

Doi :10. 11840/j. issn. 1001-6392. 2013. 04. 008

烟台近海浮游植物的时空变化特征

王妍^{1,2}, 董志军¹, 刘东艳¹, 邸宝平^{1,2}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室 (烟台海岸带研究所)

山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 2010 年 4 月–2011 年 3 月对烟台近海 (四十里湾和套子湾) 浮游植物群落结构时空变化特征展开了为期 1 年的双月调查。在 28 个站位的调查研究中, 共发现浮游植物 78 属 187 种, 其中硅藻 50 属 103 种, 甲藻 21 属 73 种, 褐胞藻 5 属 7 种, 绿藻 1 属 3 种, 未定类 1 种。硅藻在数量与物种组成上为主要类群, 分别占浮游植物总量的 97.3 % 与 55.3 %, 其次为甲藻。浮游植物细胞丰度、多样性指数 (H') 和均匀度指数 (J) 呈现明显的季节特征: 细胞丰度周年变动范围为 $0.6 \times 10^4 \sim 156.7 \times 10^4$ cells/L, 最高峰出现在夏季 (8 月), 次高峰出现在春季 (3, 4 月); 多样性指数 (H') 的周年变动范围是 1.23~2.55, 均匀度指数 (J) 的周年变动范围是 0.28~0.68, 两者在夏初 (6 月) 和秋季 (10 月) 较高。浮游植物优势种在夏季以硅藻–甲藻–褐胞藻联合为主, 其余调查季节主要以硅藻为主。应用聚类分析分析了 6 个航次浮游植物群落结构的平面分布格局。四十里湾和套子湾细胞丰度在整个调查期间无显著差异, 而在秋季 (10 月) 和冬季 (12 月) 存在显著差异。春初 (3 月), 四十里湾与套子湾浮游植物群落结构差异显著, 其他调查季节两湾浮游植物并无显著差异。

关键词: 四十里湾; 套子湾; 浮游植物; 聚类分析

中图分类号: Q178.53

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2013)04-0408-13

Variation of spatial and temporal distributions of phytoplankton community in coastal waters of Yantai

WANG Yan^{1,2}, DONG Zhi-jun¹, LIU Dong-yan¹, DI Bao-ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, YICCAS, Yantai

264003, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The research on the variation of temporal and spatial distributions of phytoplankton community in the coastal waters of Yantai (Sishili Bay and Taozi Bay) was bimonthly conducted during April 2010 to March 2011 in two bays. A total of 187 phytoplankton species belonging to 78 genera was identified from the samples of 28 sites. Among them, 50 genera and 103 species were Bacillariophyta; 21 genera and 73 species were Dinophyta; 5 genera and 7 species were Heterokontophyta; 1 genera and 3 species were Chlorophyta; there was one incertae sedis. Diatoms dominated in the abundance (97.3 %) and species richness (55.3 %), followed by Dinoflagellates. There existed significant temporal variations in terms of cell abundance, Shannon-Weaver index (H') and evenness (J): cell abundance ranged from 0.6×10^4 cells/L to 156.7×10^4 cells/L with a highest peak in summer (August) and a higher peak in spring (March and April); Shannon-Weaver index (H') ranging from 1.23 to 2.55, and evenness (J) ranging from 0.28 to 0.68, were higher in June and October than those in other months. The phytoplankton community was characterized by Bacillariophyta species coexisting with Dinophyta and Heterokontophyta species in summer, and the phytoplankton community was mainly made of Bacillariophyta in other investigation seasons. The results of Cluster analysis were used to analyze the spatial distribution of phytoplankton community in 6 cruises. The cell abundance difference between Sishili Bay and Taozi Bay was not significant in the whole survey period, but it was

收稿日期: 2012-05-07; 修订日期: 2013-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(40976097); 中国科学院知识创新工程(KZCX2-YW-Q07-04); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05130703)。

作者简介: 王妍 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋浮游植物生态学研究。电子邮箱: ywangyic@126.com。

通讯作者: 刘东艳, 博士, 研究员。电子邮箱: dyliu@yic.ac.cn。

<http://hytb.nmdis.gov.cn>

significant in autumn (October) and winter (December). In early spring (March), the phytoplankton community structure was significantly different between Sishili Bay and Taozi Bay, while it was not significantly different in other investigation seasons.

Keywords : Sishili Bay; Taozi Bay; phytoplankton; cluster analysis

浮游植物是海洋中重要的初级生产者,其种类组成与数量变动直接影响着整个海洋食物网中的物质循环和能量传递。近年来,越来越多的研究表明,受近海环境变化的胁迫,浮游植物群落结构正处于不稳定状(王云龙等,2005;孙翠慈等,2006;戴明等,2007),赤潮频发。因此,定期观测浮游植物的群落结构特征对于了解海湾的生态环境状态具有重要意义。

烟台近海曾经是我国烟威渔场的主要海区,目前已成为北方的重要海水养殖基地。近年来,高密度养殖和频繁的人类活动导致该海域环境质量下降,生态系统出现了不稳定性。春夏季有毒有害赤潮爆发已成为常态,如:1998年8-9月在四十里湾发生了血红哈卡藻赤潮(吴玉霖等,2001),2004年5月在四十里湾发生夜光藻赤潮(迟守峰,2008),2009年8月在四十里湾发生了赤潮异弯藻赤潮(山东省海洋与渔业厅,2010),对当地海洋生态环境及海洋渔业等造成了极大的危害。然而,烟台近海浮游植物群落结构的研究主要集中于港口(李伟才等,2006)、垃圾倾倒区(纪灵等,2003;刘旭等,2010)等局部区域(中国海湾志编纂委员会,1991)或个别月份(宁璇璇等,2011),对于该海域全面综合调查的研究资料积累却不多,仅蒋金杰等对烟台四十里湾的浮游植物群落的变化开展了研究(蒋金杰等,2011)。本研究于2010年4月-2011年3月期间,在烟台近海包括四十里湾和套子湾28个站位开展了为期一年的双月调查,对浮游植物的群落结构、季节变化与物种演替特征进行了详细研究,以期深入了解浮游植物对环境的响应机制以及建立该海域健康生态环境的管理提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 研究站位及采样方法

烟台位于山东半岛北部,是北黄海沿岸的重要组成部分,具有典型温带季节特征。烟台近岸海域

夏季水温通常为 $23.3^{\circ}\text{C}\sim 27.4^{\circ}\text{C}$,冬季水温为 $2.5^{\circ}\text{C}\sim 3.5^{\circ}\text{C}$,水深多为 $8\sim 10\text{m}$,平均水深约 12m 。烟台近岸海域主要由套子湾和四十里湾两个海湾组成,以芝罘岛为分界线,东到养马岛,西到龙洞咀。沿岸多条中、小型河流入海,其中大沽夹河为最大的河流。本研究分别于2010年4月、6月、8月、10月、12月和2011年3月对烟台近海共28个站位进行了6个航次的生态环境综合调查(图1),对浮游植物的群落特征进行了综合分析。

