壳纤毛虫生物量范围为 $0.05\sim 20.64 \mu\text{g/L}$, 砂壳纤毛虫生物量范围为 $0.06\sim 2.45 \mu\text{g/L}$, 纤毛虫总生物量范围为 $0.78\sim 20.70 \mu\text{g/L}$ 。各类纤毛虫生物量的分布模式与其丰度的分布模式大致相同。

3.1.4 冬季

表层温度范围为 $1.90\sim 5.60^{\circ}\text{C}$, 平均值为 $(3.76 \pm 1.22)^{\circ}\text{C}$, 从湾内向湾外递增。表层盐度范围为 $31.32\sim 31.57$, 平均值为 31.52 ± 0.06 , 从湾南部向北部递增。表层 Chl a 浓度范围为 $0.42\sim 2.88 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $(0.90 \pm 0.55) \mu\text{g/L}$, Chl a 浓度在湾外较高, 湾中及湾内较低(见图 5)。

表层无壳纤毛虫丰度范围为 $453\sim 10\,730$ 个/L, 最大值出现在 18 号站, 一类体长约 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 的无壳纤毛虫占优势。无壳纤毛虫丰度的高值区主要分布在湾内西部, 湾中及湾外较低。砂壳纤毛虫丰度范围为 $0\sim 163$ 个/L, 最大值出现在 6 号站, 主要是黏粘筒壳虫。砂壳纤毛虫主要分布在湾外, 湾中及湾内丰

度较低。纤毛虫总丰度范围为 $544\sim 10\,730$ 个/L, 高值区主要分布在湾内西部, 湾中及湾外丰度较低(见图 5)。

表层无壳纤毛虫生物量范围为 $0.35\sim 3.79 \mu\text{g/L}$, 砂壳纤毛虫生物量范围为 $0.00\sim 0.38 \mu\text{g/L}$, 纤毛虫总生物量范围为 $0.44\sim 3.79 \mu\text{g/L}$ 。各类纤毛虫生物量的分布模式与其丰度的分布模式大致相同。

总体来说, 桑沟湾表层温度夏季最高, 冬季最低; 表层盐度冬季最高, 夏季最低; 表层 Chl a 浓度夏季最高, 冬季最低。无壳纤毛虫主要分布在湾内; 砂壳纤毛虫丰度和生物量总体在盐度较高的海区较高, 呈现朝向外海分布的趋势。纤毛虫总丰度和总生物量的高值区春季主要出现在湾的西北, 夏季向湾中部迁移, 秋季主要出现在湾的西南, 冬季主要出现在湾的西部, 高值区随季节大致呈现顺时针迁移的趋势。

