

2014 年秋季渤、黄海浮游动物的群落结构与分布特征

王珊珊^{1,2}, 李浩然^{1,3,4}, 陈洪举^{1,2}, 刘光兴^{1,2}, 庄昀筠^{1,2*}

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋生态与环境科学功能实验室 山东 青岛 266200; 3. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室 湖北 武汉 430072; 4. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为了解渤、黄海秋季浮游动物群落的结构和分布特征及其与环境因子的关系, 于 2014 年 11 月在南黄海、北黄海和渤海采集浮游动物样品, 研究了浮游动物的种类组成、丰度、生物量、优势种、生物多样性和分布情况等。结果表明: 研究海域共记录浮游动物成体 70 种, 浮游幼虫 22 类, 3 个海域的浮游动物种类组成、丰度和生物量均存在差异, 种类数和多样性指数均以南黄海最高。南黄海、北黄海和渤海的浮游动物平均丰度 (不包含夜光虫) 分别为 225.5, 295.1 和 128.2 ind/m³, 高丰度主要分布在南黄海冷水团海域。南黄海、北黄海和渤海分别有 6, 5 和 4 个优势种, 其中中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 和强壮箭虫 (*Sagitta crassa*) 是 3 个海区共有的优势种。调查海域的浮游动物优势种在水平分布格局上可划分为 4 种类型。聚类分析表明, 渤、黄海的浮游动物可划分为渤海及黄海近岸群落、黄海北部及中部群落和黄东海交汇水混合群落。冗余分析显示, 对浮游动物群落影响显著的环境因子为表层盐度。

关键词: 渤海; 黄海; 浮游动物; 群落结构; 分布特征; 环境因子

中图分类号: P 735 **文献标志码:** A

浮游动物是海洋生态系统的关键环节, 具有连接初级生产者和高营养级的枢纽作用^[1], 其群落结构的变化会对海洋生态系统的结构和功能产生直接或间接的影响^[2]。浮游动物作为多种仔稚鱼的主要饵料, 其时空分布是评价渔业资源的重要指标^[3], 而且浮游动物生命周期短, 对环境变化反应敏感, 其群落动态可以良好地指示气候变化^[4-5]。

渤海和黄海是典型的北温带半封闭陆架海区, 受到黄海冷水团、径流冲淡水、黄海暖流和多个沿岸流的影响。同时, 渤、黄海分布着众多渔场, 是多种经济鱼类的产卵场、索饵场及重要栖息地; 秋季处于季风交换期, 此时黄海冷水团开始消退, 黄海暖流逐渐形成^[6], 水文环境复杂, 对于浮游动物的影响不可忽视, 因此了解秋季渤、黄海浮游动物的群落特征对于评估渔业资源和研究海洋生态系统动力学具有重要意义。目前关于渤、黄海秋季浮游动物的研究已有较多的报道。王克等^[7]和张武昌等^[8]分别使用中国普查大

收稿日期: 2020-08-19 录用日期: 2020-12-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41876156)

*通信作者: yunyun.zhuang@ouc.edu.cn

网和中网研究了渤海浮游动物的种类组成、丰度和优势种。邹艺伟等^[9]使用浅水 I 型和 II 型两种网型采集了北黄海秋季浮游动物，并对其群落特征进行了年间比较。陈学超等^[10]利用中型浮游生物网分析了 2014 年春季和秋季南黄海浮游动物的群落结构变化及其与环境因子的关系。李雨苑等^[11]使用 WP2 网探究了 2012 年秋季黄海浮游动物的群落结构并进行了群落划分。以往的调查范围多是将渤海、北黄海和南黄海分开研究，针对全海域的大范围研究不多，且使用的网型不同难以在海区之间进行比较。

本研究对比分析了 2014 年秋季渤海、北黄海和南黄海浮游动物群落的种类组成、丰度、生物多样性、优势种类和分布情况，并对 3 个海区的浮游动物群落结构进行划分，探讨海区间浮游动物群落差异，同时分析了浮游动物与环境因子之间的关系。本文旨在前人研究的基础上，进一步加深对渤、黄海浮游动物群落的了解，为渤、黄海浮游动物的生态学研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查海区和站位设置

于 2014 年 11 月 7—27 日乘“东方红 2”号科学考察船，在渤、黄海（118.88°~124.81° E，31.19°~39.85° N）采集浮游动物样本。共设置 54 个采样站位，其中南黄海、北黄海和渤海海区分别设置了 23，18 和 13 个站位（图 1）。