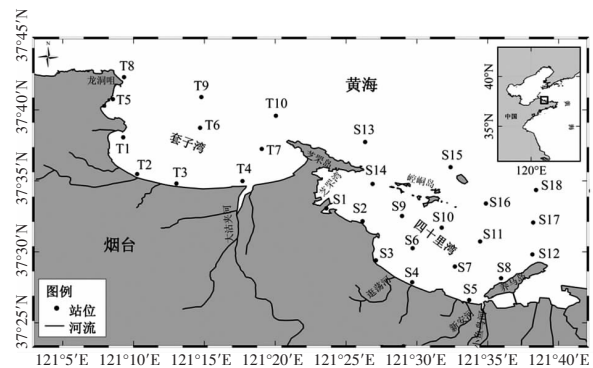


图1 烟台近海采样站位

调查期间,在28个站位利用Niskin采水器采集500 mL表层海水,加入最终浓度为3%~5%福尔马林溶液固定后,带回实验室进行浮游植物的种类组成和数量分析。浮游植物鉴定和计数在Olympus IX 51型倒置光学显微镜下进行。浮游植物计数采用国际上通用的Utermöhl方法(Utermöhl, 1958)。样品充分摇匀后取出10 mL放入Utermöhl计数框,静置24 h,使浮游植物充分沉淀,用于鉴定和计数。浮游植物种类的鉴定参考书为《中国海藻志》、《海藻学概论》、《海藻学》、《中国近海赤潮生物图谱》、《中国海域常见浮游硅藻图谱》、《赤潮生物》(郭玉洁等,2003;李伟新等,1982;钱树本等,2005;郭皓,2004;杨世民等,2006;林永水等,2001)等。

另将600 mL表层海水用 $0.45\mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤后,用德国Bran+Luebbe AA3营养盐自动分析仪测定其营养盐的浓度,包括无机氮($\text{DIN}=\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$)、活性磷酸盐(SRP)、活

性硅酸盐 (DRSi)。

1.2 数据处理方法

浮游植物的优势种以优势度指数 ($Y > 0.02$) 判断, 其计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$

物种多样性指数采用香农-威弗指数 (H' , Shannon-Wiener index)(Shannon et al, 1949), 其计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \times \log_2 p_i$$

物种均匀度指数 (J) (Pielou, 1969), 其计算公式为:

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

式中, n_i 为第 i 种的总个体数, N 为所有物种的总个体数, f_i 为第 i 种在各站位出现的频率, S 为样品中总种类数, p_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个数的比值。

利用 SPSS 17.0 软件包中的 T 检验分析四十里湾与套子湾浮游植物细胞丰度的差异性。利用 PRIMER 6.0 进行聚类分析 (Cluster analysis), 对群落结构空间分布进行研究。应用单因子相似性分析 ANOSIM (Analysis of Similarities) 检验四十里湾和套子湾种类组成的差异显著性, 该分析给出一个统计量 $global R$, 其值一般介于 0-1: 当 $R=0$ 时, 表示群落结构完全相同; 当 $0 < R < 0.5$ 时, 表示群落结构差异不明显; 当 $0.5 < R < 0.75$ 时, 表示群落之间虽有重叠但能清楚分开; 当 $0.75 < R < 1$ 时, 表示群落之间有显著差异; 当 $R=1$ 时, 表示群落完全不同。利用相似性百分比分析 SIMPER (Similarity Percentages) 找出造成四十里湾和套子湾浮游植物差异的特征种类 (Clarke, 1993; Clarke et al, 2006)。

2 结果与讨论

2.1 营养盐季节性特征

烟台近海 DIN 全年平均值是 $12.0 \mu\text{M}$, 变动范围是 $5.3 \sim 17.9 \mu\text{M}$, 10月浓度最高, 8月最低, 秋季 (10月)、冬季 (12月) 和初春 (3月) DIN 浓度较高。SRP 的全年平均值是 $0.9 \mu\text{M}$, 浓度范围

是 $0.1 \sim 2.5 \mu\text{M}$, 秋季和冬季磷酸盐水平较高。DR-Si 浓度全年平均值是 $2.0 \mu\text{M}$, 季节变化趋势较平稳, 变动范围是 $1.0 \sim 2.7 \mu\text{M}$, 8月 DRSi 浓度最高, 6月最低。烟台近海各月受到不同程度的营养盐硅限制: 6月、10月和3月超过 $2/3$ 的站位处于硅限制中; 8月约 $1/2$ 的站位受到硅限制; 4月、12月约有 $1/3$ 的站位受到硅限制。

2.2 浮游植物种类组成特征

调查期间, 共鉴定记录浮游植物 78 属 187 种, 其中硅藻 50 属 103 种, 甲藻 21 属 73 种, 褐胞藻 5 属 7 种, 绿藻 1 属 3 种, 还包括一个未定类 (三深裂醉藻, *Ebria tripartite*) (表 1, 见附录)。在硅藻门中角毛藻属 (*Chaetoceros*) 的种类最多, 共有 12 种; 甲藻门中原多甲藻属 (*Protoperidinium*) 的种类最多, 为 25 种。浮游植物生态类型主要以温带近岸种和广布性种为主。

烟台近海物种丰富度、多样性指数和均匀度指数呈现出明显的季节变化与团块分布特征 (图 2, 3)。夏季 (8月) 物种丰富度最高, 为 106 种; 冬季 (12月) 最低, 为 47 种。夏初 (6月) 和秋季 (10月) 的物种多样性指数和均匀度指数较高, 夏初 (6月) 两种指数平均值分别为 2.33、0.64, 秋季 (10月) 分别为 2.55、0.68; 夏末 (8月) 多样性指数和均匀度指数最低, 分别为 1.23、0.28。同时, 烟台近海的多样性指数和均匀度指数随季节变化表现出较高的空间分布差异。春季 (3, 4月), 套子湾多样性指数和均匀度指数斑块分布特征显著, 呈现近岸向外逐渐递增的趋势, 而四十里湾的多样性指数和均匀度指数表现为中部低, 沿岸和湾外高的特征; 夏季 (8月), 四十里湾多样性指数和均匀度指数湾内、外特征分布显著, 湾外明显高于湾内, 而套子湾湾内、外差异却不明显; 冬季 (12月), 套子湾多样性指数和均匀度指数分布特征是东部高于西部, 而四十里湾的低值区位于湾东部。

2.3 浮游植物生物量的时空变化特征

2.3.1 周年变化特征

与大多数温带海域的研究结果一致 (俞建奎等, 1993; 李广楼等, 2006; 杨世民等, 2009; 李超伦等, 2010), 烟台近海浮游植物的细胞丰度具有明显的季节变化特征, 周年变化模式为双峰型 (图 4)。夏末 (8月) 细胞丰度达到最高峰, 细胞