3.2 纤毛虫丰度和生物量的季节变化

4 个季节所有水层纤毛虫的丰度的变化特点见

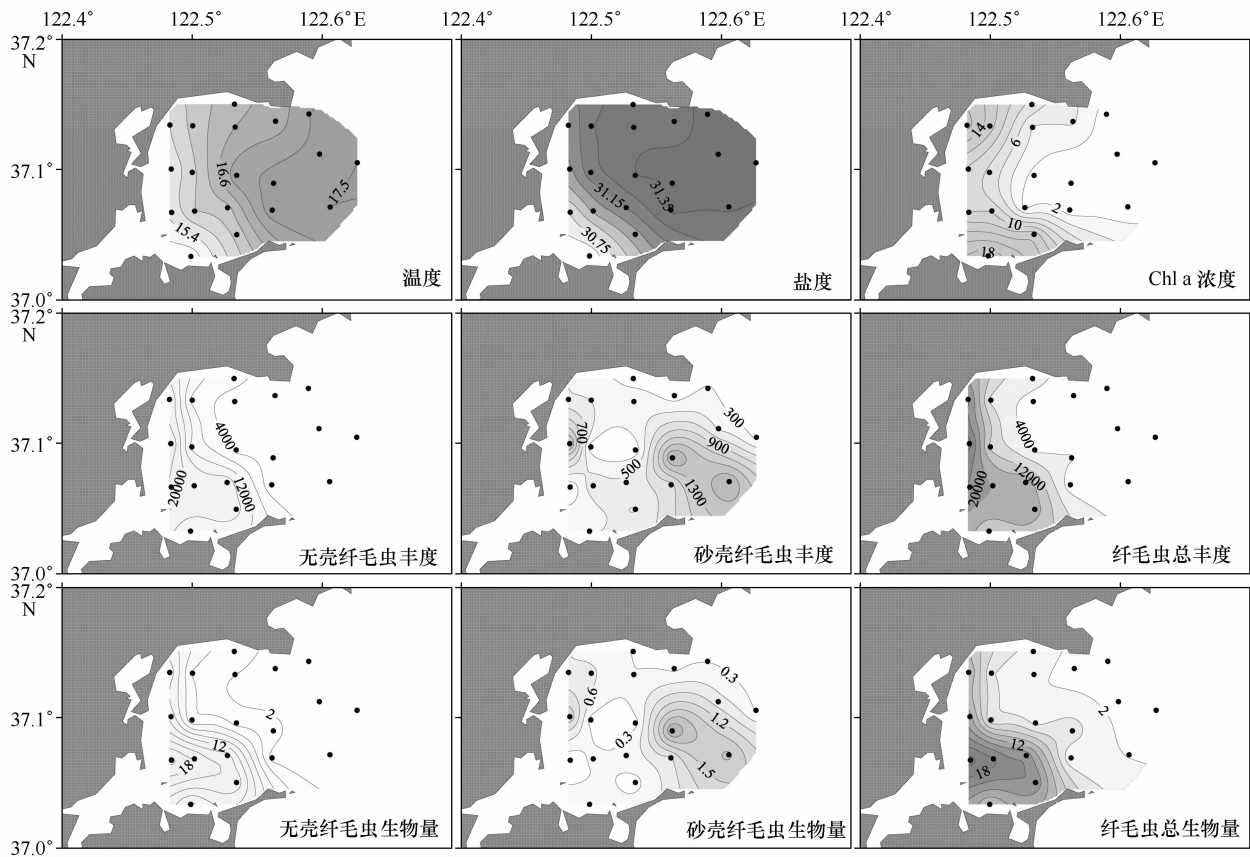


图4 秋季表层温度(°C)、盐度、Chl a浓度($\mu\text{g/L}$)、无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫、纤毛虫总丰度(个/L)及无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫总生物量($\mu\text{g/L}$)的水平分布

表1. 纤毛虫的平均丰度春、夏及秋季均较高,春季最高,冬季最低。湾内、湾中及湾外纤毛虫丰度出现峰值的时间不一致,湾内及湾中纤毛虫的丰度均在春季达到最高值,湾外则在夏季达到最高值(见图6a)。

4个季节所有水层纤毛虫的生物量的变化特点见表1。纤毛虫的平均生物量在夏季最高,冬季最低。湾内、湾中及湾外纤毛虫生物量出现峰值的时间不一致,湾内纤毛虫生物量的最高值出现在秋季,湾中及湾外则出现在夏季(见图6b)。

表1 4个季节纤毛虫丰度(个/L)和生物量($\mu\text{g/L}$)的变化特点

季节	无壳纤毛虫		砂壳纤毛虫		纤毛虫	
	丰度(平均/范围)	生物量(平均/范围)	丰度(平均/范围)	生物量(平均/范围)	丰度(平均/范围)	生物量(平均/范围)
春季	10 457/387~61 667	3.70/0.62~9.49	101/0~380	0.14/0.00~0.76	10 558/500~61 667	3.84/0.76~9.59
夏季	6 551/287~42 199	5.43/0.18~23.98	2 323/15~8 066	2.78/0.02~11.33	8 875/1 174~42 315	8.20/0.63~33.09
秋季	7 610/156~28 468	5.36/0.05~20.64	522/127~1760	0.57/0.06~2.45	8 132/408~30 038	5.93/0.35~20.70
冬季	2 771/453~10 730	1.20/0.35~3.79	52/0~163	0.08/0.00~0.38	2 822/544~10 730	1.28/0.44~3.79
总计	6 812/156~61 667	3.91/0.05~23.98	740/0~8 066	0.88/0.00~11.33	7552/408~61 667	4.79/0.35~33.09