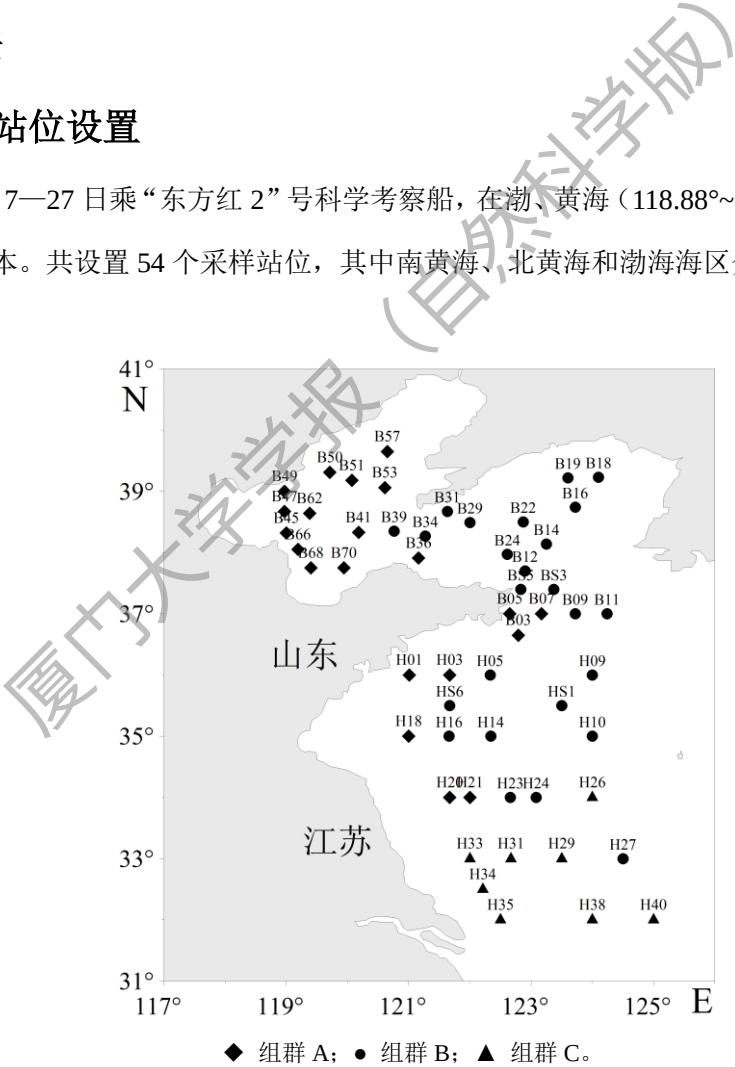


图 1 调查站位及浮游动物组群分布

Fig. 1 Sampling stations and distribution of zooplankton groups

1.2 环境数据和浮游动物样品的获取

浮游动物样品使用大型浮游生物网（网口内径 80 cm，筛绢孔径 505 μm ）以 0.8~1.0 m/s 的速度由底至表垂直拖网采集。滤水体积利用网口面积乘以垂直拖网距离估算得到。样品保存于 5%福尔马林海水溶液中，实验室内利用体视显微镜（江南 JSZ5 型）对浮游动物进行种类鉴定和计数，并采用电子天平（JA2003N，上海精密仪器仪表有限公司）测定各采样站位的湿重生物量。

在调查站位采集不同深度的海水经 GF/F 滤膜（Whatman）过滤后用铝箔包裹冻存于液氮中，用于叶绿素 a 含量分析。实验室内将叶绿素 a 样品滤膜用 90%的丙酮溶液在 4℃、避光条件下萃取 24 h，用荧光分光光度计（F-4500，HITACHI，日本）测定叶绿素 a 浓度。各调查站位的海水温度、盐度等环境数据由 CTD（SeaBird911）现场测得。

1.3 数据处理与分析

浮游动物的丰度和湿重生物量根据采样时的滤水体积，以每立方米水体中个体数和湿重（ind/m³，mg/m³）表示。

水柱平均叶绿素 a 的浓度 ρ_s 来表示各站位叶绿素 a 的浓度（ $\mu\text{g/L}$ ），计算公式如下：

$$\rho_s = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\rho_{vi} + \rho_{vi+1}}{2 \cdot Z_{\max}} \cdot (D_{i+1} - D_i) \quad (1)$$

式中， ρ_{vi} 为第 i 层叶绿素 a 质量浓度（ $\mu\text{g/L}$ ）， D_i 为第 i 层的深度（m）， n 为取样层次数， $1 \leq i \leq n-1$ ， $Z_{\max}$ 为最大采样深度（m）。

浮游动物群落的生物多样性指数采用香农—威纳多样性指数。浮游动物优势度（ Y ）和香农—威纳指数（ H' ）^[13]计算公式为：

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i \quad (2)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log P_i \quad (3)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (4)$$

式中： n_i 为第 i 种的丰度， N 为所有种类总丰度， f_i 为第 i 种出现频率，以 Y 值 ≥ 0.02 的种类为优势种^[14]。

累积优势度曲线（K-dominance curve）是将各个种的浮游动物丰度由大到小排序，之后将丰度的累积百分数作图，以直观地表示浮游动物群落的物种均匀度和丰度百分比^[15]。

应用 Surfer 8 软件绘制站位图、丰度及生物量分布图。应用 PRIMER 6 软件的 CLUSTER 程序进行聚类分析，Dominance plot 程序绘制累计优势度曲线，SIMPER 程序鉴定各组群内的相似性以及分析每个组群中各浮游动物种类的贡献率。应用 CANOCO 5 软件进行浮游动物与环境因子之间的冗余分析（redundancy analysis, RDA），通过蒙特卡罗置换检验（Monte-Carlo permutation test）进行显著性分析。应用 SPSS 25 软件进行浮游动物丰度与环境因子之间的皮尔森（Pearson）相关性分析。

2 结果与分析

2.1 调查海域的水文环境及叶绿素 a 分布

调查期间，黄、渤海表层及底层温度呈现由北向南逐渐升高的趋势，秋季黄海冷水团正逐渐消退，但仍在辽东半岛南部和南黄海北部存在冷水区，北黄海底层温度在 3 个海区中最低。表、底层盐度分布规律均呈现由近岸向远海升高的趋势（图 2）。南黄海、北黄海和渤海的平均叶绿素 a 浓度分别为 0.2，0.5 和 0.3 $\mu\text{g/L}$ ，北黄海叶绿素 a 平均浓度在 3 个海区中最高，高值区位于鸭绿江近岸海域。

