

渤海中部浮游动物的生态特征*

徐东会 孙雪梅 陈碧鹃^① 夏 斌 崔正国
赵 俊 江 涛 刘传霞 曲克明

(农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室
中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071)

摘要 本研究针对 2013 年 5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)和 12 月(冬季)在渤海中部海域以浅水 I 型浮游生物网采集的浮游动物样品,分析了浮游动物的种类组成、丰度分布和多样性;通过结合现场环境参数,探讨了环境因子与浮游动物之间的关系。结果显示,4 个季节共鉴定浮游动物 74 种(含浮游幼虫 21 类),桡足类为绝对优势的类群,在浮游动物的物种丰富度中占 25.7%。渤海中部海域全年均出现的浮游动物优势种类共 2 个,分别为中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)和强壮箭虫(*Sagitta crassa*)。春季共鉴定浮游动物 29 种(含浮游幼虫 6 类),浮游动物平均丰度为 782.0 ind/m³,平均湿重生物量为 157.1 mg/m³,香农-威纳指数(*H'*)和物种丰富度指数(*D*)分别为 2.36 和 1.02;夏季共鉴定浮游动物 45 种(含浮游幼虫 18 类),浮游动物平均丰度为 199.6 ind/m³,平均湿重生物量为 135.8 mg/m³,*H'*和 *D* 分别为 1.75 和 1.78;秋季共鉴定浮游动物 42 种(含浮游幼虫 14 类),浮游动物平均丰度为 42.1 ind/m³,平均湿重生物量为 122.5 mg/m³,*H'*和 *D* 分别为 1.83 和 2.08;冬季共鉴定浮游动物 33 种(含浮游幼虫 12 类),浮游动物平均丰度为 72.1 ind/m³,平均湿重生物量为 151.1 mg/m³,*H'*和 *D* 分别为 1.63 和 1.53。浮游动物丰度与环境因子间的相关性分析表明,春季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为表盐、底溶解氧和水深;夏季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为底温、底盐和叶绿素;秋季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为表温、表 pH 和底 pH;冬季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为底 pH 和叶绿素。与同期历史数据相比,浮游动物的种类数、丰度和生物量均有所下降。

关键词 渤海;浮游动物;种类组成;多样性

中图分类号 S931 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)04-0007-12

渤海是陆岸环抱的半封闭性内海,沿岸多条大、小河流入海。因此,渤海具有水质肥沃,饵料生物丰富的特点,并构成我国北方经济鱼虾类的主要产卵场和索饵场(白雪娥等,1991)。浮游动物作为海洋生态系统中的重要组成部分,其动态变化控制着初级生产

力的节律、规模和归宿;同时,浮游动物作为经济鱼类的饵料来源,在很大程度上决定了鱼种的补充机制(Cushing, 1972¹⁾; Froneman, 2004; 齐衍萍等, 2010; 徐东晖, 2010²⁾。

目前,关于渤海海域浮游动物的种类组成、数量

* 农业部溢油专项“渤海生态环境监测与评估”(农办渔[2012]117号)和“应对溢油关键技术专项研究”(2012-NZ-5739)共同资助。徐东会, E-mail: lvbaobei@sina.com

^① 通讯作者: 陈碧鹃, 研究员, E-mail: chenbj@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-06-11, 收修改稿日期: 2015-08-11

1) Cushing DH. The production cycle and the numbers of marine fish. Symposium Zoological Society of London, 1972, 29: 213-232

2) 徐东晖. 自然和人为因子对黄、东海几种桡足类优势种生理活动的影响. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2010, 9-15

变动的研究较多,但一般是针对整个渤海水域大尺度的研究(白雪娥等,1991;毕洪生等,2000;王克等,2002;张武昌等,2002),或仅局限于渤海部分水域小范围的研究(王彬等,2010;马静,2011¹⁾;李自尚,2012²⁾;马静等,2012;彭荣等,2012;高文胜等,2014;王宇等,2014),针对渤海中部水域的调查研究较为少见。本研究利用2013年5、8、11、12月在渤海中部水域开展的海洋调查所获得的浮游动物资料,分析了浮游动物的种类组成和数量变化,对该水域浮游动物的生态特征进行研究,探讨了浮游动物与环境因子之间的关系。以期为渤海中部水域浮游动物的长期变化研究提供基础资料,并对该水域生物资源的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查海区及方法

分别于2013年5月(春季)、8月(夏季)、11月(秋季)和12月(冬季),在渤海中部水域(图1)进行浮游动物调查。使用美国YSI556型多参数水质监测仪测定海水温度、盐度、溶解氧、pH及水深等环境参数,叶绿素的测定采用荧光分光光度法《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)。采用浅水I型浮游生物网采集浮游动物样品,用5%福尔马林海水溶液固定保存,参照《海洋调查规范——海洋生物调查》(GB12763.6-2007)完成浮游动物样品的处理和分析。

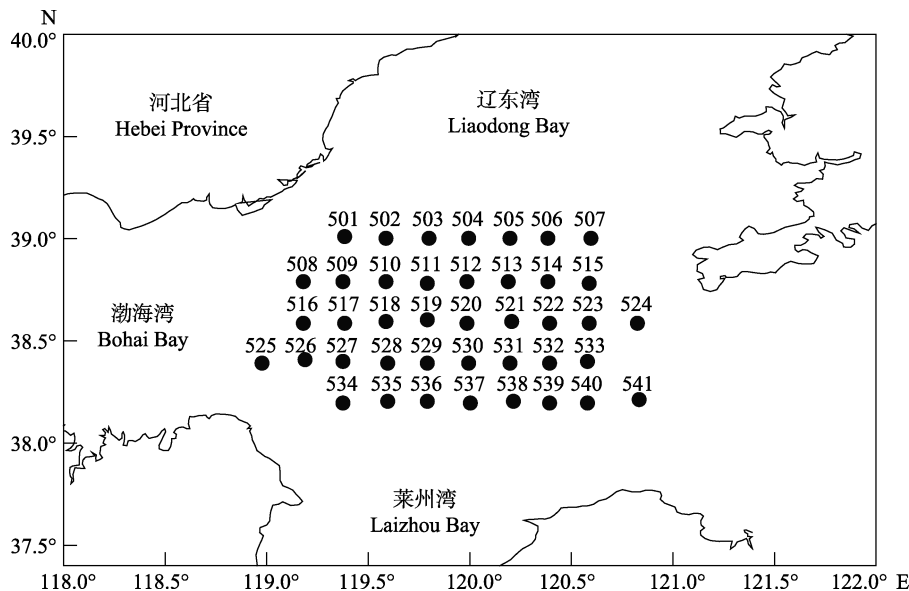


图1 调查区域及站位分布

Fig.1 Investigated area and the sampling stations

1.2 数据处理与分析

1.2.1 丰度和生物量 浮游动物丰度为每立方米水体中的个体数,生物量为固定样品后称得的湿重。

1.2.2 优势种 根据每个种的优势度值(Y)来确定浮游动物的优势种,将 $Y \geq 0.02$ 的种类作为优势种(徐兆礼等,1989)。

1.2.3 生物多样性 浮游动物多样性指数使用香农-威纳指数(H')(Shannon *et al*, 1949)和Margalef丰富度指数(D)(Margalef, 1958)表示。根据《海洋监测规范》(GB17378.7-2007)的评价标准,当 $H' < 1$ 时,为重污染;当 $H'=1-2$ 时,为中度污染;当 $H'=2-3$ 时,为轻度污染;当 $H'=3-4$ 时,为清洁区域。