4个季节,ACI在无壳纤毛虫丰度中均占绝对优势,占无壳纤毛虫丰度的比例平均为79.6%±

20.4%;ACII次之,占无壳纤毛虫丰度的比例平均为19.9%±20.2%;而ACIII占无壳纤毛虫丰度的比例

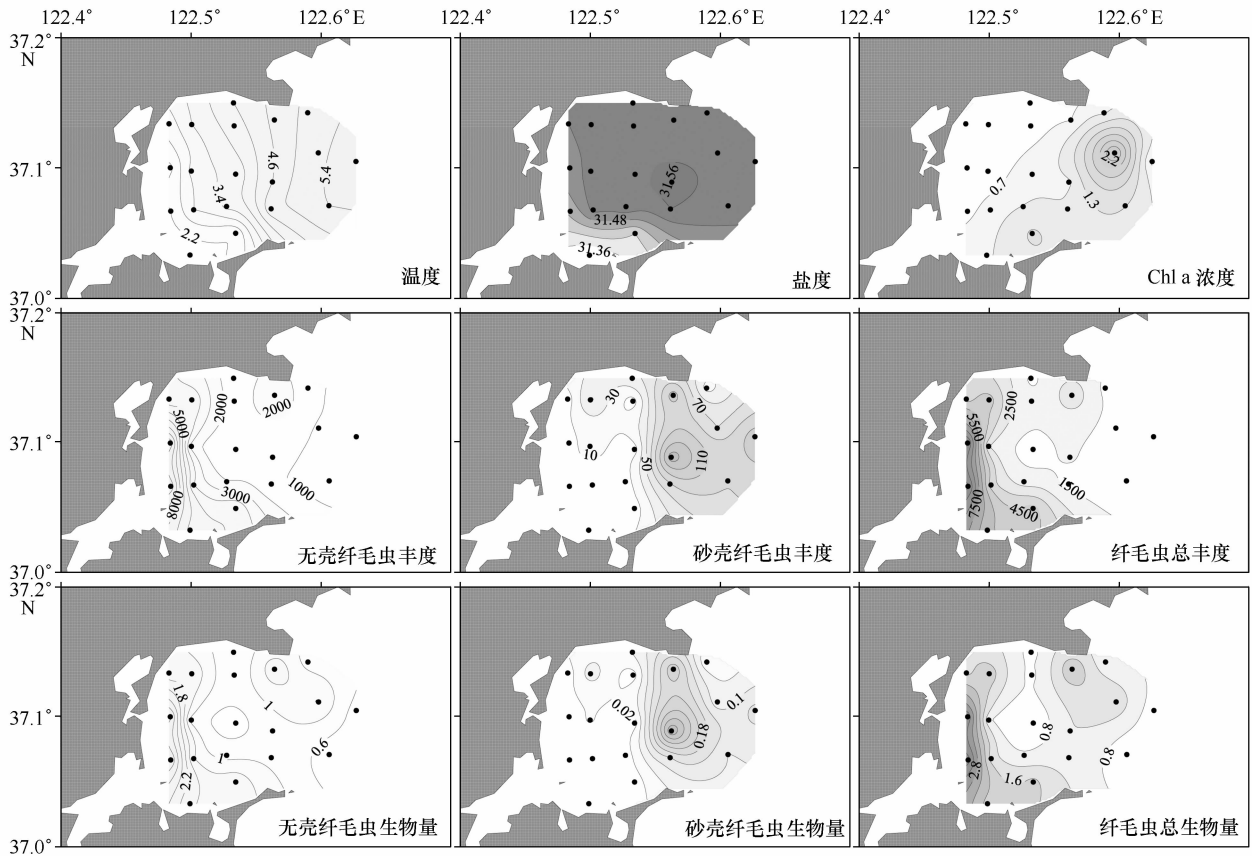


图 5 冬季表层温度(°C)、盐度、Chl a 浓度($\mu\text{g/L}$)、无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫、纤毛虫总丰度(个/L)及无壳纤毛虫、砂壳纤毛虫及纤毛虫总生物量($\mu\text{g/L}$)的水平分布