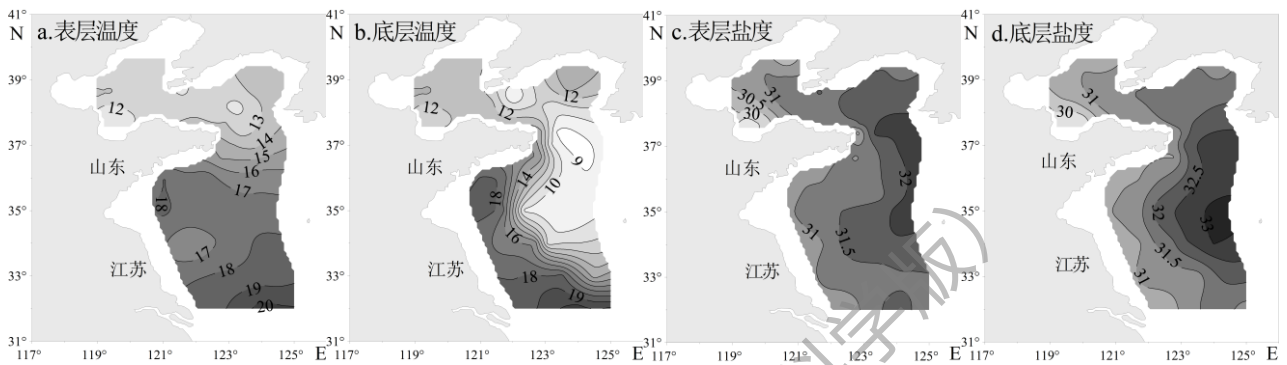


图 2 调查海域的海水温度（℃）和盐度水平分布

Fig. 2 Distribution of seawater temperature (°C) and salinity of the survey area

2.2 浮游动物群落的种类组成

本研究共记录浮游动物成体 70 种，浮游幼虫 22 类。其中浮游动物成体包括原生动物 1 种，刺胞动物 18 种，栉水母动物 2 种，介形类 2 种、枝角类 1 种，桡足类 21 种，等足类 1 种，端足类 2 种，涟虫类 1 种，糠虾类 6 种，磷虾类 3 种，十足类 4 种，毛颚类 5 种，被囊类 3 种。所有浮游动物中浮游幼虫种类数占比最高，达 23.9%；其次为桡足类和刺胞动物，占比分别为 22.8%和 19.6%（表 1）。

表 1 浮游动物种类组成及丰度

Tab. 1 Zooplankton species composition and abundance

门类	类群	南黄海		北黄海		渤海		全海域	
		平均丰度/ (ind·m ⁻³)	种类数	平均丰度/ (ind·m ⁻³)	种类数	平均丰度/ (ind·m ⁻³)	种类数	平均丰度/ (ind·m ⁻³)	种类数
原生动物		65.8	1	30.7	1	586.2	1	179.4	1
刺胞动物		4.1	16	1.0	8	2.0	5	2.5	18
栉水母动物		0.6	2	0.2	1	2.2	1	0.9	2
	介形类	0.2	2	-	-	-	-	<0.1	2
	枝角类	<0.1	1	-	-	-	-	<0.1	1
	桡足类	71.5	19	110.5	12	21.2	6	72.3	21
	等足类	<0.1	1	<0.1	1	<0.1	1	<0.1	1
节肢动物	端足类	3.3	2	10.8	2	0.7	2	5.2	2
	涟虫类	<0.1	1	-	-	<0.1	1	<0.1	1
	糠虾类	0.7	4	0.1	2	<0.1	3	0.4	6
	磷虾类	4.4	3	3.5	2	0.1	1	3.1	3
	十足类	0.3	3	<0.1	1	<0.1	2	0.2	4

毛颚动物	毛颚类	70.1	5	128.5	2	74.4	1	90.6	5
被囊动物	被囊类	45.6	3	23.0	3	1.4	2	27.4	3
浮游幼虫		24.9	22	17.5	17	26.7	11	22.9	22
合计		291.3	85	325.8	52	715.0	37	404.8	92

注：“—”表示该类群未出现。

2.3 浮游动物群落的丰度及生物量

调查海域浮游动物平均丰度（不含夜光虫 *Noctiluca scintillans*）为 225.5 ind/m³，高值区分布在黄海冷水团海域，丰度最高值位于北黄海 B11 站（679.0 ind/m³），丰度最低值位于北黄海 B03 站（40.9 ind/m³）。调查海域桡足类占据浮游动物总丰度的 32.1%，丰度最高值位于黄海冷水团区域的 B11 站（270.6 ind/m³），最低值位于渤海的 B70 站丰度（5.4 ind/m³）；毛颚类是丰度最高的类群，占据浮游动物总丰度的 40.2%，丰度最大值也出现在 B11 站（397.5 ind/m³），最小值出现在 H26 站（6.2 ind/m³）(图 3)。3 个海区的丰度均主要由桡足类和毛颚类贡献，桡足类分别占南黄海、北黄海和渤海浮游动物总丰度的 31.7%，37.4%和 16.5%，毛颚类分别占南黄海、北黄海和渤海浮游动物总丰度的 31.1%，43.5%和 58.0%。

调查海域浮游动物的湿重生物量平均值为 190.8 mg/m³，南黄海、北黄海和渤海生物量平均值分别为 148.6、271.9 和 153.1 mg/m³，生物量高值区分布在渤海中部和南黄海北部，最大值出现在该区域的 B09 站，为 976.5 mg/m³，最小值出现在 B03 站，仅 0.9 mg/m³（图 3）。