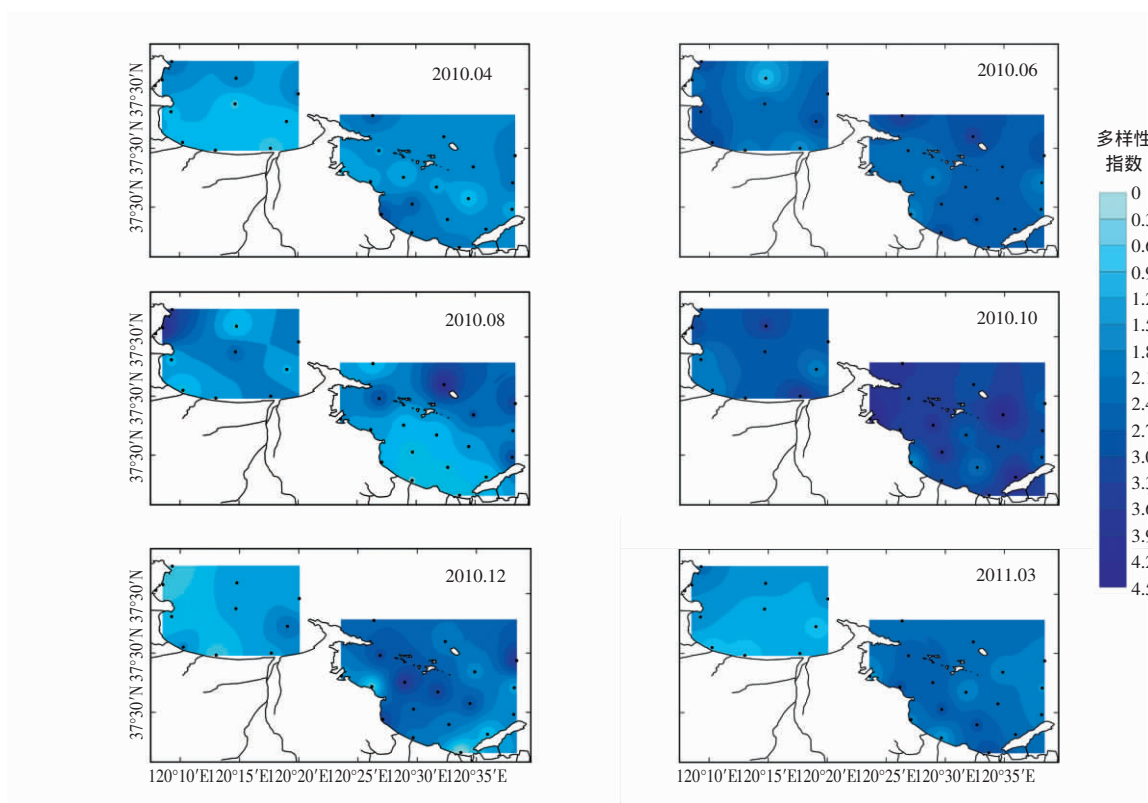


图 2 浮游植物多样性指数 (H) 的周年变化和平面分布特征

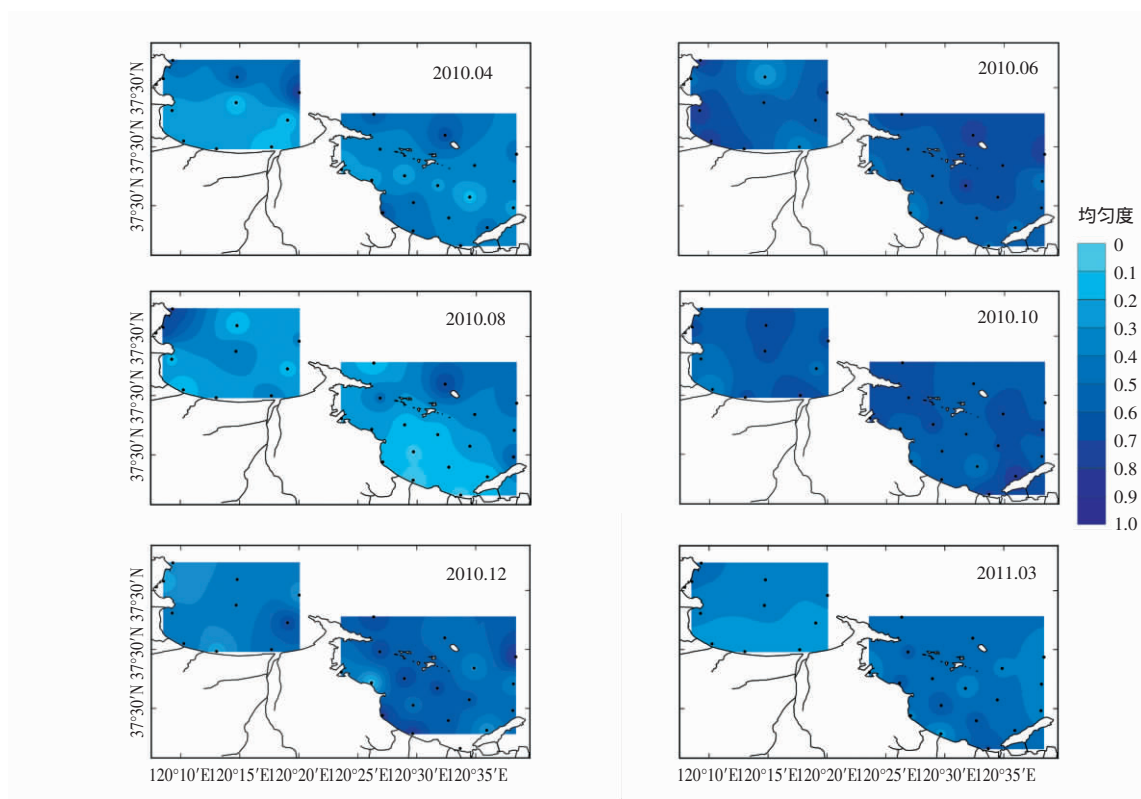


图 3 浮游植物均匀度指数 (J) 的周年变化和平面分布特征

丰度在各站位的平均值是 156.7×10^4 cells/L；春季（3, 4 月）为次高峰，细胞丰度在各站位的平均值为 25.6×10^4 cells/L；冬季（12 月）细胞丰度最低，各站位数量平均值仅为 0.6×10^4 cells/L。相关性分析表明（表 2），4 月浮游植物细胞丰度与 SST、SRP 及 DRSi 的组合相关性最大且显著，这可能与 4 月所受到的硅磷限制有关；6 月与 DIN 相关关系显著，6 月烟台近海 3 种营养盐的浓度都极低，浮游植物与 DIN 显著相关可能说明了 6 月溶解性无机氮对细胞丰度的影响程度高于活性磷酸盐和活性硅酸盐；8 月 DIN、SRP 及 N:P 的环境变量组合相关性显著，6 月低氮磷的状态延续到 8 月，但活性硅酸盐得到了及时的补充，这可能是细胞丰度与 DIN 和 SRP 显著相关的原因。

表 2 烟台近海浮游植物丰度与环境因子间的相关性

		2010 年 4 月		2010 年 6 月		2010 年 8 月	
单因子	影响因子	相关系数	影响因子	相关系数	影响因子	相关系数	
	SST	0.29	DIN	0.41	SRP	0.21	
	SRP	0.28	SST	0.30	DIN	0.20	
	DRSi	0.23	SRP	0.30	N:P	0.18	
	Si:P	0.22	Si:P	0.28	SST	0.18	
	N:P	0.19	SSS	0.26	SSS	0.17	
	SSS	0.18	N:Si	0.16	DRSi	0.01	
	N:Si	0.15	N:P	0.04	Si:P	-0.02	
	DIN	0.11	DRSi	-0.01	N:Si	-0.06	
	最佳组合	SST, SRP, DRSi	0.43	DIN	0.41	DIN, SRP, N:P	0.23

浮游植物群落结构组成亦呈现出明显的季节特征（图 5, 6）。夏季 6 月份出现硅藻-甲藻-褐胞藻的联合优势特征，在其他调查季节硅藻占据绝对优势，细胞丰度占到总丰度的 80.6%~99.8%（图 5）。此外，浮游植物优势物种的组成具有明显的季节演替现象（图 6a-f）。冬季（12 月）浮游植物的优势种单一，主要以具槽帕拉藻（*Paralia sulcata*）为主；春季（3, 4 月）优势种以广温性的海链藻（*Thalassiosira* sp.）、具槽帕拉藻（*P. sulcata*）和角毛藻（*Chaetoceros* sp.）为主；夏初（6 月）优势度较低，形成以锥状斯克里斯普藻（*Scrippsiella trochoidea*）、裸甲藻（*Gymnodinium* sp.）、赤潮异弯藻（*Heterosigma akashiwo*）、具槽帕拉藻（*P. sulcata*）和双刺原多甲藻（*Protoperidinium bipes*）为主的硅