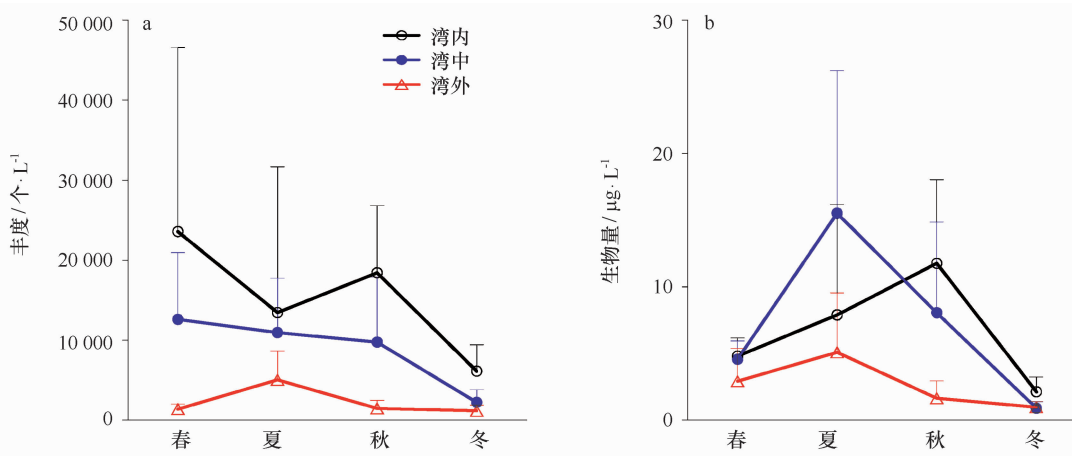


图 6 纤毛虫丰度(a)和生物量(b)的季节变化

最小,平均值只有 $0.5\% \pm 1.1\%$ 。无壳纤毛虫呈现夏季粒级较大,冬季粒级较小的趋势(见图 7a)。

砂壳纤毛虫壳的平均口径随季节也有一定的变化,夏季较大,为 $(26.9 \pm 2.3) \mu\text{m}$,秋季较小,为 $(23.7 \pm 2.4) \mu\text{m}$ (见图 7b)。

共鉴定出砂壳纤毛虫 8 属 27 种(见表 2),其中拟铃虫属(*Tintinnopsis*)种数最多(13 种)。砂壳纤毛虫的种数夏季最高(15 种),春季最低(5 种)。

砂壳纤毛虫在纤毛虫总丰度中的比例平均为 $16.3\% \pm 21.9\%$,最大值为 91.5%,出现在 10 月 4 号

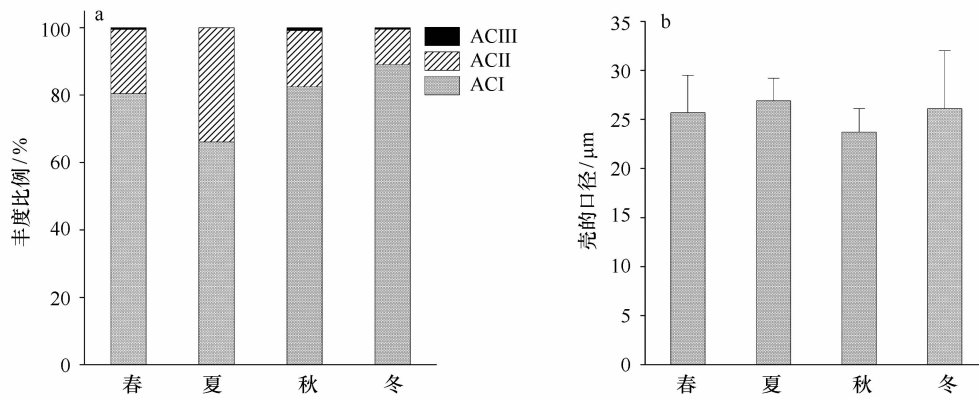


图7 3种粒级无壳纤毛虫丰度比例(a)和砂壳纤毛虫壳的平均口径(b)的季节变化

站的表层,其中,矮小拟铃虫丰度很大(1 508 个/L),占纤毛虫丰度的 81.7%。砂壳纤毛虫在纤毛虫总丰度中的比例夏季最高,为 36.3%±27.8%,冬季最低,仅为 4.9%±5.9%。