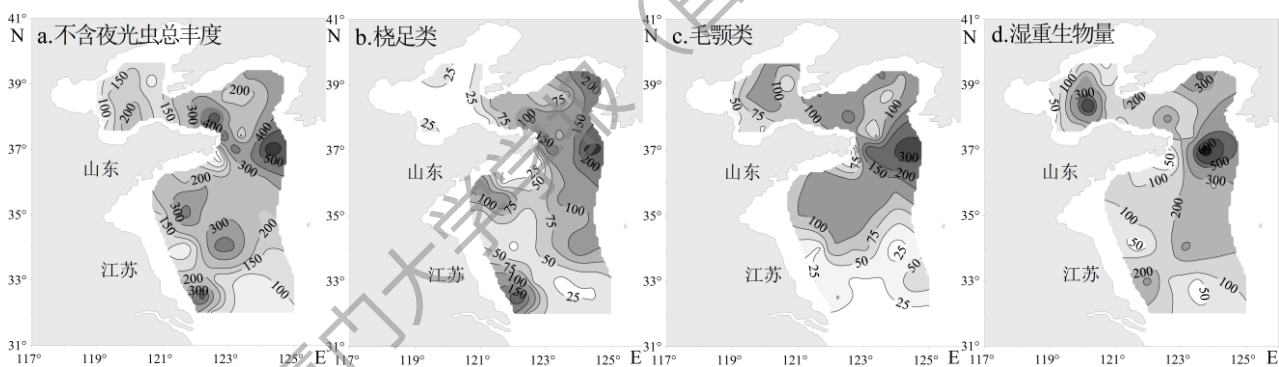


图 3 浮游动物总丰度（ind/m³）和湿重生物量（mg/m³）平面分布

Fig. 3 Distribution of the zooplankton total abundance (ind/m³) and wet weight biomass (mg/m³)

2.4 浮游动物群落的优势种组成

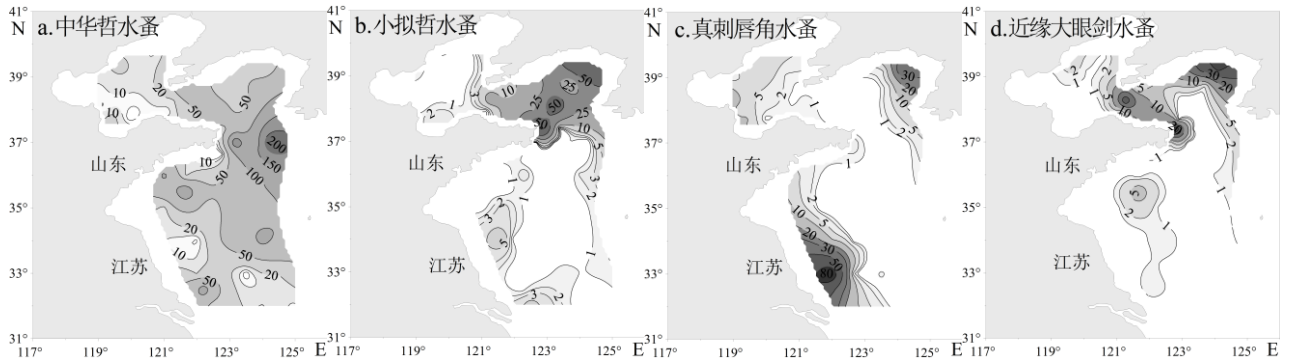
本次调查海域的优势种共有 10 种，其中南黄海的优势种有 6 种，包括中华哲水蚤（*Calanus sinicus*）、真刺唇角水蚤（*Labidocera euchaeta*）、强壮箭虫（*Sagitta crassa*）、长尾住囊虫（*Oikopleura longicauda*）、小齿海樽（*Doliolum denticulatum*）和舌贝幼虫（*Lingula larvae*）；北黄海的优势种有 5 种，包括中华哲水蚤、小拟哲水蚤（*Paracalanus parvus*）、近缘大眼剑水蚤（*Corycaeus affinis*）、细长脚蛾（*Themisto gracilipes*）和强壮箭虫；渤海的优势种有 4 种，包括中华哲水蚤、真刺唇角水蚤、强壮箭虫和双壳类幼体（*Bivalva larvae*）（表 2）。

表 2 浮游动物优势种及优势度
Tab. 2 Dominant species and their dominance of zooplankton

优势种	平均丰度/ind·m ⁻³			优势度			出现频率/(%)		
	南黄海	北黄海	渤海	南黄海	北黄海	渤海	南黄海	北黄海	渤海
中华哲水蚤	51.1	67.3	12.5	0.227	0.228	0.097	100.0	100.0	100.0
小拟哲水蚤	1.2	25.8	0.9	<0.01	0.073	<0.01	47.8	83.3	61.5
真刺唇角水蚤	9.1	3.0	6.2	0.025	<0.01	0.048	60.9	38.9	100.0
近缘大眼剑水蚤	1.0	10.5	1.0	<0.01	0.032	<0.01	78.3	88.9	92.3
细长脚蛾	3.1	10.2	0.6	0.012	0.033	<0.01	87.0	94.4	46.2
强壮箭虫	68.2	128.5	74.4	0.303	0.435	0.577	100.0	100.0	100.0
长尾住囊虫	11.9	17.8	<0.01	0.023	<0.01	<0.01	43.5	11.1	7.7
小齿海樽	32.8	0.6	-	0.089	<0.01	-	60.9	27.8	-
双壳类幼体	0.8	11.0	25.5	<0.01	0.010	0.198	56.5	27.8	100.0
腕足类舌贝幼虫	14.9	-	-	0.037	-	-	56.5	-	-