藻-甲藻-褐胞藻联合优势；夏末（8 月）和秋季（10 月）浮游植物群落结构延续了夏初的特征，出现硅藻-褐胞藻联合优势，包括柔弱拟菱形藻（*Pseudo-nitzschia delicatissima*）、具槽帕拉藻（*P. sulcata*）、赤潮异弯藻（*H. akashiwo*）、尖刺拟菱形藻（*Pseudo-nitzschia pungens*）、海链藻（*Thalassiosira* sp.）、圆筛藻（*Coscinodiscus* sp.）、中肋骨条藻（*Skeletonema costatum*）。

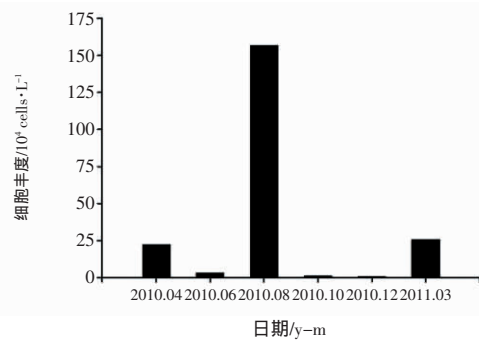


图 4 浮游植物细胞丰度的周年变化

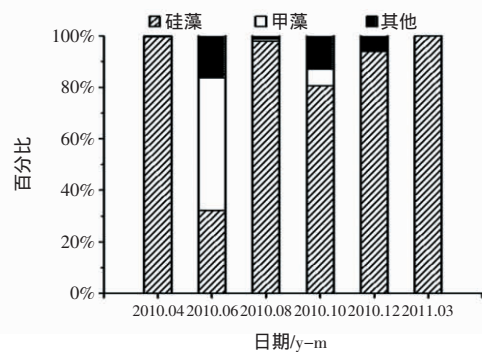


图 5 浮游植物物种组成周年变化

2.3.2 平面分布特征

研究表明，烟台近海浮游植物生物量的平面分布特征随着季节的变化而呈现出不同的特征，在浮游植物生物量出现高峰的春季（3, 4 月）和夏季（8 月），湾内、外平面分布特征显著，而在生物量低峰期的秋季（10 月）和冬季（12 月），湾内、外平面分布特征不显著（图 7）。以往的研究表明，在近岸海湾内，浮游植物的平面分布可以显著受到海湾流场与营养盐浓度分布的影响，其中风海流在近岸表层流场的形成中具有重要作用（管秉贤，1962；张瑞安等，1990；孙洪亮等，2001；李占海等，2003；万修全等，2004）。烟台近海的温带气候特征具有夏季多东南风、冬季多西北风的特点，而四十里湾与套子湾的位置春季（3, 4 月）

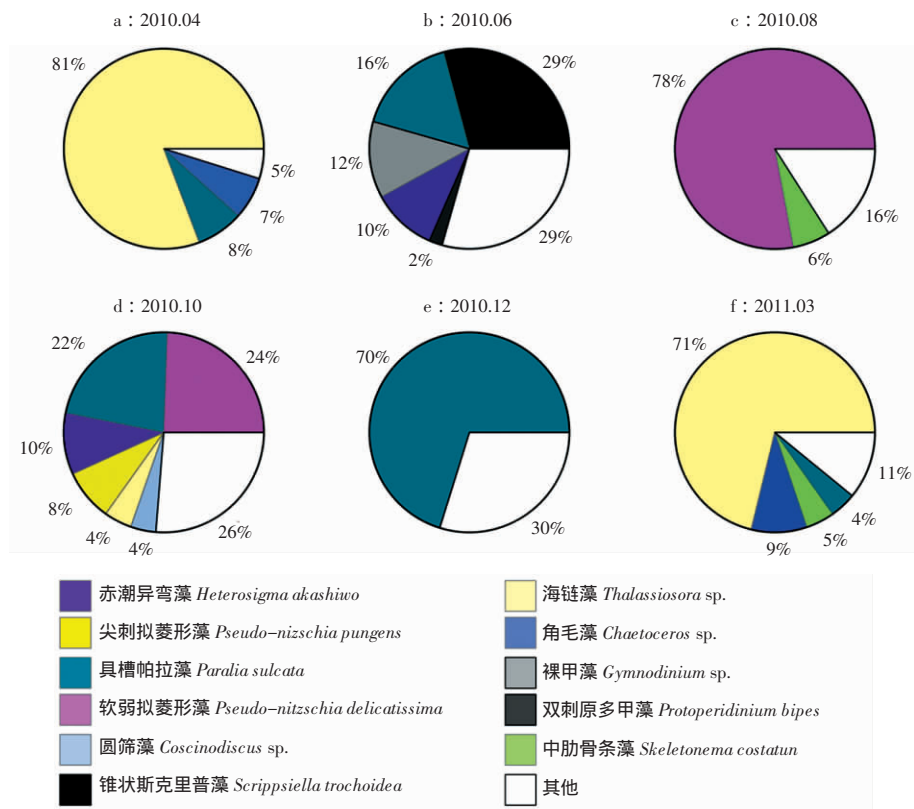


图 6 烟台近海优势种组成的周年变化

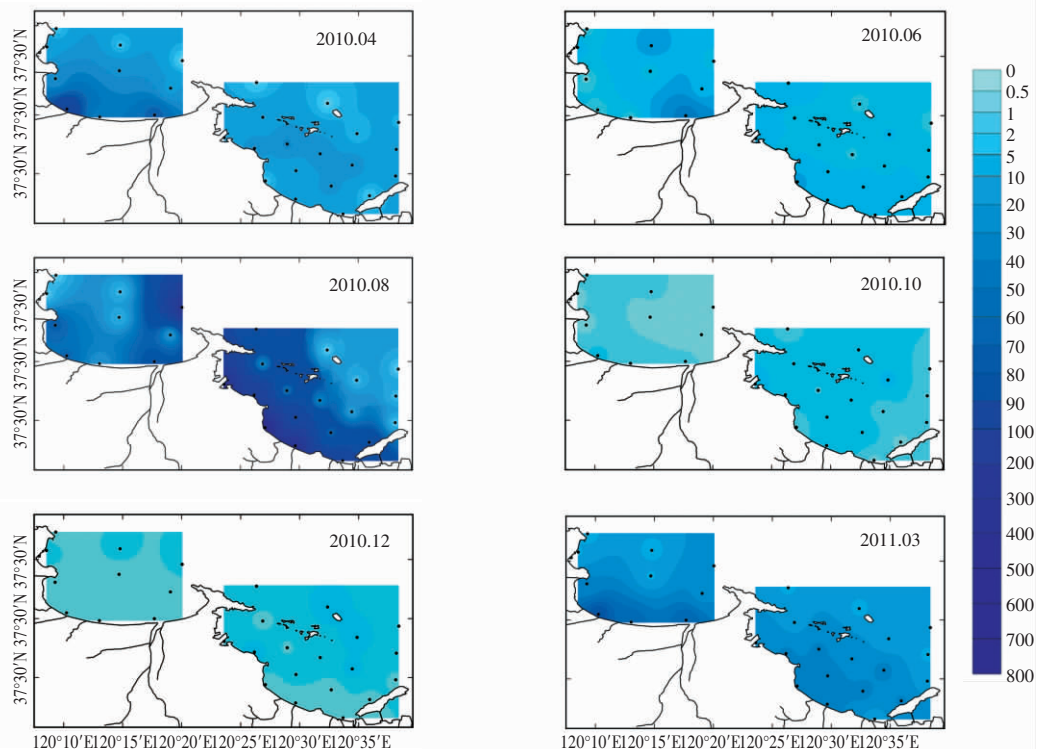


图 7 浮游植物细胞丰度的周年变化和平面分布特征

受西北风对流场向岸堆积影响，并且春季冰雪、河流融化后，陆源营养盐大量注入近岸，故浮游植物生物量的高值区多出现在湾内。在夏季，降雨增多，河流径流量增大，陆源营养盐易随雨水及径流流入湾内，使得浮游植物生物量高值区多出现在湾内。