表2 砂壳纤毛虫种名录

种名	种名
尖底类瓮虫 <i>Amphorellopsis acuta</i>	尖底拟铃虫 <i>Tintinnopsis acuminata</i>
鲁西塔尼亚类铃虫 <i>Codonellopsis lusitanica</i>	厦门拟铃虫 <i>Tintinnopsis amoyensis</i>
运动类铃虫 <i>Codonellopsis mobilis</i>	波罗的拟铃虫 <i>Tintinnopsis baltica</i>
开孔真铃虫 <i>Eutintinnus apertus</i>	百乐拟铃虫 <i>Tintinnopsis beroidea</i>
薄壳真铃虫 <i>Eutintinnus tenuis</i>	巴西拟铃虫 <i>Tintinnopsis brasiliensis</i>
管状真铃虫 <i>Eutintinnus tubulosus</i>	木瓜拟铃虫 <i>Tintinnopsis japonica</i>
爱氏网纹虫 <i>Favella ehrenbergii</i>	科氏拟铃虫 <i>Tintinnopsis kofoidi</i>
巴拿马网纹虫 <i>Favella panamensis</i>	梅氏拟铃虫 <i>Tintinnopsis mayeri</i>
诺氏薄铃虫 <i>Leptotintinnus nordquisti</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>
白领细壳虫 <i>Stenosemella nivalis</i>	圆锥拟铃虫 <i>Tintinnopsis rapa</i>
小颌细壳虫 <i>Stenosemella parvicollis</i>	筒状拟铃虫 <i>Tintinnopsis tubulosoides</i>
黏粘筒壳虫 <i>Tintinnidium mucicola</i>	未定种拟铃虫 <i>Tintinnopsis</i> sp.
原始筒壳虫 <i>Tintinnidium primitivum</i>	

3.3 纤毛虫丰度与环境因子的相关性分析

无壳纤毛虫丰度、纤毛虫总丰度与温度没有明显的相关性,砂壳纤毛虫丰度与温度呈极显著的正相关关系($r=0.458, p<0.01$)。无壳纤毛虫丰度、砂壳纤毛虫丰度及纤毛虫总丰度与盐度及 Chl a 浓度均没有明显的相关性。无壳纤毛虫丰度及纤毛虫总丰度与微微型真核浮游生物丰度相关性不明显,砂壳纤毛虫丰度与微微型真核浮游生物丰度呈极显著正相关关系($r=0.333, p<0.01$)。无壳纤毛虫丰度及纤毛虫总丰度与蓝细菌丰度显著正相关($r=0.279, p<0.05; r=0.289, p<0.05$),砂壳纤毛虫丰度与蓝细菌丰度相关性不明显。无壳纤毛虫及砂壳纤毛虫丰度与异养细菌丰度显著正相关($r=0.280, p<0.05; r=0.279, p<0.05$),纤毛虫总丰度与异养细菌丰度呈极显著正相关关系($r=0.314, p<0.01$)(表3)。

4 讨论

与世界其他海区相比,桑沟湾纤毛虫丰度和生物量均处在已有文献报道的范围之内^[16]。与我国其他近岸海区相比,桑沟湾纤毛虫的平均丰度比胶州湾^[5]及獐子岛海区^[6]高。