1.2.4 浮游动物与环境因子关系 应用多元统计软件PRIMER V6.1中的BIOENV和RELATE程序(Souissi *et al*, 2001)分析浮游动物丰度与环境因子间的关系。

2 结果与分析

2.1 种类组成及优势种

2013年渤海中部水域调查共鉴定各类浮游动物53种、浮游幼虫21类,合计种类数为74(表1)。其中,浮游动物成体分别包括刺胞动物16种,栉水母2种,枝角类2种,介形类1种,桡足类19种,等足类1种,端足类4种,糠虾类2种,磷虾类1种,十足类1种,毛颚类2种,被囊类2种。春季渤海中部水域调查共

1) 马静. 夏、秋季黄河口及其邻近海域大中型浮游动物群落生态学研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2011, 22-70
2) 李自尚. 春季黄河口及其邻近水域浮游动物群落特征与粒径谱的初步研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2012, 20-61

表 1 渤海中部水域浮游动物种类组成
Tab.1 The composition of zooplankton in the central Bohai Sea

种类 Species	丰度 Abundance (%)			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
束状高手水母 <i>Bougainvillia ramose</i>	—	—	0.06	—
高手水母 <i>Bougainvillia</i> sp.	—	—	0.01	—
八束水母 <i>Koellikerina</i> sp.	—	—	0.03	—
日本长管水母 <i>Sarsia japonica</i>	—	0.01	—	—
单肢水母 <i>Nubiella</i> sp.	—	0.01	—	—
小介穗水母 <i>Podocoryne minima</i>	—	0.01	—	—
真囊水母 <i>Euphysora</i> sp.	—	0.04	—	—
杜氏外肋水母 <i>Ectopleura dumortieri</i>	—	0.09	—	—
马来触丝水母 <i>Helgicirra malayensis</i>	2.14	—	—	—
六辐枝管水母 <i>Willsia mutabllis</i>	0.12	—	—	—
八斑芮氏水母 <i>Rathkea octopunctata</i>	8.31	—	—	—
多管水母 <i>Aequorea coerulescens</i>	0.03	—	—	—
锡兰和平水母 <i>Eirene ceylonensis</i>	—	—	0.10	0.06
半球美螳水母 <i>Clytia hemisphaerica</i>	—	0.02	0.06	0.06
四枝管水母 <i>Proboscidactyla flavicirrata</i>	—	0.03	1.17	1.15
五角水母 <i>Muggiaea atlantica</i>	—	—	0.83	0.51
球形侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i>	—	—	0.55	0.17
瓜水母 <i>Beroe cucumis Fabricius</i>	—	—	—	0.01
鸟喙尖头蚤 <i>Penilia avirostris</i>	—	1.72	0.01	—
肥胖三角蚤 <i>Evadne tergestina</i>	—	0.01	—	—
格氏星萤 <i>Asteropina grimaldi</i>	—	—	—	0.01
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	19.48	38.14	42.33	50.33
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	11.65	0.87	0.87	1.08
强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i>	—	0.07	0.02	0.07
腹针胸刺水蚤 <i>Centropages abdominalis</i>	5.68	0.01	—	—
瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i>	1.51	0.01	—	—
背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	2.28	—	0.05	—
平头水蚤 <i>Candacia</i> sp.	0.01	—	—	—
真刺唇角水蚤 <i>Labidocera euchaeta</i>	—	0.01	1.33	0.70
双刺唇角水蚤 <i>Labidocera bipinnata</i>	—	0.40	0.49	0.55
双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i>	5.36	0.04	0.10	0.01
克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausi</i>	0.02	—	—	—
太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	18.91	—	0.01	0.03
瘦尾筒角水蚤 <i>Pontellopsis tenuicauda</i>	0.49	—	—	—
海洋伪镖水蚤 <i>Pseudodiaptomus marinus</i>	0.28	—	—	—
刺尾歪水蚤 <i>Tortanus spinicaudatus</i>	1.96	—	—	—
拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>	—	—	0.10	0.12
近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i>	1.73	0.17	1.26	0.52
挪威小毛猛水蚤 <i>Microsetella norvegica</i>	2.94	—	—	—
怪水蚤 <i>Monstrilla</i> sp.	—	0.01	—	—
小寄虱 <i>Microniscus</i> sp.	—	0.03	0.09	0.07
细足法虫戎 <i>Themisto gracilipes</i>	0.04	0.67	0.52	1.08
螺赢斐 <i>Corophium</i> sp.	0.15	—	—	—
麦杆虫 <i>Caprella</i> sp.	—	—	0.01	—

续表 1 Continued Tab.1

种类 Species	丰度 Abundance (%)			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
钩虾 <i>Gammaridea</i>	—	0.01	0.10	0.03
长额刺糠虾 <i>Acanthomysis longirostris</i>	—	0.02	0.14	—
儿岛囊糠虾 <i>Gastrosaccus kojimansis</i>	0.05	—	0.05	—
太平洋磷虾 <i>Euphausia pacifica</i>	—	0.01	—	—
中国毛虾 <i>Acetes chinensis</i>	0.02	—	—	—
拿卡箭虫 <i>Sagitta nagae</i>	—	0.03	0.03	—
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	7.32	37.43	39.59	39.30
异体住囊虫 <i>Oikopleura dioica</i>	—	0.08	0.64	0.20
小齿海樽 <i>Doliolum denticulatum</i>	—	—	0.02	—
帚虫类辐轮幼虫 <i>Actinotrocha larva</i>	—	—	0.07	0.08
柱头幼虫 <i>Tornaria larva</i>	—	8.12	0.01	0.02
多毛类幼体 <i>Polychaeta larva</i>	—	0.03	1.07	0.29
双壳类幼体 <i>Bivalve larvae</i>	—	1.49	6.60	2.47
腹足类幼体 <i>Gastropoda larva</i>	—	0.25	0.19	0.02
桡足类无节幼虫 <i>Nauplius larva (Copepoda)</i>	8.35	0.01	—	0.02
桡足幼体 <i>Copepodite larva</i>	—	0.01	—	—
磷虾节胸幼虫 <i>Calyptopis larva</i>	—	0.01	0.14	0.02
糠虾幼体 <i>Mysidacea larvae</i>	0.07	—	—	—
阿利玛幼虫 <i>Alima larva</i>	—	0.16	—	—
蔓足类藤壶幼体 <i>Balanus larva</i>	0.01	—	—	—
长尾类幼体 <i>Macrura larva</i>	0.01	1.43	0.92	0.79
短尾类溞状幼虫 <i>Brachyura zoea larva</i>	0.01	0.61	0.14	0.06
短尾类大眼幼体 <i>Brachyura megalopa larva</i>	—	0.01	—	—
歪尾类溞状幼虫 <i>Porcellana zoea larva</i>	—	0.01	0.03	0.10
海蛇尾长腕幼虫 <i>Ophiopluteus larva</i>	1.10	0.95	0.02	—
海胆长腕幼虫 <i>Echinopluteus larva</i>	—	5.80	0.07	0.03
海星羽腕幼虫 <i>Bipinnaria larva</i>	—	1.00	—	—
棘皮动物幼体 <i>Echinodermata larva</i>	—	0.13	0.15	—
仔稚鱼 <i>Fish larva</i>	—	0.02	0.03	—
鱼卵 <i>Fish eggs</i>	—	0.06	0.06	0.07