此外，四十里湾和套子湾的浮游植物细胞丰度的平面分布特征也存在季节差异，如 6 月和 8 月，在套子湾，浮游植物生物量出现湾东侧高于湾西侧的平面分布特征，而四十里湾的这一特征并不显著，浮游植物生物量高值区仍在湾内侧边缘（图 7）。这可能是由四十里湾和套子湾地理条件及人类活动强度差异所造成的。套子湾为开阔式海湾，夏季东南风形成的风海流影响营养盐浓度的分布，进而影响浮游植物的平面分布；而四十里湾为半封闭海湾，由于崆峒岛和芝罘岛的阻隔作用，导致湾内、外水交换不如套子湾通畅，造成营养盐易在湾内堆积的动力学特征，进而影响浮游植物的平面特征。另外，四十里湾与套子湾受人类活动影响的强度也有所不同，四十里湾受到港运、旅游、贝类养殖和污水排放的多重人类活动影响（李伟才等，

2006；中国海湾志编纂委员会，1991；赵卫红等，2000），而套子湾则主要受旅游和海带养殖的影响（刘风非，2008），两湾的污染程度不同，这也可能是造成两湾浮游植物空间分布特征不同的原因。

2.4 四十里湾和套子湾的浮游植物群落比较

四十里湾和套子湾各调查月及整个调查期的细胞丰度的 T 检验结果表明，秋季（10 月）和冬季（12 月），四十里湾与套子湾细胞丰度存在显著差异 ($P < 0.05$)，其他季节差异不显著，整个调查期间，两湾生物量并不存在显著差异 ($P = 0.44 > 0.05$)。

此外，四十里湾和套子湾浮游植物的群落结构在各季节均存在差异。例如，2010 年 10 月，四十里湾的优势种是柔弱拟菱形藻 (*P. delicatissima*) (29%)、具槽帕拉藻 (*P. sulcata*) (21%) 和尖刺拟菱形藻 (*P. pungens*) (11%)，而套子湾的优势种为具槽帕拉藻 (*P. sulcata*) (28%)、赤潮异弯藻 (*H. akashiwo*) (26%) 和海链藻 (*Thalassiosira* sp) (10%)。经聚类分析，28 个调查站位的浮游植物群落按 40%~60% 的群落相似性划分为 4~7 个聚类组（图 8）。浮游植物物种组成存在明显的团块分布特征，除秋季（10 月）外，其他季节套子湾和

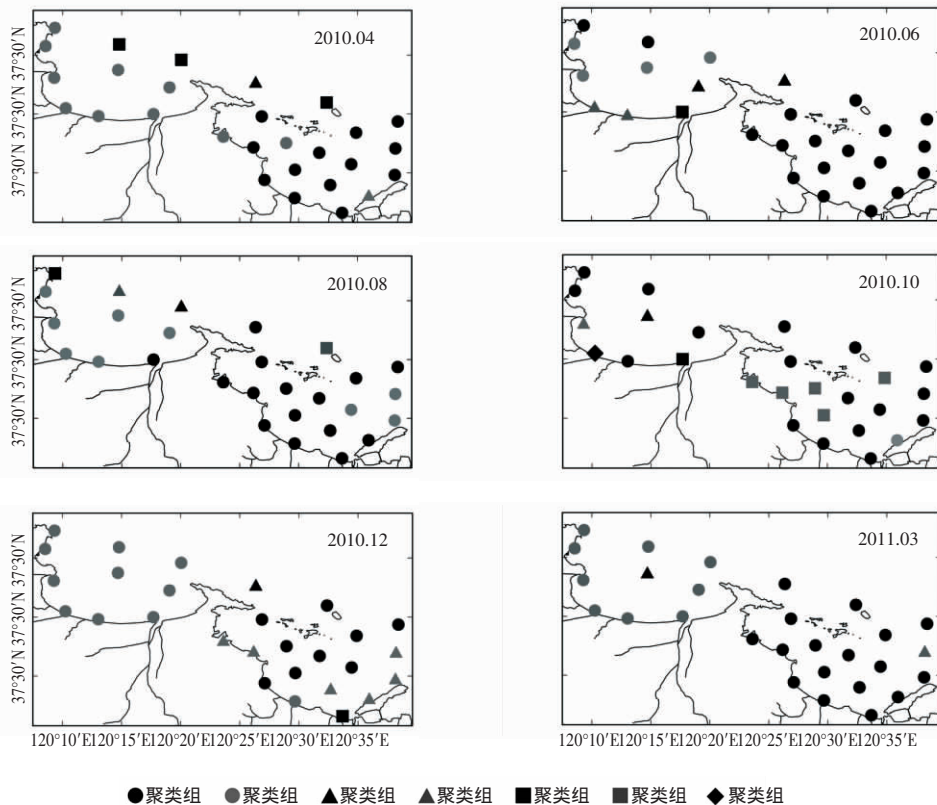


图 8 浮游植物群落结构聚类分析结果

四十里湾大部分站位处于不同聚类组。为了验证两湾浮游植物群落结构差异的显著性,将四十里湾和套子湾各月浮游植物数据进行 ANOSIM 检验,并利用 SIMPER 分析找出对四十里湾和套子湾浮游植物群落结构差异性重要贡献的物种。结果表明:早春(3月)四十里湾和套子湾浮游植物群落结构具有显著差异(global $R=0.867$, $P=0.1\% < 0.05$),两湾的造成差异的物种有海链藻(*Thalassiosira* sp.)、角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、诺氏海链藻(*Thalassiosira nordenskioeldii*)等;夏初(6月)两湾浮游植物群落虽存在重叠但可以清楚分开(global $R=0.618$, $P=0.1\% < 0.05$);其他月份两湾浮游植物差异不明显(global $R < 0.5$)。

3 结论

根据对烟台近海 2010 年 4 月到 2011 年 3 月 6 个航次 28 个站位浮游植物群落特征的调查结果分析发现:

(1) 烟台近海浮游植物群落结构呈现出明显的温带海域区系特征:组成主要以硅藻和甲藻为主,其中硅藻无论在种类还是细胞数量上都占绝对优势。浮游植物生态类型以温带近岸种和广布种为主。多样性指数(H')和均匀度指数(J)呈现明显的季节变化,6月和10月最高,8月最低。生物量季节变化呈双峰型,最高峰出现在夏季(8月),次高峰出现在春季(3,4月)。优势种周年演替明显,夏季(6月),浮游植物主要以甲藻-褐胞藻-硅藻联合占优为主,在其他调查季节,硅藻占据绝对优势地位。

(2) 烟台近海浮游植物空间分布特征随着季节变化呈现出不同的特征。春季和夏季,湾外细胞丰度普遍低于湾内;秋季和冬季,湾内、外平面分布特征不显著。海湾流场与营养盐浓度分布可能是造成湾内和湾外差异的主要原因。相关性分析表明,4月,烟台近海 SST、SRP 和 DRSi 组合最能解释浮游植物的分布特征;6月, DIN 与细胞丰度显著相关;8月, DIN、SRP、N:P 比的组合是影响浮游植物丰度的最佳解释变量组合。四十里湾与套子湾浮游植物细胞丰度的空间分布特征也有所差异,地理条件和人类活动强度的不同是造成两湾细胞丰