表3 纤毛虫丰度与环境因子的相关性分析

	温度/°C	盐度	Chl a 浓度 /μg·L ⁻¹	微微型真核浮游生物丰度 /个·L ⁻¹	蓝细菌丰度 /个·L ⁻¹	异养细菌丰度 /个·L ⁻¹
无壳纤毛虫丰度/个·L ⁻¹	0.129	-0.098	0.008	0.157	0.279*	0.280*
砂壳纤毛虫丰度/个·L ⁻¹	0.458**	-0.081	0.179	0.333**	0.086	0.279*
纤毛虫总丰度/个·L ⁻¹	0.184	-0.108	0.030	0.197	0.289*	0.314**

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

4.1 水平分布

本研究中纤毛虫丰度一般在湾内较高,向湾外有递减的趋势。这与大多数温带近岸海区的分布规律一致。如胶州湾,纤毛虫丰度呈现湾内一湾口一湾外降低的趋势^[5];在南安普敦近岸水域,纤毛虫丰度在湾内比湾外高^[17]。这可能与饵料的可利用性有关^[18]。纤毛虫主要摄食浮游植物、细菌及鞭毛虫等,湾内受陆地影响较大,陆源物质的大量输入可能刺激浮游植物的大量生长,细菌丰度升高等,从而给纤毛虫提供较高水平的饵料。

浮游植物一般用 Chl a 浓度来表示,本文纤毛虫丰度的水平分布与 Chl a 浓度的分布不是很吻合,高值区的出现并不一致,相关性分析也表明纤毛虫的丰度与 Chl a 浓度没有明显的相关性。这说明本研究中 Chl a 浓度不能很好的指示纤毛虫的饵料水平,这是因为纤毛虫只选择性地摄食浮游植物的一部分,主要是 nano-和 pico-浮游植物^[19]。由于缺乏分粒级 Chl a 浓度的数据,本文无法用数据来验证。

本文微型真核浮游生物、蓝细菌及异养细菌丰度的水平分布同纤毛虫丰度的水平分布大体一致,也呈现湾内一湾口一湾外降低的趋势,这可能表明在桑沟湾纤毛虫与微型真核浮游生物、蓝细菌及异养细菌有紧密的摄食与被摄食的关系,微型真核浮游生物、蓝细菌及异养细菌可能是桑沟湾纤毛虫的重要饵料。

本研究中砂壳纤毛虫丰度在盐度较高的海区较高,呈现朝向外海的分布趋势。这与其他近岸海区的的结果一致。如在比斯开湾,砂壳纤毛虫丰度在靠海站位较大^[20-21]。在韩国近岸,砂壳纤毛虫的常见种在港口外侧丰度较高^[22]。

本文砂壳纤毛虫的丰度与盐度虽然没有明显的相关性,但 4 个季节砂壳纤毛虫的高值区均出现在盐度相对较高的海区,这说明盐度对砂壳纤毛虫的分布很重要。这与 Urrutxurtu^[20]的观点一致,他认为砂壳纤毛虫的分布受盐度限制,较低的盐度可能不利于砂壳纤毛虫的生存,砂壳纤毛虫存在朝向外海的分布趋势^[20]。

4.2 季节变化

本研究中纤毛虫丰度春季最高,其中湾内及湾中丰度较高($>5 \times 10^3$ 个/L),一类体长为 10~20 μm 的无壳纤毛虫在湾内及湾中占绝对优势,在纤毛虫总

丰度中的比例平均为 81.7%,是纤毛虫丰度在春季出现峰值的主要贡献者。

本文纤毛虫的丰度和生物量出现峰值的时间不一致,丰度在春季最高,生物量在夏季最高。生物量的大小与纤毛虫的群落组成有关,夏季无壳纤毛虫的粒级较大,且砂壳纤毛虫在纤毛虫总丰度中占的比例较高,这是纤毛虫生物量在夏季出现峰值的主要原因。

本研究中无壳纤毛虫粒级夏季较大,冬季较小。这与南安普敦近岸水域^[17]的研究结果一致,但与大多数海区的规律不同,一般在温带近岸海区,如獐子岛海区^[6]、缅甸湾^[15]、卡斯特拉湾^[23],纤毛虫粒级春季较大,夏季较小。Urrutxurtu 等^[21]认为纤毛虫的粒级结构可能与饵料的粒级结构及桡足类的选择性摄食有关。本文缺乏分粒级 Chl a 浓度及桡足类的数据,无法用数据来验证。