— 表示该种类未出现

— denoted unobserved species or taxon

鉴定各类浮游动物 23 种、浮游幼虫 6 类，合计种类数为 29。夏季渤海中部水域调查共鉴定各类浮游动物 27 种、浮游幼虫 18 类，合计种类数为 45。秋季渤海中部水域调查共鉴定各类浮游动物 28 种、浮游幼虫 14 类，合计种类数为 42。冬季渤海中部水域调查共鉴定各类浮游动物 21 种、浮游幼虫 12 类，合计种类数为 33。

渤海中部水域浮游动物的生态特征可划分为 4 个类群：(1)近岸低盐类群：该类群适应的盐度较低，代表种类有真刺唇角水蚤(*L. euchaeta*)、双刺唇角水蚤(*L. bipinnata*)、太平洋纺锤水蚤(*A. pacifica*)、八斑芮氏

水母(*R. octopunctata*)等。(2)低温高盐类群：该类群代表种类有细足法虫戎(*T. gracilipes*)、太平洋磷虾(*E. pacifica*)等。(3)广温广盐类群：该类群适温性强，主要有中华哲水蚤(*C. sinicus*)、小拟哲水蚤(*P. parvus*)、腹针胸刺水蚤(*C. abdominalis*)、背针胸刺水蚤(*C. dorsispinatus*)、拟长腹剑水蚤(*O. similis*)、近缘大眼剑水蚤(*C. affinis*)、强壮箭虫(*S. crassa*)、球形侧腕水母(*P. globosa*)、五角水母(*M. atlantica*)等。(4)高温高盐类群：该类群代表种类为小齿海樽(*D. denticulatum*)。

春季渤海中部海域浮游动物共有 7 个优势种类，

分别为中华哲水蚤($Y=0.17$)、小拟哲水蚤($Y=0.05$)、腹针胸刺水蚤($Y=0.02$)、双毛纺锤水蚤($Y=0.04$)、太平洋纺锤水蚤($Y=0.15$)、八斑芮氏水母($Y=0.02$)和强壮箭虫($Y=0.07$)。夏季渤海中部海域浮游动物共有 3 个优势种类, 分别为中华哲水蚤($Y=0.38$)、强壮箭虫($Y=0.37$)和海胆长腕幼虫($Y=0.04$)。秋季渤海中部海域浮游动物共有 3 个优势种类, 分别为中华哲水蚤($Y=0.41$)、强壮箭虫($Y=0.40$)和双壳类幼体($Y=0.06$)。冬季渤海中部海域浮游动物共有 3 个优势种类, 分别为中华哲水蚤($Y=0.50$)、强壮箭虫($Y=0.39$)和双壳类幼体($Y=0.02$)。2013 年渤海中部海域全年均出现的浮游动物优势种类共 2 个, 分别为中华哲水蚤和强壮箭虫。

2.2 浮游动物丰度及生物量水平分布特征

浮游动物总丰度的平面分布见图 2。从图 2-a 可以看出, 春季渤海中部海域浮游动物总丰度很高, 平均值为 782.0 ind/m^3 。总丰度最高值出现在调查水域南部 537 号站(8509.6 ind/m^3), 总丰度最小值出现在调查水域西南部 527 号站(15.4 ind/m^3)。夏季渤海中部海域浮游动物总丰度较高, 其平均值为 199.6 ind/m^3 。总丰度最高值出现在调查水域西南部 525 号站(907.6 ind/m^3), 总丰度最小值出现在调查水域西南部 534 号站

(16.0 ind/m^3) (图 2-b)。秋季渤海中部海域浮游动物总丰度较低, 其平均值为 42.1 ind/m^3 。总丰度最高值出现在调查水域西南部 534 号站(254.8 ind/m^3), 总丰度最小值出现在调查水域西北部 501 号站(3.3 ind/m^3) (图 2-c)。冬季渤海中部海域浮游动物总丰度较低, 其平均值为 72.1 ind/m^3 。总丰度最高值出现在调查水域东南部 539 号站(300.3 ind/m^3), 总丰度最小值出现在调查水域中部 520 号站(13.0 ind/m^3) (图 2-d)。

浮游动物生物量的平面分布见图 3。春季渤海中部海域浮游动物湿重生物量的分布格局与丰度存在一定的差异。平均湿重生物量为 157.1 mg/m^3 。生物量的最高值出现在调查水域南部 537 号站(917.9 mg/m^3), 最小值出现在调查水域中部 512 号站(3.8 mg/m^3) (图 3-a)。夏季渤海中部海域浮游动物的平均湿重生物量为 135.8 mg/m^3 。生物量的最高值出现在调查水域西部 517 号站(507.2 mg/m^3), 最小值出现在调查水域东南部 541 号站(40.2 mg/m^3) (图 3-b)。秋季渤海中部海域浮游动物的平均湿重生物量为 122.5 mg/m^3 。生物量的最高值出现在调查水域中部 511 号站(499.6 mg/m^3), 最小值出现在调查水域东南部 532 号站(31.0 mg/m^3) (图 3-c)。冬季渤海中部海域浮游动物的平均湿重生物量为 151.1 mg/m^3 。生物量的最高值出现在调查水域东南部