注：数字加粗为优势种；“—”表示该类群未出现。

中华哲水蚤在 3 个海区都为优势种，占调查海域浮游动物总丰度的 20.9%，主要分布在黄海冷水团影响的区域和长江口北部海域。小拟哲水蚤仅在北黄海为优势种，在北黄海中部、鸭绿江口附近水域存在 2 个高值区，在南黄海、渤海丰度均很低。真刺唇角水蚤为南黄海和渤海的优势种，丰度较低，主要分布在近岸水域，在外海几乎没有分布。近缘大眼剑水蚤为北黄海的优势种，在山东半岛东部近岸水域和鸭绿江口附近水域存在 2 个高值区。细长脚蛾在北黄海分布较为均匀，在南黄海的部分站位也有发现但丰度较低，而在渤海鲜有发现。强壮箭虫也是 3 个海区共有优势种，占调查海域浮游动物总丰度的 39.8%，主要聚集在黄海冷水团区域。长尾住囊虫仅在南黄海成为优势种，虽然北黄海的平均丰度高于南黄海，但由于其出现频率很低，所以未成为北黄海的优势种。小齿海樽为南黄海的优势种，主要集中分布在南黄海中部水域，北黄海的个别站位也发现小齿海樽的存在但丰度均很低，在渤海未发现。双壳类幼体集中分布在渤海，在莱州湾东部近岸存在高值区，在山东半岛东部近岸水域存在次高值区，在南黄海则鲜有发现。腕足类舌贝幼虫在仅在南黄海出现并成为这一海区的优势种，分布呈现由长江口东北部近岸向远海递减的分布趋势（图 4）。



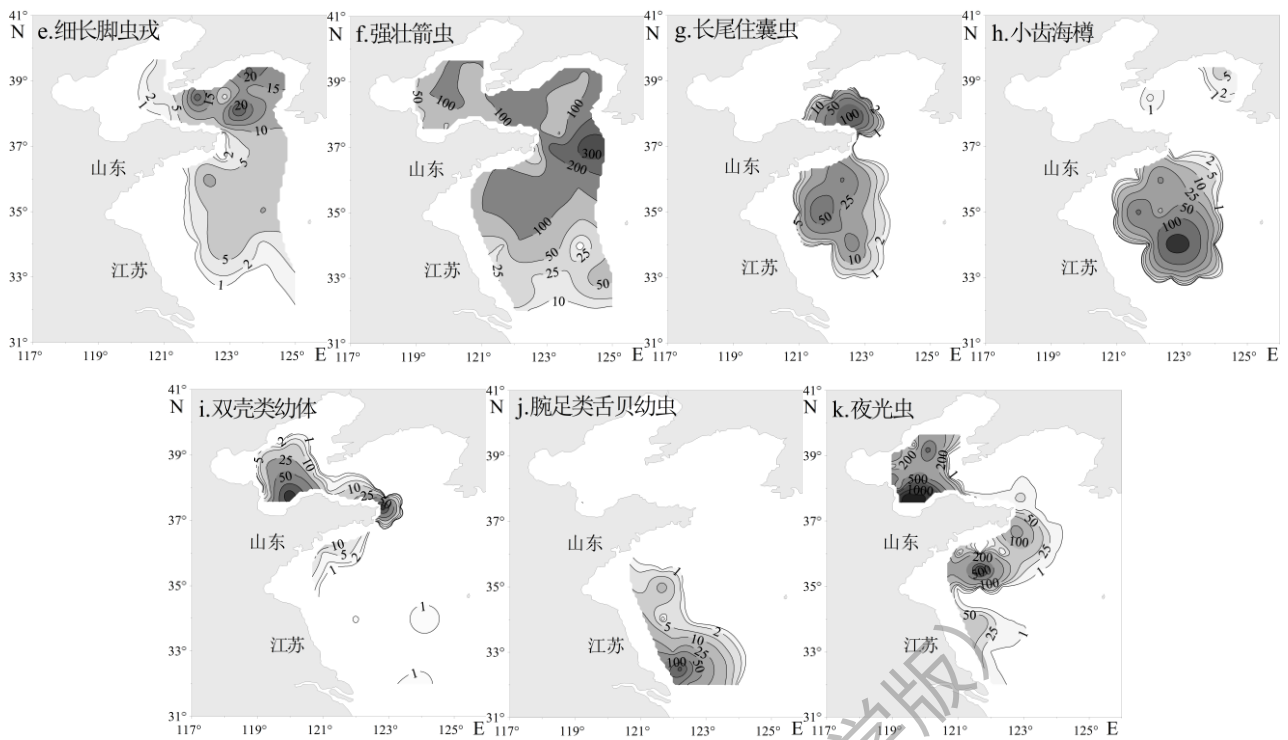


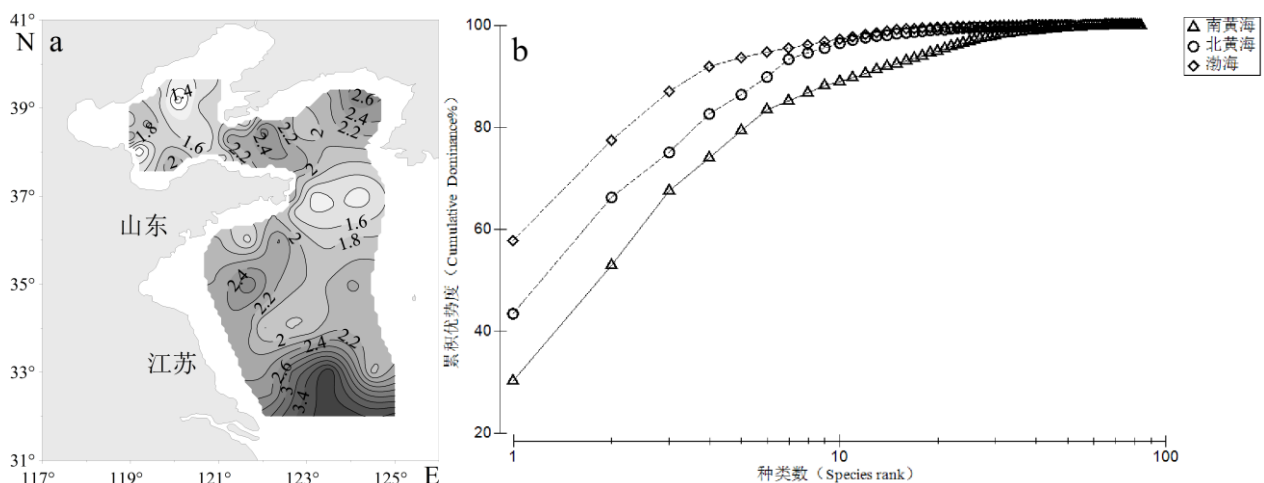
图 4 浮游动物优势种和夜光虫的水平分布 (ind/m³)