度空间特征差异的主要原因。秋季(10月)和冬季(12月)四十里湾与套子湾细胞丰度差异显著,但整个调查期间两湾细胞丰度差异不显著。春初(3月),四十里湾与套子湾浮游植物群落结构差异显著,其他调查季节两湾浮游植物并无显著差异。

参 考 文 献

- Clarke K R, 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18 (1): 117-143.
- Clarke K R, Gorley R N, 2006. PRIMER v6: User Manual/Tutorial. Plymouth, PRIMER-E Ltd.
- Pielou E C, 1969. An introduction to mathematical ecology. New York: Wiley-Interscience.
- Shannon C, Weaver W, 1949. The mathematical theory of communication. Chicago: University of Illinois.
- Utermöhl H, 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton Methodik. *Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, (9): 1-38.
- 迟守峰, 2008. 烟台市四十里湾海域赤潮成因分析及预防对策. *齐鲁渔业*, 25 (9): 55-57.
- 戴明, 李纯厚, 张汉华, 等, 2007. 海南岛以南海域浮游植物群落特征研究. *生物多样性*, 15 (1): 23-30.
- 管秉贤, 1962. 有关我国近海海流研究的若干问题. *海洋与湖沼*, 4 (3-4): 121-141.
- 郭皓, 2004. 中国近海赤潮生物图谱. 北京: 海洋出版社.
- 郭玉洁, 钱树本, 2003. 中国海藻志. 北京: 科学出版社.
- 纪灵, 王荣纯, 刘昌文, 等, 2003. 烟台海洋倾倒地环境监测及对比评价. *海洋通报*, 22 (2): 53-59.
- 蒋金杰, 刘东艳, 邱宝平, 等, 2011. 烟台四十里湾浮游植物群落的季节变化及其对环境的指示意义. *海洋学报*, 33 (6): 151-164.
- 李超伦, 张永山, 孙松, 等, 2010. 桑沟湾浮游植物种类组成、数量分布及其季节变化. *渔业科学进展*, 31 (4): 1-8.
- 李广楼, 陈碧娟, 崔毅, 等, 2006. 莱州湾浮游植物的生态特征. *中国水产科学*, 13 (2): 292-299.
- 李伟才, 孙军, 宋书群, 等, 2006. 烟台港和邻近锚地及其入境船舶压舱水中的浮游植物. *海洋湖沼通报*, (4): 70-77.
- 李伟新, 朱仲嘉, 刘凤贤, 1982. 海藻学概论. 上海: 上海科学技术出版社.
- 李占海, 柯贤坤, 王倩, 等, 2003. 琼州海峡水沙输运特征研究. *地理研究*, 22 (2): 151-159.
- 林永水, 周近明, 何建宗, 2001. 赤潮生物. 北京: 科学出版社.
- 刘凤非, 2008. 套子湾海洋环境现状浅析. *海洋开发与管理*, 25 (6): 96-98.
- 刘旭, 刘艳, 赵瑞亮, 等, 2010. 烟台海洋倾倒地生物群落结构现状及动态变化分析. *海洋通报*, 29 (4): 396-401.
- 宁璇璇, 纪灵, 王刚, 等, 2011. 烟台套子湾海域秋季浮游植物群

落的初步研究. 海洋通报, 30 (4): 425-429.

钱树本, 刘东艳, 孙军, 2005. 海藻学. 青岛: 中国海洋大学出版社.

山东省海洋与渔业厅, 2010. 2009 年山东省海洋环境质量公报.

孙翠慈, 王友绍, 孙松, 2006. 大亚湾浮游植物群落特征. 生态学报, 26 (12): 3948-3958.

孙洪亮, 黄卫民, 2001. 广西近海潮汐和海流的观测分析与数值研究——数值研究. 黄渤海海洋, 19 (4): 12-21.

万修全, 鲍献文, 吴德星, 等, 2004. 渤海夏季潮致-风生-热盐环流的数值诊断计算. 海洋与湖沼, 35 (1): 41-47.

王云龙, 袁骥, 沈新强, 2005. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征. 中国水产科学, 12 (3): 300-306.

吴玉霖, 周成旭, 张永山, 等, 2001. 烟台四十里湾海域红色裸甲藻赤潮发展过程及其成因. 海洋与湖沼, 32 (2): 159-167.

杨世民, 董树刚, 2006. 中国海域常见浮游硅藻图谱. 青岛: 中国海洋大学出版社.

杨世民, 董树刚, 窦明武, 等, 2009. 2004-2005 年青岛前海定点 54 周次浮游植物群落结构特征. 海洋科学进展, 27 (4): 523-536.

俞建奎, 李瑞香, 1993. 渤海、黄海浮游植物生态的研究. 黄渤海海洋, 11 (3): 52-59.

张瑞安, 董以芝, 1990. 烟台排污海域的自然环境条件分析和污染物运输路径研究. 海岸工程, 9 (2): 35-44.

赵卫红, 焦念志, 赵增霞, 2000. 烟台四十里湾养殖水域营养盐的分布及动态变化. 海洋科学, 24 (4): 31-34.

中国海湾志编纂委员会, 1991. 中国海湾志-第三分册: 山东半岛北部和东部海湾. 北京: 海洋出版社.

附录

表 1 调查期间浮游植物的物种组成

中文名	拉丁文名	四十里湾	套子湾
硅藻门	Bacillariophyta		
短柄曲壳藻	<i>Achnanthes brevipes</i> C. Agardh	+	+
爱氏辐环藻	<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> Ralfs	+	+
六幅辐裯藻	<i>Actinoptychus senarius</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	+	+
变异双眉藻	<i>Amphora commutata</i> Grunow	+	
中肋双眉藻	<i>Amphora costata</i> W. Smith	+	
平滑双眉藻	<i>Amphora laevis</i> Gregory	+	
双眉藻	<i>Amphora</i> sp.	+	
冰河拟星杆藻	<i>Asterionellopsis glacialis</i> (Castracane) Round	+	+
加拉星平藻	<i>Asteroplanus karianus</i> (Grunow) C. Gardner & R. M. Crawford	+	+
扎氏四棘藻	<i>Atteya zachariasii</i> Brun	+	+
优美辐杆藻	<i>Bacteriastrum delicatulum</i> Cleve		+
辐杆藻	<i>Bacteriastrum</i> sp.	+	
正盒形藻	<i>Biddulphia biddulphiana</i> (J. E. Smith) Boyer	+	+
横滨盒形藻	<i>Biddulphia grundleri</i> A. Schmidt		+
钝角盒形藻	<i>Biddulphia obtusa</i> (Kützing) Ralfs	+	+
大角管藻	<i>Cerataulina daemon</i> (Greville) Hasle	+	
均等角毛藻	<i>Chaetoceros aequatoriale</i> Cleve	+	
扁面角毛藻	<i>Chaetoceros compressus</i> Lauder	+	
旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve	+	+
柔弱角毛藻	<i>Chaetoceros debilis</i> Cleve	+	
密连角毛藻	<i>Chaetoceros densus</i> (Cleve) Cleve	+	
双孢角毛藻	<i>Chaetoceros didymus</i> Ehrenberg	+	
克尼角毛藻	<i>Chaetoceros knipowitschii</i> A. Henckel	+	
劳氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow	+	+
海洋角毛藻	<i>Chaetoceros pelagicus</i> Cleve	+	+
秘鲁角毛藻	<i>Chaetoceros peruvianus</i> Brightwell	+	
舞姿角毛藻	<i>Chaetoceros saltans</i> Cleve	+	
聚生角毛藻	<i>Chaetoceros socialis</i> H. S. Lauder	+	
角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	+	+
宽梯形藻	<i>Climacodium frauenfeldianum</i> Grunow	+	