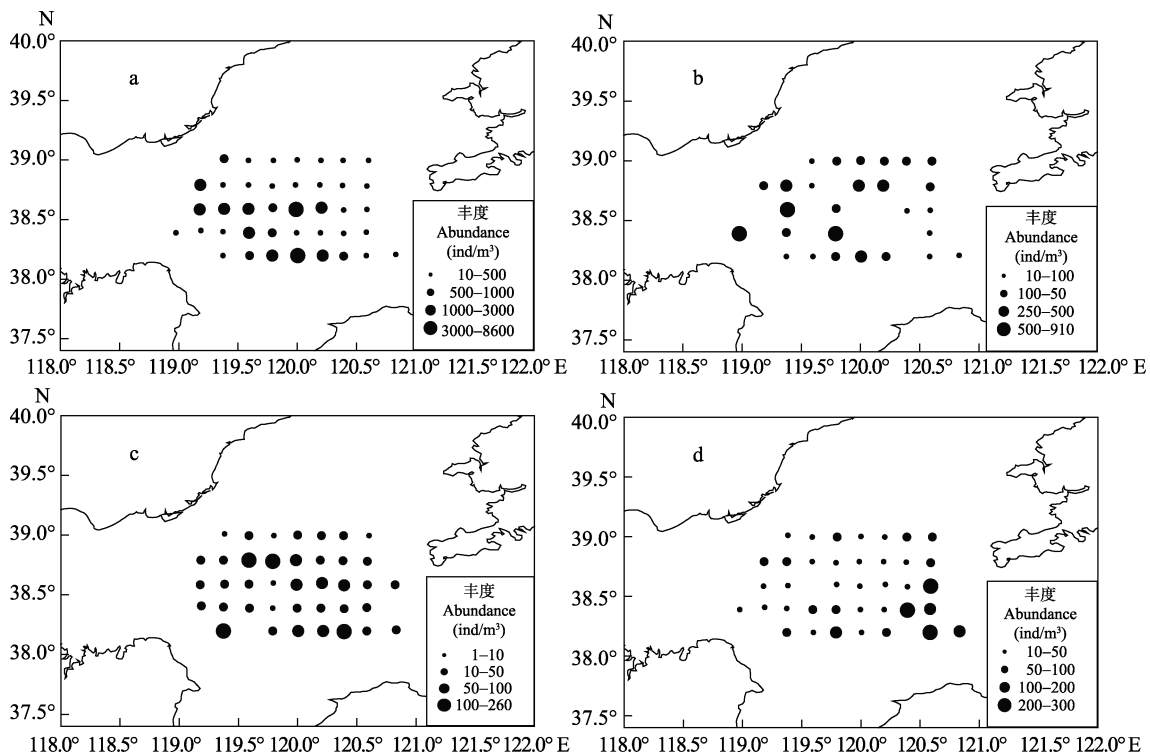


图 2 浮游动物丰度平面分布

Fig.2 Horizontal distribution of zooplankton abundance

a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季

a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter

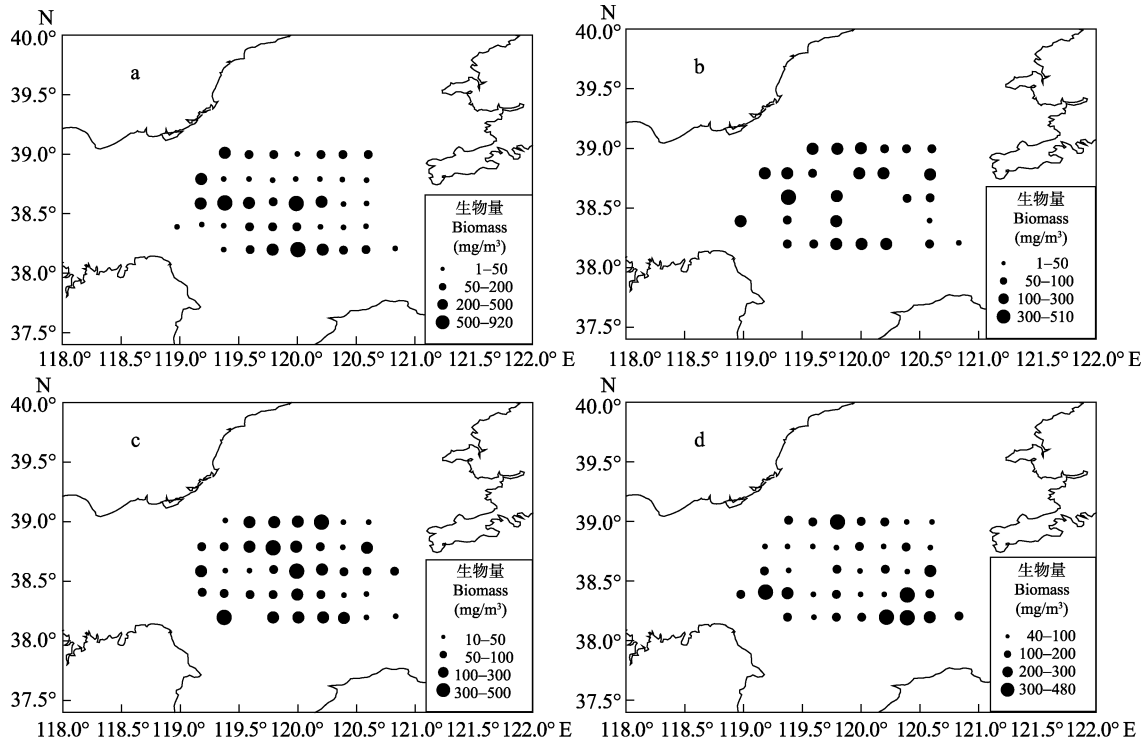


图 3 浮游动物生物量平面分布

Fig.3 Horizontal distribution of zooplankton biomass

a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季

a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter

539 号站(476.4 mg/m^3), 最小值出现在调查水域中部 520 号站(45.0 mg/m^3)(图 3-d)。

2.3 浮游动物优势种丰度分布特征

2.3.1 中华哲水蚤 中华哲水蚤的平面分布见图 4, 从图 4 可以看出, 该种在渤海中部研究水域的平面分布并不均匀。春季渤海中部水域中华哲水蚤的平均丰度为 152.3 ind/m^3 , 其对浮游动物总丰度的贡献率达到 19.5%。丰度最高值出现在调查水域南部 537 号站, 丰度值为 1923.1 ind/m^3 (图 4-a)。夏季渤海中部水域中华哲水蚤的平均丰度为 76.1 ind/m^3 , 其对浮游动物总丰度的贡献率达到 38.1%。丰度最高值出现在调查水域南部的 529 号站, 丰度值为 384.0 ind/m^3 (图 4-b)。秋季渤海中部水域中华哲水蚤的平均丰度为 17.8 ind/m^3 , 其对浮游动物总丰度的贡献率达到 42.3%。丰度最高值出现在调查水域西南部的 534 号站, 丰度值为 177.1 ind/m^3 (图 4-c)。冬季渤海中部水域中华哲水蚤的平均丰度为 36.3 ind/m^3 , 其对浮游动物总丰度的贡献率达到 50.3%。丰度最高值出现在调查水域东部的 523 号站, 丰度值为 173.8 ind/m^3 (图 4-d)。

2.3.2 强壮箭虫 强壮箭虫的平面分布见图 5。春

季渤海中部水域强壮箭虫的平均丰度为 57.3 ind/m^3 , 其对浮游动物总丰度的贡献率达到 7.3%。最大值出现在调查水域西北部的 501 号站, 丰度高达 559.6 ind/m^3 , 最小值出现在 527 号站(2.6 ind/m^3)(图 5-a)。夏季渤海中部水域强壮箭虫的平均丰度为 74.7 ind/m^3 , 其对浮游动物总丰度的贡献率达到 37.4%。最大值出现在调查水域西南部的 525 号站, 丰度高达 259.0 ind/m^3 , 最小值出现在 535 号站(7.9 ind/m^3)(图 5-b)。秋季渤海中部水域强壮箭虫的平均丰度为 16.7 ind/m^3 , 其对浮游动物总丰度的贡献率达到 39.6%。最大值出现在调查水域东南部的 539 号站, 丰度高达 55.3 ind/m^3 , 最小值出现在 501 和 528 号站(2.3 ind/m^3)(图 5-c)。冬季渤海中部水域强壮箭虫的平均丰度为 28.3 ind/m^3 , 对浮游动物总丰度的贡献率达到 39.3%。最大值出现在调查水域东南部的 539 号站, 丰度高达 125.0 ind/m^3 , 最小值出现在 520 号站(5.4 ind/m^3)(图 5-d)。

2.4 生物多样性分布特征

浮游动物香农-威纳指数的平面分布见图 6。春季渤海中部海域浮游动物 H' 平均值为 2.36, 最高值出现在调查水域西南部的 535 号站, 为 3.06; 而最低值出