Fig. 4 Horizontal distribution of dominant species and *Noctiluca scintillans* (ind/m³)

2.5 浮游动物群落多样性分析

调查海域的浮游动物多样性指数范围为 0.9~3.8，最高值出现在 H29 站，最低值出现在 B57 站，平均值为 2.1，多样性指数高值区分布在黄海南部长江口沿岸和鸭绿江口邻近海域（图 5(a)）。南黄海、北黄海和渤海的多样性指数平均值分别为 2.4、1.9 和 1.6。

累计优势度曲线显示 3 个海区优势度最高单种所占丰度百分比差异明显，渤海最高，北黄海次之，南黄海最低。南黄海优势度最高单种为中华哲水蚤，丰度占比为 22.7%；北黄海和渤海优势度最高单种均为强壮箭虫，丰度占比分别为 43.5%和 57.7%。总体来看，渤海的浮游动物累积优势度最高，北黄海次之，南黄海最低（图 5(b)）。



(a) 香农-威纳指数分布；(b) K-优势度曲线（去除夜光虫）。

图 5 浮游动物多样性分析
Fig.5 Diversity analysis of zooplankton

2.6 浮游动物群落聚类分析

根据各物种丰度（包含夜光虫）进行聚类分析，结果将渤、黄海划分为 3 个组群（图 6）。组群 A 包含渤海大部分站位及南黄海沿岸的部分站位，盐度较低，水深较浅；组群 B 包含北黄海的大部分水域和渤海的个别站位，底层平均水温低于 12 ℃，水深在 3 个组群中最深，叶绿素 a 浓度较高；组群 C 的分布于南黄海南部，水域底、表温度均较高（图 1 和表 3）。

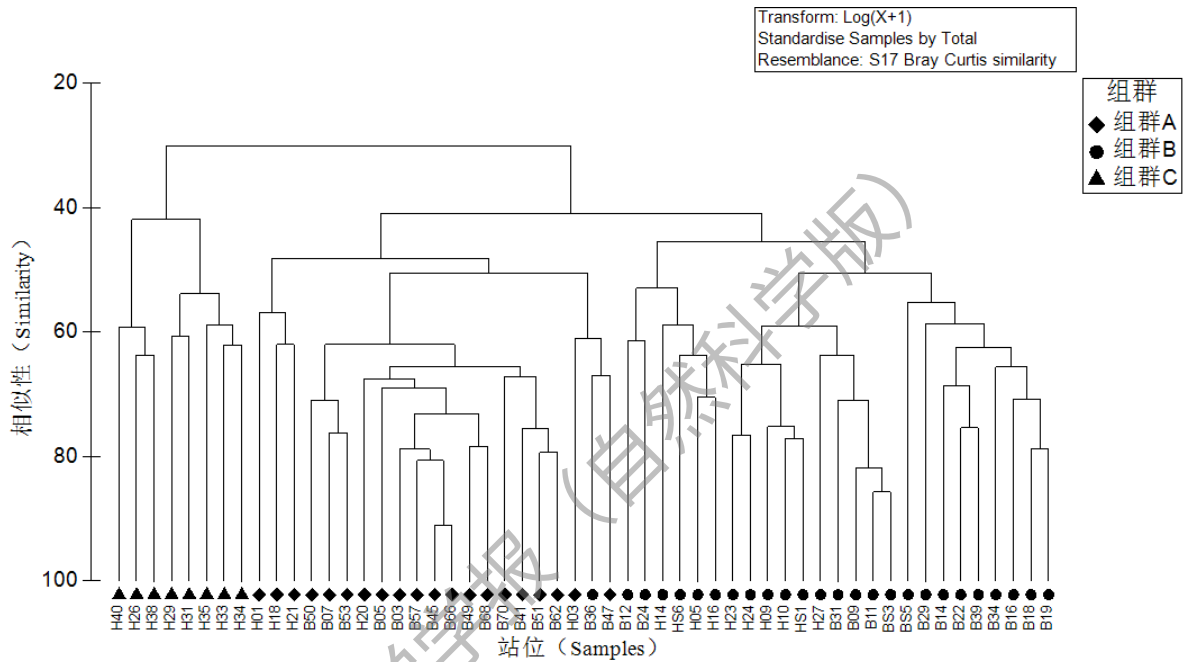


图 6 取样站位聚类分析树状图
Fig. 6 Cluster dendrogram of sampling stations

表 3 各组群环境因子和叶绿素 a 浓度
Tab. 3 Environmental factors and chlorophyll a concentration in each community

	表层温度/℃	底层温度/℃	表层盐度	底层盐度	水深/m	叶绿素 a 质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
组群 A	13.8±2.2	13.7±2.4	30.7±0.6	30.8±0.6	27.3±10.7	0.25±0.15
组群 B	14.7±2.4	11.9±2.6	31.5±0.4	31.9±0.6	56.8±15.1	0.38±0.54
组群 C	18.8±0.9	17.9±2.9	31.3±0.4	31.4±0.7	39.5±18.5	0.22±0.06