续表 1 调查期间浮游植物的物种组成

中文名	拉丁文名	四十里湾	套子湾
卵形藻	<i>Cocconeis</i> sp.	+	
羽状环毛藻	<i>Corethron pennatum</i> (Grunow) Ostenfeld	+	
星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> Ehrenberg	+	
明壁圆筛藻	<i>Coscinodiscus debilis</i> Rattray	+	
偏心圆筛藻	<i>Coscinodiscus excentricus</i> Ehrenberg	+	+
格氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus granii</i> Gough	+	
虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> (Ehrenberg) Ehrenberg		+
辐射列圆筛藻	<i>Coscinodiscus radiatus</i> Ehrenberg	+	+
圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> sp.	+	+
小环藻	<i>Cyclotella</i> sp.	+	+
柱状小环藻	<i>Cyclotella stylonum</i> Brightwell	+	+
新月柱鞘藻	<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann & J. C. Lewin	+	+
矮小短棘藻	<i>Detonula pumila</i> (Castracane) Gran	+	+
淡褐双壁藻	<i>Diploneis fusca</i> (W. Gregory) Cleve		+
双壁藻	<i>Diploneis</i> sp.	+	+
布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i> (T. West) Grunow	+	+
太阳双尾藻	<i>Ditylum sol</i> (Grunow) De Toni	+	+
唐氏藻	<i>Donkinia</i> sp.	+	
翼内茧藻	<i>Entomoneis alata</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	+	
长角弯角藻	<i>Eucampia cornuta</i> (Cleve) Grunow	+	+
浮动弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i> Ehrenberg	+	+
柔弱井字藻	<i>Eunotogramma debile</i> Grunow	+	+
海生斑条藻	<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kützing	+	+
柔弱几内亚藻	<i>Guinardia delicatula</i> (Cleve) Hasle	+	+
薄壁几内亚藻	<i>Guinardia flaccida</i> (Castracane) H. Peragallo	+	+
斯氏几内亚藻	<i>Guinardia striata</i> (Stolterfoth) Hasle	+	+
霍氏半管藻	<i>Hemiaulus hauckii</i> Grunow ex Van Heurck	+	
中华半管藻	<i>Hemiaulus sinensis</i> Greville	+	+
细弱明盘藻	<i>Hyalodiscus subtilis</i> J. W. Bailey		+
环纹娄氏藻	<i>Lauderia annulata</i> Cleve	+	+
丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve	+	+
地中海细柱藻	<i>Leptocylindrus mediterraneus</i> (H. Peragallo) Hasle		+
微小细柱藻	<i>Leptocylindrus minimus</i> Gran	+	+
短楔形藻	<i>Licmophora abbreviata</i> Agardh	+	+
吸入舟形藻	<i>Navicula inhalata</i> A. Schmidt	+	
贾马舟形藻	<i>Navicula jamalinensis</i> Cleve	+	
念珠直链藻	<i>Melosira moniliformis</i> (O. F. Müller) C. Agardh	+	
膜状缪氏藻	<i>Meuniera membranacea</i> (Cleve) P. C. Silva	+	+
诺森舟形藻	<i>Navicula northumbrica</i> Donkin	+	
舟形藻	<i>Navicula</i> sp.	+	
缢缩菱形藻	<i>Nitzschia constricta</i> (Gregory) Grunow	+	+
类远距菱形藻	<i>Nitzschia distantoides</i> Hustedt	+	
长菱形藻	<i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson) Ralfs	+	+
菱形藻	<i>Nitzschia</i> sp.	+	+
匙形菱形藻	<i>Nitzschia spathulata</i> Brebisson	+	
透明菱形藻	<i>Nitzschia vitrea</i> G. Norman	+	
中华盒形藻	<i>Odontella sinensis</i> (Greville) Grunow	+	
具槽帕拉藻	<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve	+	+

续表 1 调查期间浮游植物的物种组成

中文名	拉丁文名	四十里湾	套子湾
三角褐指藻	<i>Phaeodactylum tricornutum</i> Bohlin	+	+
羽纹藻	<i>Pinnularia</i> sp.	+	+
端尖斜纹藻	<i>Pleurosigma acutum</i> Norman ex Ralfs	+	
艾希斜纹藻	<i>Pleurosigma aestuarii</i> (Brébisson ex Kützing) W. Smith	+	
美丽斜纹藻	<i>Pleurosigma formosum</i> W. Smith	+	
海洋斜纹藻	<i>Pleurosigma pelagicum</i> Peragallo	+	
坚实斜纹藻	<i>Pleurosigma rigidum</i> W. Smith	+	
斜纹藻	<i>Pleurosigma</i> sp.	+	+
星形柄链藻	<i>Podosira stelligera</i> (J. W. Bailey) Mann	+	+
柔弱拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden	+	+
尖刺拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (Grunow ex Cleve) G. R. Hasle	+	+
双角缝舟藻	<i>Rhaphoneis amphiceros</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	+	+
翼根管藻印度变型	<i>Rhizosolenia alata f. indica</i> (Peragallo) Ostenfeld		+
刚毛根管藻	<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightwell	+	+
中华根管藻	<i>Rhizosolenia sinensis</i> Qian	+	+
笔尖形根管藻	<i>Rhizosolenia styliformis</i> Brightwell		+
根管藻	<i>Rhizosolenia</i> sp.	+	
优美旭氏藻	<i>Schroederella delicatula</i> (H. Peragallo) Pavillard	+	+
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve	+	+
掌状冠盖藻	<i>Stephanopyxis palmeriana</i> (Greville) Grunow		+
菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky	+	+
诺氏海链藻	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> Cleve	+	
圆海链藻	<i>Thalassiosira rotula</i> Meunier	+	
海链藻	<i>Thalassiosira</i> sp.	+	+
粗纹藻	<i>Trachyneis</i> sp.	+	
甲藻门	Dinophyta		
血红哈卡藻	<i>Akashiwo sanguinea</i> (K. Hirasaka) G. Hansen Ø. Moestrup	+	+
链状亚历山大藻	<i>Alexandrium catenella</i> (Whedon & Kofoid) Balech	+	
塔玛亚历山大藻	<i>Alexandrium tamarense</i> (Lebour) E. Balech	+	+
前沟藻	<i>Amphidinium conradii</i> J. Schiller	+	
波氏角藻	<i>Ceratium boehmii</i> Graham & Bronikovsky	+	
叉状角藻	<i>Ceratium furca</i> (Ehrenberg) Dujardin	+	+
梭角藻	<i>Ceratium fusus</i> (Ehrenberg) Dujardin	+	+
粗刺角藻	<i>Ceratium horridum</i> Gran	+	
细长角藻	<i>Ceratium longissimum</i> (Schröder) Kofoid	+	+
波状角藻	<i>Ceratium trichoceros</i> (Ehrenberg) Kofoid	+	
锚角藻	<i>Ceratium tripos</i> (Müller) Nitzsch	+	+
锚角藻大西洋变种	<i>Ceratium tripos var. atlanticum</i> (Ostenfeld) Paulesen	+	
(未定名)	<i>Coolia monotis</i> Meunier	+	
渐尖鳍藻	<i>Dinophysis acuminata</i> Claparède & Lachmann	+	+
倒卵形鳍藻	<i>Dinophysis fortii</i> Pavillard	+	+
拟翼藻	<i>Diplosalopsis globula</i> Abé		+
轮状拟翼藻卵形变种	<i>Diplosalopsis orbicularis var. ovata</i> Abé	+	+
(未定名)	<i>Diplosalopsis ynnetrica</i> (Magin) Abé	+	+
具毒冈比甲藻	<i>Gambierdiscus toxicus</i> Adachi & Fukuyo	+	+