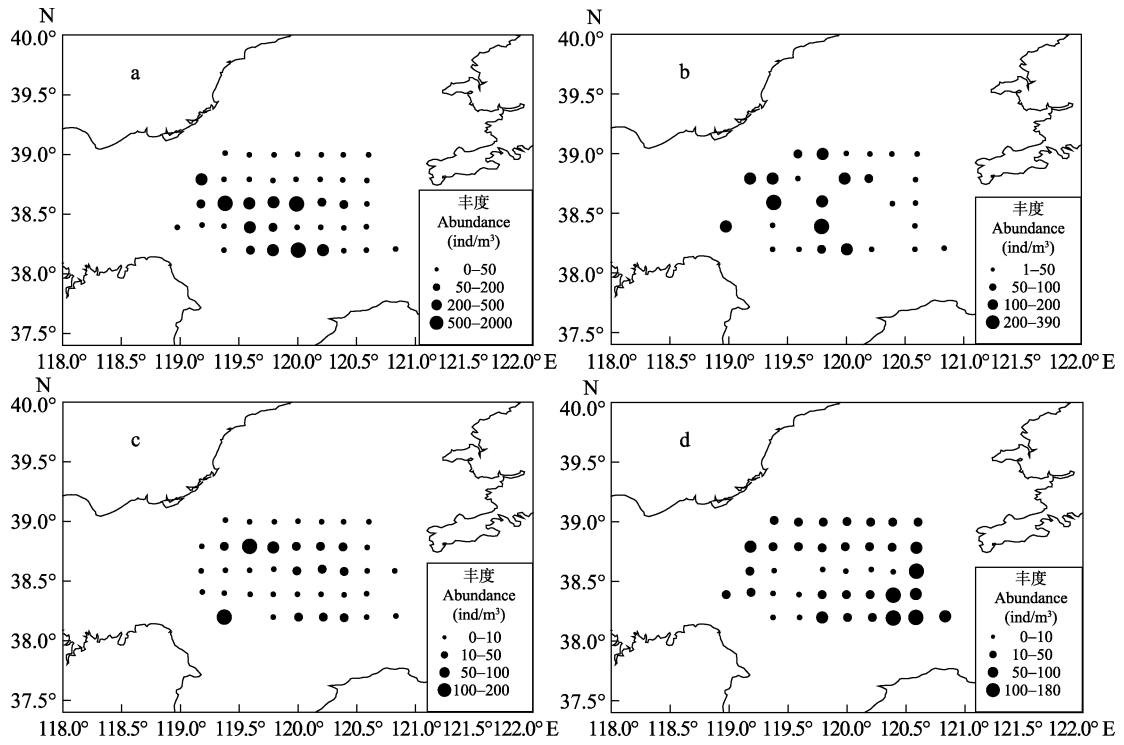


图 4 中华哲水蚤丰度平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of *C. sinicus* abundance