本研究中砂壳纤毛虫丰度的比例夏季最高,冬季最低,这与其他海区的的结果基本一致。一般情况下,在近岸海域,砂壳纤毛虫在夏季或秋季占优势^[24],如胶州湾^[5]、广岛湾^[25]及亚得里亚海北部^[26],砂壳纤毛虫丰度的比例均于夏秋达到最高值。Revelante 等^[26]认为在饵料浓度较高的条件下,砂壳纤毛虫相比无壳纤毛虫有更高的竞争力。桑沟湾夏季 Chl a 浓度较高,砂壳纤毛虫竞争力可能就较高,这可能是砂壳纤毛虫丰度比例在夏季较高的主要原因。

5 结论

(1)无壳纤毛虫主要分布在湾内,湾中及湾外的丰度和生物量相对较低;砂壳纤毛虫丰度和生物量总体在盐度较高的海区较高,呈现朝向外海分布的趋势。纤毛虫丰度和生物量的高值区春季主要出现在湾的西北,夏季向湾中部迁移,秋季主要出现在湾的西南,冬季主要出现在湾的西部,高值区随季节大致呈顺时针迁移的趋势。

(2)桑沟湾纤毛虫的丰度和生物量呈现较明显的季节变化。纤毛虫的丰度春季最高,冬季最低;生物量夏季最高,冬季最低。无壳纤毛虫夏季粒级较大,冬季粒级较小;砂壳纤毛虫壳的平均口径夏季较大,秋季较小。砂壳纤毛虫在纤毛虫丰度中的比例夏季最高,冬季最低。

参考文献:

- [1] Azam F, Fenchel T, Field J G, et al. The ecological role of water-column microbes in the sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1983, 10(3): 257-263.
- [2] Pierce R W, Turner J T. Plankton studies in Buzzards Bay, Massachusetts, USA: IV. Tintinnids, 1987-1988[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 112(3): 235-240.
- [3] 张武昌, 张翠霞, 肖天. 海洋浮游生态系统中小型浮游动物的生态功能[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 1195-1201.
- [4] 姜勇, 许恒龙, 朱明壮, 等. 胶州湾浮游原生生物时空分布特征——丰度周年变化及与环境因子间的关系[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(3): 17-23.
- [5] 于莹, 张武昌, 赵楠, 等. 胶州湾浮游纤毛虫丰度和生物量的周年变化[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 690-701.
- [6] Yu Y, Zhang W, Wang S, et al. Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33: 45-51.
- [7] 陈皓文. 桑沟湾表层水细菌与生态环境因子的关系[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(3): 29-33.
- [8] 陈皓文. 桑沟湾细菌的研究[J]. *海岸工程*, 2001, 20(1): 72-80.
- [9] 李超伦, 张永山, 孙松, 等. 桑沟湾浮游植物种类组成、数量分布及其季节变化[J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(4): 1-8.
- [10] 宋洪军, 李瑞香, 王宗灵, 等. 桑沟湾浮游植物多样性年际变化[J]. *海洋科学进展*, 2007, 25(3): 332-339.
- [11] 毛兴华, 杨小龙. 桑沟湾浮游动物生产力及其转换效率[J]. *海洋学报*, 1997, 19(4): 138-141.
- [12] Utermöhl H. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton Methodik[J]. *Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 1958, 9: 1-38.
- [13] 张武昌, 丰美萍, 于莹, 等. 砂壳纤毛虫图谱[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] Putt M, Stoecker D K. An experimentally determined carbon: volume ratio for marine "oligotrichous" ciliates from estuarine and coastal waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(6): 1097-1103.
- [15] Montagnes D J S, Lynn D H, Roff J C, 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[J]. *Marine Biology*, 1988, 99(1): 21-30.
- [16] 张武昌, 肖天, 王荣. 海洋微型浮游动物的丰度和生物量[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1893-1908.
- [17] Leakey R J G, Burkill P H, Sleigh M A. Planktonic ciliates in Southampton Water—abundance, biomass, production, and role in pelagic carbon flow[J]. *Marine Biology*, 1992, 114(1): 67-83.
- [18] Chen Y H, Yang Y F. Characteristics of the microzooplankton community in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(3): 435-442.
- [19] Dolan J R, Coats D W. Seasonal abundances of planktonic ciliates and microflagellates in mesohaline Chesapeake Bay waters[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1990, 31(2): 157-175.
- [20] Urrutxurtu I. Seasonal succession of tintinnids in the Nervion River estuary, Basque Country, Spain[J]. *Journal of Plankton Research*, 2004, 26(3): 307-314.
- [21] Urrutxurtu I, Orive E, De La Sota A. Seasonal dynamics of ciliated protozoa and their potential food in an eutrophic estuary (Bay of Biscay)[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(5/6): 1169-1182.
- [22] Kim Y-O, Chae J, Hong J S, et al. Comparing the distribution of ciliate plankton in inner and outer areas of a harbor divided by an artificial breakwater[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 64(1): 38-53.
- [23] Bojanić N, Šolić M, Krstulović N, et al. Temporal variability in abundance and biomass of ciliates and copepods in the eutrophicated part of Kaštela Bay (Middle Adriatic Sea)[J]. *Helgolander Marine Research*, 2005, 59(2): 107-120.
- [24] Leakey R J G, Fenton N, Clarke A. The annual cycle of planktonic ciliates in nearshore waters at Signy Island, Antarctica[J]. *Journal of Plankton Research*, 1994, 16(7): 841-856.
- [25] Kamiyama T, Tsujino M. Seasonal variation in the species composition of tintinnid ciliates in Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea of Japan[J]. *Journal of Plankton Research*, 1996, 18(12): 2313-2327.
- [26] Revelante N, Gilmartin M, Smodlaka N. The effects of Po River induced eutrophication on the distribution and community structure of ciliated protozoan and micrometazoan populations in the Northern Adriatic Sea[J]. *Journal of Plankton Research*, 1985, 7(4): 461-471.