对组群 A 贡献率 90%的物种包括强壮箭虫、夜光虫、中华哲水蚤、真刺唇角水蚤、双壳类幼体和近缘大眼剑水蚤。对组群 B 累积贡献率 90%的物种共 8 种，包含了强壮箭虫、中华哲水蚤、细长脚蚰、小拟哲水蚤、太平洋磷虾（*Euphausia pacifica*）、近缘大眼剑水蚤、小齿海樽和异体住囊虫（*Oikopleura dioica*）。对组群 C 累积贡献率 90%的物种共 21 种，其中中华哲水蚤、强壮箭虫、腕足类舌贝幼虫、背针胸刺水蚤（*Centropages dorsispinatus*）、双生水母（*Diphyes chamissonis*）和磷虾节胸幼虫（*Calyptopis larvae*）贡献率相对较高。

2.7 环境因子与浮游动物群落特征参数的相关性分析

浮游动物群落特征与环境因子的 RDA 分析显示，第一主轴的特征值为 0.4，第二主轴的特征值为 0.1，前两个主轴的解释拟合变化累计百分率达到 98.6。其中，表层盐度对浮游动物群落差异的解释度为 33.6% ($P<0.05$)，在所有环境因子中解释度最高。浮游动物丰度与各环境因子的相关性分析显示，中华哲水蚤丰度与水深呈显著正相关 ($r=0.61$, $P<0.01$)；强壮箭虫与底层温度呈显著负相关 ($r=-0.45$, $P<0.01$)；细长脚蛾与水深呈显著正相关 ($r=0.43$, $P<0.01$)，与底层温度呈显著负相关 ($r=-0.39$, $P<0.01$)；夜光虫 ($r=-0.63$, $P<0.01$) 和双壳类幼体 ($r=-0.45$, $P<0.01$) 丰度均与表层盐度呈显著负相关 (图 7)。

由于渤海、北黄海和南黄海之间浮游动物群落组成和环境因子差异较大，分别对 3 个海区进行 RDA 分析。结果显示，对渤海浮游动物群落影响显著的环境因子有底层盐度 ($P<0.05$) 和底层温度 ($P<0.05$)，对北黄海浮游动物群落影响显著的环境因子仅有底层盐度 ($P<0.05$)，没有对南黄海浮游动物群落影响显著的环境因子。

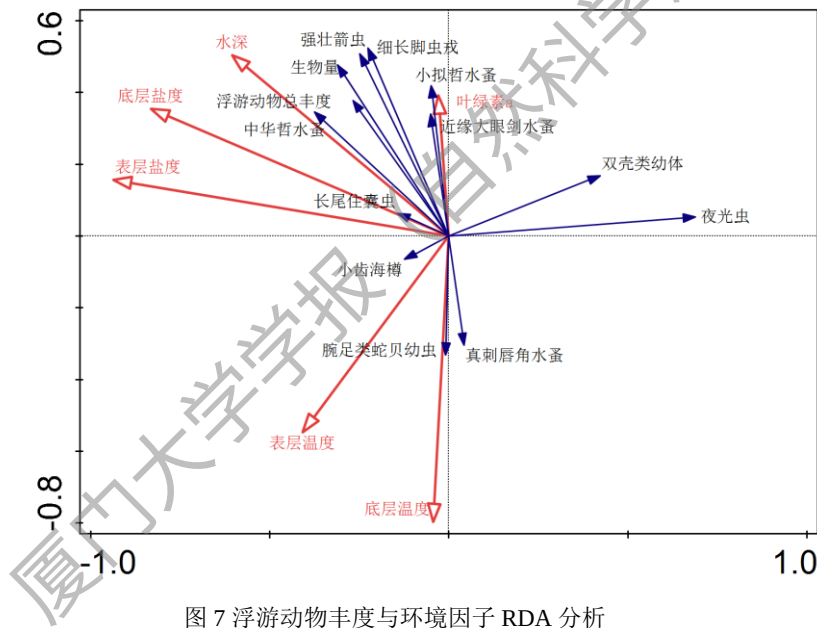


图 7 浮游动物丰度与环境因子 RDA 分析

Fig.7 RDA analysis of zooplankton abundance and environmental variables

3 讨论

本研究共鉴定浮游动物成体 70 种，浮游幼虫 22 类，南黄海、北黄海和渤海分别鉴定浮游动物 85, 52 和 37 种/类。表 4 列出了其他学者在不同海区使用不同网型采集的浮游动物种类数、丰度、生物量和优势种。本次调查与同季节历史资料相比^[7, 16]，渤海浮游动物种类数变动不大。黄海种类数相比 2007 年和 2012 年偏低，这可能是由于 2007 年^[17]调查设置的站位较更为密集，在一定程度上影响了调查种类数；2012 年^[11]秋季使用 WP2 型网采浮游动物种类组成与本研究的差异主要体现在其小型桡足类的种类较多，这是因为 WP2 型网筛绢孔径更小，其对于小型浮游动物的捕获能力明显高于大型网^[18]。南海的种类数和香农-威纳指数都表现为南海最高，北黄海其次，渤海最低，累积优势度曲线也显示出同样的多样性趋势。本

次调查时间正值黄海冷水团消退期和黄海暖流的生成期，且受到苏北沿岸流和长江冲淡水的影响，南黄海存在多种生态类型的浮游动物使得其在 3 个海区之间多样性最高。除广温广盐种外，冷水种如太平洋磷虾和细长脚蚳，暖水种如精致真刺水蚤（*Euchaeta concinna*）和平滑真刺水蚤（*E. planna*）也在南黄海广泛分布。