a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季

a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter

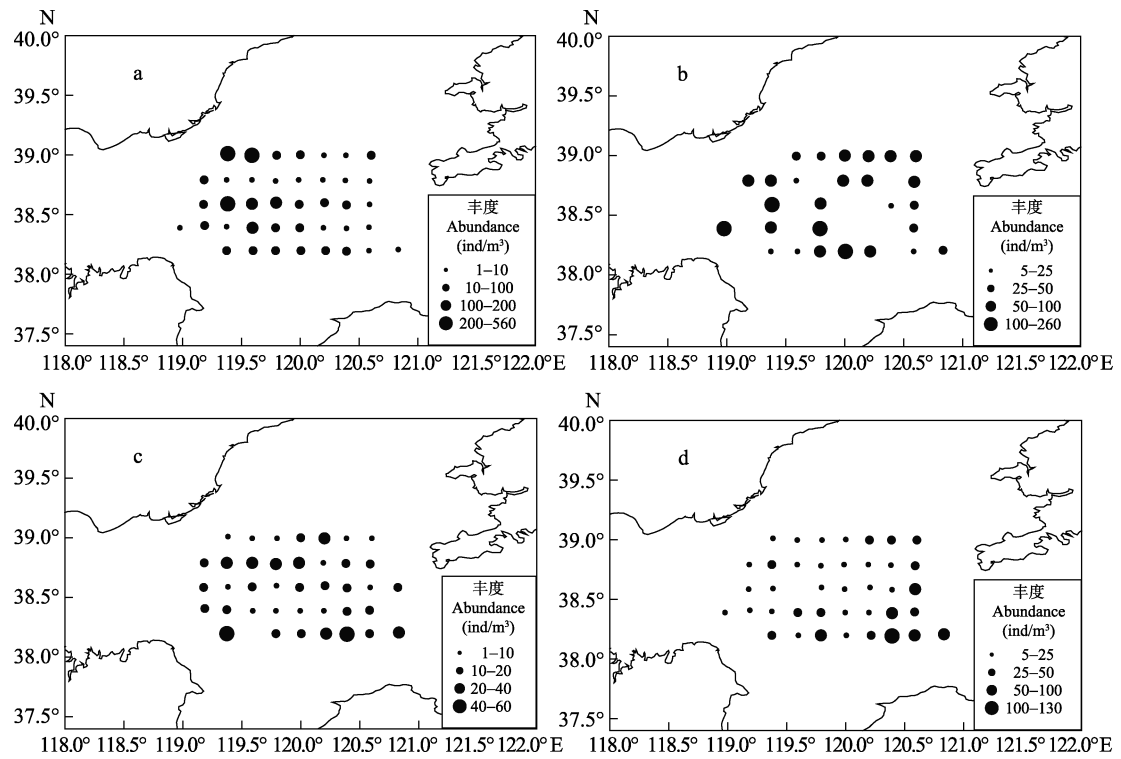


图 5 强壮箭虫丰度平面分布

Fig.5 Horizontal distribution of *S. crassa* abundance

a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季

a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter

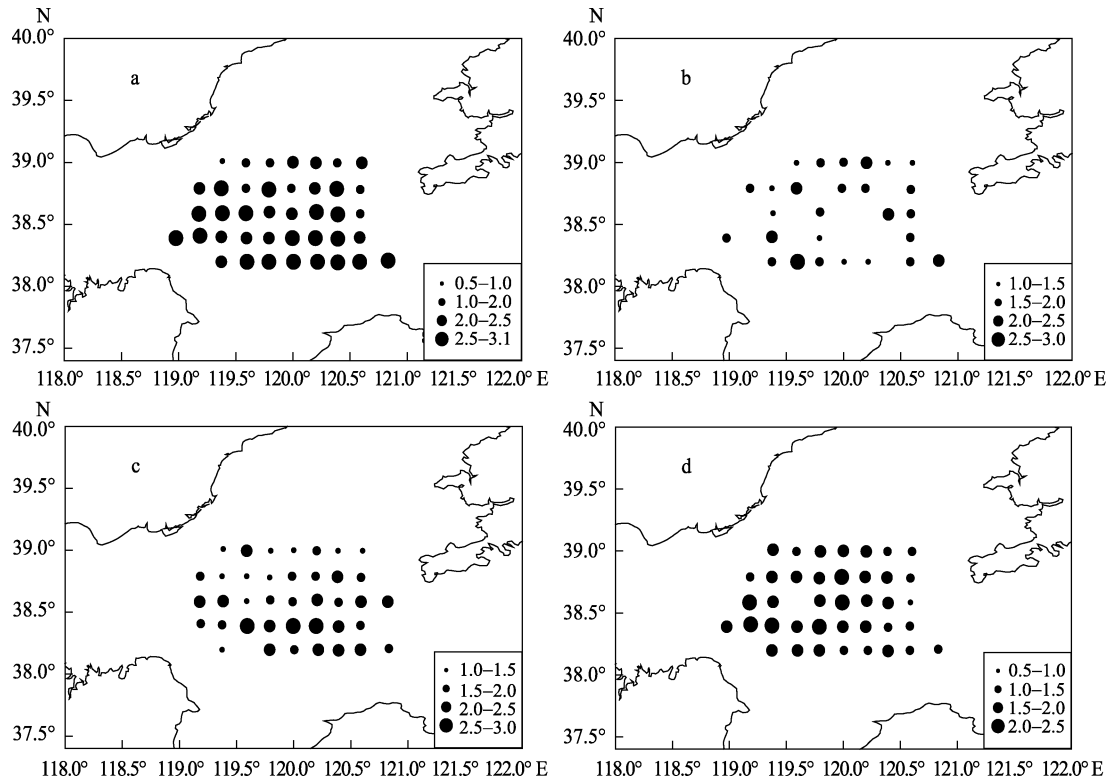


图 6 浮游动物香农-威纳指数平面分布

Fig.6 Horizontal distribution of zooplankton Shannon-Wiener index

a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季

a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter

现在研究水域西北部的 501 号站, 为 0.58 (图 6-a)。夏季渤海中部海域浮游动物 H' 平均值为 1.75, 最高值出现在调查水域西南部的 535 号站, 为 2.71; 而最低值出现在研究水域东北部的 506 号站, 为 1.15 (图 6-b)。秋季渤海中部海域浮游动物 H' 平均值为 1.83, 最高值出现在调查水域西南部的 528 号站, 为 2.96; 而最低值出现在研究水域西北部的 510 号站, 为 1.13 (图 6-c)。冬季渤海中部海域浮游动物 H' 平均值为 1.63, 最高值出现在调查水域南部的 529 号站, 为 2.34; 而最低值出现在研究水域东部的 523 号站, 为 0.92 (图 6-d)。

浮游动物物种丰富度指数的平面分布见图 7。春季浮游动物 D 平均值为 1.02, 最高值出现在调查水域东南部的 532 号站, 为 1.66; 而最低值出现在研究水域西南部的 528 号站, 为 0.59 (图 7-a)。夏季浮游动物 D 平均值为 1.78, 最高值出现在调查水域西南部的 535 号站, 为 2.77; 而最低值出现在研究水域东北部的 513 号站, 为 1.07 (图 7-b)。秋季浮游动物 D 平均值为 2.08, 最高值出现在调查水域东南部的 531 号站, 值为 3.28; 而最低值出现在研究水域西北

部的 501 号站, 为 1.18 (图 7-c)。冬季浮游动物 D 平均值为 1.53, 最高值出现在调查水域南部的 529 号站, 值为 2.96; 而最低值出现在研究水域西北部的 510 号站, 值为 0.76 (图 7-d)。

2.5 浮游动物分布与环境因子的相关性

浮游动物与环境因子间的相关性系数见表 2。单因子分析结果显示, 春季, 浮游动物丰度与水深的相关性最高 ($P < 0.05$); 夏季, 浮游动物丰度与底层盐度的相关性最高 ($P < 0.01$); 秋季, 浮游动物丰度与表层温度的相关性最高 ($P < 0.01$); 冬季, 浮游动物丰度与叶绿素的相关性最高 ($P < 0.05$)。双因子分析结果显示, 春季, 浮游动物丰度与表层盐度、水深的相关性最高 ($P < 0.05$); 夏季, 浮游动物丰度与底层温度、底层盐度的相关性最高 ($P < 0.01$); 秋季, 浮游动物丰度与表层温度、表层 pH 的相关性最高 ($P < 0.01$); 冬季, 浮游动物丰度与底层 pH、叶绿素的相关性最高 ($P < 0.01$)。三因子分析结果显示, 春季, 浮游动物丰度与表层盐度、底层溶解氧、水深的相关性最高 ($P < 0.05$); 夏季, 浮游动物丰度与底层温度、底层盐