Seasonal variation of planktonic ciliates in Sanggou Bay, Huanghai Sea

YU Ying^{1,3}, ZHANG Wuchang¹, JIANG Zengjie², ZHAO Yuan¹, FENG Meiping^{1,3}, LI Haibo^{1,3}, XIAO Tian¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We investigated the abundance and biomass of planktonic ciliates in Sanggou Bay, Huanghai Sea during 4 cruises between April 2011 and January 2012. The average abundance of ciliates was $(7\,552 \pm 10\,979)$ ind/L, ranging from 408 ind/L to 61667 ind/L. The average biomass of ciliates(C) was (4.79 ± 5.77) $\mu\text{g/L}$, ranging from 0.35 $\mu\text{g/L}$ to 33.09 $\mu\text{g/L}$. Abundance and biomass of aloricate ciliates decreased from the inner part to the outer part of Sanggou Bay. Tintinnids had a seaward distribution, tending to concentrate in the regions with higher salinity. High value area of total ciliate abundance and biomass moved clockwise seasonally. Ciliate abundance was highest in spring and lowest in winter. Ciliate biomass was highest in summer and lowest in winter. Larger aloricate ciliate species were more prevalent in summer, while smaller species increased their proportion of total abundance in winter. Average lorica oral diameter of tintinnids was larger in summer and smaller in autumn. Twenty seven tintinnid species were identified, 13 of which were in genus *Tintinnopsis*. Tintinnids occupied $16.3\% \pm 21.9\%$ of the total ciliate abundance, being highest in summer and lowest in winter. Ciliate abundance showed no correlation with temperature, salinity, Chl a concentration and picoeukaryotes abundance, however, it showed significant positive correlations with abundance of *Synechococcus* and heterotrophic bacteria.

Key words: planktonic ciliate; abundance; biomass; seasonal variation; Sanggou Bay