续表 1 调查期间浮游植物的物种组成

中文名	拉丁文名	四十里湾	套子湾
膝沟藻	<i>Gonyaulax grindleyi</i> Reinecke	+	+
多纹膝沟藻	<i>Gonyaulax polygramma</i> Stein	+	+
具刺膝沟藻	<i>Gonyaulax spinifera</i> (Claparède & Lachmann) Diesing	+	+
膝沟藻	<i>Gonyaulax turbynei</i> Murray & Whitting	+	+
春膝沟藻	<i>Gonyaulax verior</i> Sournia	+	
链状裸甲藻	<i>Gymnodinium catenatum</i> H. W. Graham	+	
湖泊裸甲藻	<i>Gymnodinium lacustre</i> Schiller	+	
裸甲藻	<i>Gymnodinium lohmannii</i> Paulsen	+	
菱形裸甲藻	<i>Gymnodinium rhomboides</i> Schutt		+
裸甲藻	<i>Gymnodinium</i> sp.	+	+
裸甲藻	<i>Gymnodinium viridescens</i> Kofoid		+
多米尼环沟藻	<i>Gyrodinium dominans</i> Hulbert	+	
条纹环沟藻	<i>Gyrodinium instriatum</i> Freudenthal & Lee	+	
异甲藻	<i>Heterocapsa triquetra</i> (Ehrenberg) F.Stein		+
短凯伦藻	<i>Karenia brevis</i> (C. C. Davis) G. Hansen & Ø. Moestrup	+	
米氏凯伦藻	<i>Karenia mikimotoi</i> (Miyake & Kominami ex Oda) G. Hansen & Ø. Moestrup	+	
夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i> (Macartney) Kofoid et Swezy	+	+
球状尖甲藻	<i>Oxytoxum sphaeroideum</i> Stein	+	
五刺多甲藻	<i>Peridinium quinquecorne</i> Abé	+	+
波罗的海原甲藻	<i>Prorocentrum balticum</i> (Lohmann) Loeblich	+	
具齿原甲藻	<i>Prorocentrum dentatum</i> Stein	+	+
纤细原甲藻	<i>Prorocentrum gracile</i> Schütt	+	
利马原甲藻	<i>Prorocentrum lima</i> (Ehrenberg) F. Stein		+
海洋原甲藻	<i>Prorocentrum micans</i> Ehrenberg	+	+
微小原甲藻	<i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) J. Schiller	+	+
原甲藻	<i>Prorocentrum</i> sp.		+
双刺原多甲藻	<i>Proto-peridinium bipes</i> (Paulsen) Balech	+	+
窄脚原多甲藻	<i>Proto-peridinium claudicans</i> (Paulsen) Balech		+
锥形原多甲藻	<i>Proto-peridinium conicum</i> (Gran) Balech	+	
歧散原多甲藻	<i>Proto-peridinium divergens</i> (Ehrenberg) Balech	+	+
脚膜原多甲藻	<i>Proto-peridinium fatulipes</i> (Kofoid) Balech		+
小球形原多甲藻	<i>Proto-peridinium globulum</i> (Stein) Balech		+
格氏原多甲藻	<i>Proto-peridinium granii</i> (Ostenfeld) Balech	+	
膨大原多甲藻	<i>Proto-peridinium inflatum</i> (Okamura) Balech		+
里昂原多甲藻	<i>Proto-peridinium leonis</i> (Pavillard) Balech	+	
原多甲藻	<i>Proto-peridinium marukawai</i> (Abé) Balech		+
日本原多甲藻	<i>Proto-peridinium nipponicum</i> Abé	+	+
长形原多甲藻	<i>Proto-peridinium oblongum</i> (Aurivillius) Parke & Dodge		+
海洋原多甲藻	<i>Proto-peridinium oceanicum</i> (VanHöffen) Balech	+	
椭圆原多甲藻	<i>Proto-peridinium ovatum</i> Pouchet	+	
光原多甲藻	<i>Proto-peridinium pallidum</i> (Ostenfeld) Balech	+	
透明原多甲藻	<i>Proto-peridinium pellucidum</i> Bergh ex Loeblich Jr. & Loeblich III	+	+
五角原多甲藻	<i>Proto-peridinium pentagonum</i> (Gran) Balech	+	+
原多甲藻	<i>Proto-peridinium punctulatum</i> (Paulsen) Balech	+	+
梨形原多甲藻	<i>Proto-peridinium pyriforme</i> (P. Dangeard) Balech	+	+

续表 1 调查期间浮游植物的物种组成

中文名	拉丁文名	四十里湾	套子湾
玫瑰红原多甲藻	<i>Protoperidinium roseum</i> (Paulsen) Balech	+	+
原多甲藻	<i>Protoperidinium</i> sp.	+	+
球形原多甲藻	<i>Protoperidinium sphaericum</i> (Murray & Whitting) Balech	+	
原多甲藻	<i>Protoperidinium sphaeroides</i> (P. Dangeard) Balech	+	
近梨形原多甲藻	<i>Protoperidinium subpyriforme</i> (P. Dangeard) Balech		+
方格原多甲藻	<i>Protoperidinium thorianum</i> (Paulsen) Balech	+	+
稍偏原多甲藻	<i>Protoperidinium ventricum</i> (Abé) Balech		+
斯氏扁甲藻	<i>Pyrophacus steinii</i> (Schiller) Wall & Dale		+
锥状斯克里普藻	<i>Scrippsiella trochoidea</i> (Stein) Balech ex Loeblich III	+	+
褐胞藻门	Heterokontophyta		
海洋卡盾藻	<i>Chattonella marina</i> (Subrahmanyam) Hara & Chihara	+	+
小等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha fibula</i> Ehrenberg	+	+
六异刺硅鞭藻	<i>Distephanus speculum</i> (Ehrenberg) Haeckel	+	
六异刺硅鞭藻八幅变种	<i>Distephanus speculum</i> var. <i>octonarius</i> (Ehrenberg) Jörgensen Ehrenberg	+	
六异刺硅鞭藻十幅变种	<i>Distephanus speculum</i> var. <i>polyactis</i> (Ehrenberg) Lemmermann	+	+
赤潮异弯藻	<i>Heterosigma akashiwo</i> (Y. Hada) Y. Hada ex Y. Hara & M. Chihara	+	+
多型中空藻双八角变种	<i>Mesocena polymorpha</i> var. <i>bioctonaria</i> (Ehrenberg) Lemmermann	+	
绿藻门	Chlorophyta		
短棘盘星藻	<i>Pediastrum boryanum</i> (Turpin) Meneghini		+
二角盘星藻	<i>Pediastrum duplex</i> Meyen	+	+
单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i> Meyen	+	+
未定类	Incertae Sedis		
三深裂醉藻	<i>Ebria tripartita</i> (Schumann) Lemmermann	+	
硅藻种类数	50 属 103 种	48 属 94 种	39 属 61 种
甲藻种类数	21 属 73 种	19 属 58 种	15 属 47 种
褐胞藻种类数	5 属 7 种	5 属 7 种	4 属 4 种
绿藻种类数	1 属 3 种	1 属 2 种	1 属 3 种
共计	78 属 187 种	74 属 162 种	59 属 115 种

注：“+”表示物种存在

(本文编辑:袁泽轶)