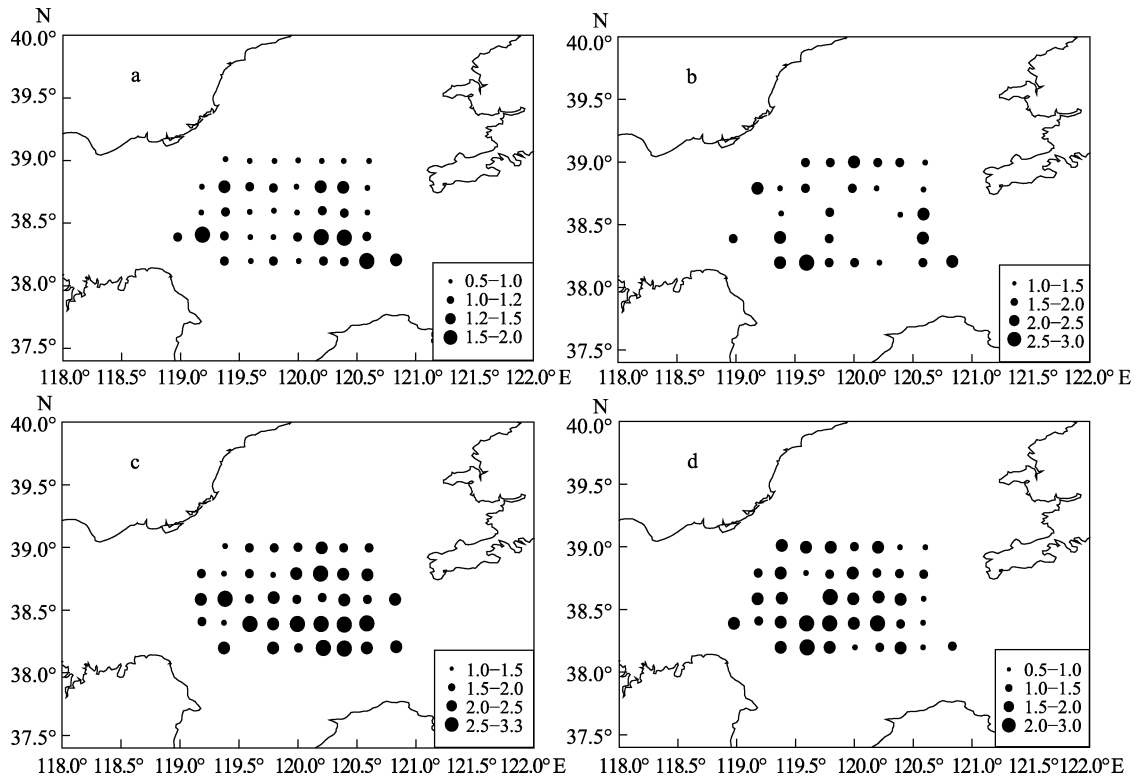


图 7 浮游动物物种丰富度指数平面分布

Fig.7 Horizontal distribution of zooplankton Margalef's index

a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季

a: spring; b: summer; c: autumn; d: winter

度、叶绿素的相关性最高($P < 0.01$); 秋季, 浮游动物丰度与表层温度、表层 pH、底层 pH 的相关性最高($P < 0.01$); 冬季, 浮游动物丰度与底层盐度、底层 pH、叶绿素的相关性最高($P < 0.05$)。四因子分析结果显示, 春季, 浮游动物丰度与表层盐度、底层盐度、底层溶解氧、水深的相关性最高($P < 0.05$); 夏季, 浮游动物丰度与底层温度、底层盐度、表层 pH、叶绿素的相关性最高($P < 0.01$); 秋季, 浮游动物丰度与表层温度、底层温度、表层 pH、底层 pH 的相关性最高($P < 0.01$); 冬季, 浮游动物丰度与底层盐度、底层 pH、水深、叶绿素的相关性最高($P < 0.05$)。在所涉及的影响因子中, 春季对浮游动物分布最重要的影响因子包括表层盐度、底层溶解氧和水深; 夏季对浮游动物分布最重要的影响因子包括底层温度、底层盐度和叶绿素; 秋季对浮游动物分布最重要的影响因子包括表层温度、表层 pH 和底层 pH; 冬季对浮游动物分布影响最重要的因子包括底层 pH 和叶绿素。

3 讨论

本研究共记录浮游动物 53 种, 浮游幼虫 21 类,

合计 74 个种类。其中, 浮游甲壳动物 28 种, 为绝对优势类群; 其次为水螅水母 15 种和浮游幼虫 21 类。毕洪生等(2000)分析了 1959 年全国海洋普查渤海海域周年的中网浮游动物样品, 共记录浮游动物 87 种, 浮游幼虫 17 类, 桡足类(30 种)是浮游动物的主要组成部分, 水母类(29 种)次之。王克等(2002)对 1998 年秋季和 1999 年春季渤海中南部海域的大网浮游动物样品进行分析, 分别记录浮游动物 46 种和 23 种, 浮游幼虫 13 类和 10 类。张武昌等(2002)对 1998 年秋季和 1999 年春季渤海中南部海域的浮游动物中网样品进行研究, 分别记录了浮游动物 47 种和 27 种。杜明敏等(2013)对渤海 2006–2007 年 908 专项调查 4 个航次的浮游动物样品进行分析, 春季, 共记录浮游动物 21 种, 浮游幼虫 4 类; 夏季, 共记录浮游动物 59 种, 浮游幼虫 16 类; 秋季, 共记录浮游动物 39 种, 浮游幼虫 9 类; 冬季, 共记录浮游动物 22 种, 浮游幼虫 3 类。本研究结果与同期历史数据相比(毕洪生等, 2000; 王克等, 2002; 杜明敏等, 2013), 浮游动物成体种类数有所下降, 但种类组成仍是以桡足类和水螅水母为主, 且浮游幼虫的种类数差别不大。

王克等(2002)分析 1998 年和 1999 年渤海中南部

表 2 浮游动物与环境因子的相关性

Tab.2 Correlation between zooplankton abundance and environmental variables

因子 Variable	非生物参数 Abiotic parameters	Spearman 相似性系数 ρ_s			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
单因子 Single variable	表层温度 Temperature of surface layer	0.051	0.013	0.235**	-0.046
	底层温度 Temperature of bottom layer	0.007	0.139	0.134	-0.065
	表层盐度 Salinity of surface layer	0.060	0.056	0.007	0.028
	底层盐度 Salinity of bottom layer	0.009	0.270**	-0.016	0.048
	表层溶解氧 DO of surface layer	0.116	-0.132	0.004	-0.086
	底层溶解氧 DO of bottom layer	0.062	-0.111	0.064	-0.114
	表层 pH pH of surface layer	-0.033	0.111	0.235	-0.025
	底层 pH pH of bottom layer	0.037	-0.078	0.206	0.067
	水深 Water depth	0.128*	-0.023	-0.030	0.038
	叶绿素 Chlorophyll	0.053	0.070	0.010	0.156*
双因子 Two variables	表层温度/表层 pH Temperature/pH of surface layer			0.320**	
	表层盐度/水深 Salinity of surface layer/Water depth	0.146*			
	底层温度/底层盐度 Temperature/salinity of bottom layer		0.371**		
三因子 Three variables	底层 pH/叶绿素 pH/chlorophyll of bottom layer				0.199**
	表层温度/表层 pH/底层 pH Temperature/pH of surface layer and pH of bottom layer			0.344**	
	表层盐度/底层溶解氧/水深 Salinity of surface layer/DO of bottom layer/Water depth	0.150*			
	底层温度/底层盐度/叶绿素 Temperature and salinity of bottom layer/chlorophyll		0.421**		
	底层盐度/底层 pH/叶绿素 Salinity and pH of bottom layer/chlorophyll				0.167*
四因子 Four variables	表层温度/底层温度/表层 pH/底层 pH Temperature and pH of surface layer and bottom layer			0.319**	
	表层盐度/底层盐度/底层溶解氧/水深 Salinity of surface layer/salinity and DO of bottom layer/water depth	0.140*			
	底层温度/底层盐度/表层 pH/叶绿素 Temperature and salinity of bottom layer/pH of surface layer/chlorophyll		0.419**		
	底层盐度/底层 pH/水深/叶绿素 Salinity and pH of bottom layer/water depth/chlorophyll				0.146*

* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ * denoted $P < 0.05$; ** denoted $P < 0.01$

海域大网的浮游动物样品,发现桡足类和强壮箭虫是春季和秋季渤海中南部海域的优势种类。本研究结果与其相似,浮游动物优势种类主要有中华哲水蚤和强壮箭虫等。2013 年全年浮游动物总丰度与主要优势种的丰度趋势大体相同,说明浮游动物总丰度的分布主要受中华哲水蚤和强壮箭虫等优势种的影响。本研究中,秋季渤海中部海域浮游动物总丰度较低,其平均值仅为 42.1 ind/m^3 ,这主要是由于夜光虫(*Noctiluca scientillans*)广泛、大量地分布所导致。根据秋季航次的同步调查数据显示,夜光虫在调查站位出现的频率为 100%,其最大值出现在调查水域东南部的 539 号站,丰度高达 5120.0 ind/m^3 ,该物种的平均丰度达到

501.6 ind/m^3 。渤海中部海域春季和秋季的浮游动物湿重生物量分别为 157.1 、 122.5 mg/m^3 。本研究结果与同期历史数据相比(白雪娥等, 1991; 王克等, 2002),渤海中部浮游动物的丰度和生物量均有所下降。

渤海中部浮游动物 H' 在春季为 2.36、夏季为 1.75、秋季为 1.83、冬季为 1.63,多样性指数全年大部分时间均低于 2,说明渤海中部调查海域处于中度污染状态。主要是由于渤海属于封闭性内海,三面环陆,长期受陆源污染物排放的影响。同时,2011 年发生的渤海蓬莱 19-3 油田重大溢油事故,污染海域达到了 6200 km^2 ,溢油油污沉积物污染面积达到了 1600 km^2 ,该事故对渤海海区生态环境影响显著

(陈涛, 2013)。国家应继续大力推进渤海生态环境修复治理工作, 争取使渤海早日恢复为昔日的海上粮仓。

浮游动物的种类组成和分布特征与水温、盐度、水团、溶解氧、叶绿素和 pH 等生态因子密切相关(郑重等, 1984、1992; Froneman, 2004; 陈洪举, 2007¹⁾; 朱延忠, 2008²⁾; 朱延忠等, 2008; 杜明敏等, 2013)。渤海是半封闭的内海, 黄河、海河和其他河流均注入渤海, 由于地处温带, 渤海具有明显的季节变化(张武昌等, 2002; 曾呈奎等, 2003)。渤海水团常年分布于渤海中部及渤海海峡, 是黄海混合水进入渤海与沿岸低盐水混合变性而成, 该水团在渤海的范围最大, 盐度最高, 温度季节变化明显。因此, 渤海海水和淡水的混合与温度的季节变化是影响浮游动物群落的重要因子(王克等, 2002; 曾呈奎等, 2003)。杜明敏等(2013)根据中国近海 2006–2007 年 908 专项调查总计 4 个航次的浮游动物样品鉴定结果分析发现, 春季水温和盐度是解释浮游动物群落结构的最佳环境因子组合; 夏季水温、盐度和水深是解释浮游动物群落结构的最佳环境因子组合; 秋季水温、盐度、水深和 pH 等均对中国近海浮游动物群落结构造成一定程度的影响; 冬季水温和盐度是解释浮游动物群落结构的最佳环境因子组合。本研究结果与其类似, 浮游动物丰度和环境因子的相关性分析结果显示, 春季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为表盐、底溶解氧和水深; 夏季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为底温、底盐和叶绿素; 秋季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为表温、表 pH 和底 pH; 冬季影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子组合为底 pH 和叶绿素。

参 考 文 献

- 马静, 陈洪举, 刘光兴. 2007 年夏季黄河口及其邻近水域浮游动物的群落特征. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 74–80
- 王宇, 房恩军, 郭彪, 等. 渤海湾天津海域春季浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 海洋渔业, 2014, 36(4): 300–305
- 王克, 张武昌, 王荣, 等. 渤海中南部春秋季节浮游动物群落结构. 海洋科学集刊, 2002(44): 34–42
- 王彬, 董婧, 刘春洋, 等. 夏初辽东湾海蜃放流区大型水母和主要浮游动物. 渔业科学进展, 2010, 31(5): 82–90
- 白雪娥, 庄志猛. 渤海浮游动物生物量及其主要种类数量变动的研究. 海洋水产研究, 1991, 12: 71–92
- 毕洪生, 孙松, 高尚武, 等. 渤海浮游动物群落生态特点 I. 种类组成与群落结构. 生态学报, 2000, 20(5): 715–721
- 朱延忠, 陈洪举, 刘光兴. 福建沙埕港浮游动物群落特征及影响因子. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(6): 943–950
- 齐衍萍, 陈洪举, 朱延忠, 等. 福建罗源湾浮游动物群落特征. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 39–46
- 杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化. 生态学报, 2013, 33(17): 5407–5418
- 张武昌, 王克, 高尚武, 等. 渤海春季和秋季的浮游动物. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 630–639
- 陈涛. 渤海溢油事件的社会影响研究. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2013(5): 28–33
- 郑重, 李少菁, 许振祖. 海洋浮游生物学. 北京: 海洋出版社, 1984, 139–571
- 郑重, 李少菁, 连光山. 海洋桡足类生物学. 厦门: 厦门大学出版社, 1992, 126–163
- 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鳕渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13–15
- 高文胜, 刘宪斌, 张秋丰, 等. 渤海湾近岸海域浮游动物多样性. 海洋科学, 2014, 38(4): 55–60
- 彭荣, 左涛, 万瑞景, 等. 春末夏初莱州湾浮游动物生物量谱及潜在鱼类生物量的估算. 渔业科学进展, 2012, 33(1): 10–16
- 曾呈奎, 徐鸿儒, 王春林. 中国海洋志. 郑州: 大象出版社, 2003, 145–146
- Froneman PW. Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary. Estuar Coast Shelf S, 2004, 60(1): 125–132
- Margalef R. Information theory in ecology. Int J Gen Syst, 1958 (3): 36–71
- Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. IL: The University of Illinois Press, 1949, 1–125
- Souissi S, Ibanez F, Hamadou RB, et al. A new multivariate mapping method for studying species assemblages and their habitats: example using bottom trawl surveys in the Bay of Biscay (France). Sarsia, 2001, 86(6): 527–542

(编辑 马瑾艳)

1) 陈洪举. 长江口及其邻近海域浮游动物群落生态学研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2007, 53–68

2) 朱延忠. 夏、冬季北黄海大中型浮游动物群落生态学研究. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2008, 43–72

The Ecological Characteristics of Zooplankton in the Central Bohai Sea

XU Donghui, SUN Xuemei, CHEN Bijuan^①, XIA Bin, CUI Zhengguo,

ZHAO Jun, JIANG Tao, LIU Chuanxia, QU Keming

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,
Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-Environment, Yellow Sea Fisheries
Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract Studies on the species, abundance and distribution of zooplankton have been extensive and mainly focused on either the entire or certain small parts of the Bohai Sea. In this study, we analyzed the composition, abundance, dominant species, and biodiversity of zooplankton based on samples collected in the central Bohai Sea in 2013. The distribution and its influencing factors were explored with multivariate analysis according to the sampling date and environmental parameters. A total of 74 zooplankton species/taxa (including 21 pelagic larvae) were identified in four surveys. Copepods were the most abundant species. The numbers of pelagic copepod and medusa species accounted for 25.7% and 24.3% of the total species respectively. The composition of the dominant species was consistent with previous reports. The *Calanus sinicus* and *Sagitta crassa* were the dominant species. The abundance of *C. sinicus* and *S. crassa* explained 19.5%–50.3% and 7.3%–39.6% of the total zooplankton abundance respectively. In spring, the average abundance, the average biomass, the Shannon-Wiener index (H'), and the Margalef's index (D) were 782.0 ind/m³, 157.1 mg/m³, 2.36, and 1.02 respectively. In summer, the values of parameters above were 199.6 ind/m³, 135.8 mg/m³, 1.75, and 1.78. In autumn, they were 42.1 ind/m³, 122.5 mg/m³, 1.83, and 2.08 respectively. In winter, they were 72.1 ind/m³, 151.1 mg/m³, 1.63, and 1.53 respectively. The abundance and biomass fluctuated and showed distinct heterogeneity in the central part of the Bohai Sea. There was a seasonal variation in the primary environmental factors that affected the distribution of zooplankton. In spring, they were surface salinity, bottom DO, and water depth. In summer, they were bottom temperature, bottom salinity, and chlorophyll. In autumn, they were surface temperature, surface pH, and bottom pH. In winter, they were bottom pH and chlorophyll. Our research provided the fundamental information on the long-term observation of zooplankton ecology in the central part of the Bohai Sea. Compared to the data collected in 1959, 1998, and 2006, the number of species, abundance and biomass of zooplankton have decreased.

Key words Bohai Sea; Zooplankton; Species composition; Diversity

① Corresponding author: CHEN Bijuan, E-mail: chenbj@ysfri.ac.cn