3.1 浮游动物丰度比较

3 个海区中，渤海浮游动物平均总丰度最高，北黄海其次，南黄海最低。大量夜光虫分布在渤海海域是造成渤海丰度高的主要原因。除去夜光虫丰度后，南黄海、北黄海和渤海浮游动物平均丰度分别为 225.5 ind/m³、295.1 ind/m³ 和 128.2 ind/m³，丰度高值区与冷水团区域相吻合。本次大网调查浮游动物丰度比使用 WP2 网和中网网采丰度要低一个数量级^[10, 11, 19]，但生物量在同一个数量级^[10, 19]，这是由于一些丰度大的小型浮游生物对生物量贡献较小，本研究中南黄海和渤海浮游动物丰度相比同样使用大网的历史调查数据偏高^[16-17]。

表 4 渤、黄海浮游动物历史资料
Tab. 4 Summary of historic data of zooplankton in the Bohai Sea and Yellow Sea

年份	月份	海区	网型	种类数	平均丰度/ (ind·m ⁻³)	生物量/ (mg·m ⁻³)	优势种	参考文献
1998 年	9 月	渤海中南部	大型网	30	143.0		中华哲水蚤、真刺唇角水蚤和强壮箭虫	[7]
1998 年	10 月	渤海中南部	大型网	39	167.0			
2007 年	10—11 月	南黄海	大型网	138	126.4	172.6	中华哲水蚤、强壮箭虫、磷虾幼体和小齿海樽	[17]
2012 年	11 月	黄海	WP2 型网	144	4331.0		拟长腹剑水蚤、异体住囊虫、双壳类幼体、小拟哲水蚤、强壮箭虫、异体住囊虫和双壳类幼体	[11]
2013 年	11 月	渤海中部	浅水 I 型	42	42.1	122.5	中华哲水蚤、强壮箭虫和双壳类幼体	[16]
2014 年	11 月	南黄海	中型网	76	2103.7	425.8	桡足幼体、伪长腹剑水蚤、强额拟哲水蚤、桡足类无节幼虫和拟长腹剑水蚤	[10]
2016 年	7 月	南黄海近岸	WP2 型网	76	4 838.2	324.9	小拟哲水蚤、近缘大眼剑水蚤和双毛纺锤水蚤	[19]
2017 年	6—7 月	南黄海近岸	WP2 型网	56	2652.4	216.6	小拟哲水蚤、双毛纺锤水蚤、近缘大眼剑水蚤、拟长腹剑水蚤和桡足类无节幼虫	

3.2 浮游动物优势种的水平分布格局

本研究显示浮游动物优势种在水平分布格局上有 4 种类型：类型 1 分布范围广泛，在近岸和外海都有较高的丰度，包括中华哲水蚤和强壮箭虫（图 3(a)和(f)）。这 2 种浮游动物是渤、黄海大网网采浮游动物中常见的优势种^[7, 9, 16-17]，在本次调查中均为 3 个海区共有优势种，且都在黄海冷水团区域存在高值区。有研究表明中华哲水蚤存在度夏现象，夏季为躲避高温伤害会集中分布在黄海冷水团水域^[20]，本研究开展时

黄海冷水团还未完全消亡, 中华哲水蚤仍大量分布在冷水团海域。强壮箭虫的摄食强度在水温较低时更高(最适摄食温度范围为 10~15 °C)^[21], 本次调查中相关性分析显示强壮箭虫丰度与底层温度呈显著负相关, 丰度高值区分布在底层温度较低海域, 有利于其摄食、生长和繁殖。此外, 哲水蚤是强壮箭虫的主要食物来源^[22], 这与本研究中强壮箭虫与中华哲水蚤的高值区分布吻合相符。

类型 2 多分布在近岸, 在外海鲜有出现, 包括小拟哲水蚤、真刺唇角水蚤、近缘大眼剑水蚤和腕足类舌贝幼虫(图 3(b~d)和(j))。小拟哲水蚤和近缘大眼剑水蚤在北黄海为优势种, 且越靠近沿岸海域丰度越高, 这一现象与田丰歌等^[23]划分小拟哲水蚤和近缘大眼剑水蚤为暖温带近海种的结果一致。小拟哲水蚤和近缘大眼剑水蚤体型较小, 通常在 WP2 网和中网网采浮游动物中为优势种^[9, 11, 19], 虽然本次大网调查中为北黄海优势种, 但其优势度明显低于体型较大的中华哲水蚤和强壮箭虫, 所记录的丰度也低于实际值^[18]。真刺唇角水蚤的水平分布主要受盐度影响, 是长江口浑浊带最重要的浮游动物之一^[24], 在渤海也有优势种的记录^[7], 本研究中真刺唇角水蚤为渤海和南黄海共有的优势种, 高值区出现在长江口北部近岸水域, 这可能是由苏北沿岸流和长江冲淡水共同影响所致^[24-25]。腕足类舌贝幼虫仅在南黄海出现, 呈现以长江入海口附近为高值点向外递减的趋势, 对于这一类幼虫在南黄海成为优势种的情况此前未见报道。腕足动物最早出现于寒武纪, 是著名的“活化石”, 舌形贝是仅存的现生海洋腕足动物之一^[26], 目前针对舌形贝的研究多侧重于其化石在地质学上的意义, 对于该生物在现代海洋的生活史及分布特征值得进一步展开研究。

类型 3 主要分布在外海而在近岸丰度低, 包括细长脚蛾、长尾住囊虫和小齿海樽(图 3(e)、(g)和(h))。细长脚蛾是首次被记录为北黄海优势种, 在南黄海冬季曾有优势种的记录^[27], 本次调查中其在南黄海近岸底层温度较高的海域几乎没有分布, 有调查指出细长脚蛾主要生活在温跃层以下的水体中^[28], 这与本研究中的细长脚蛾丰度与底层温度呈负相关而与水深呈正相关的结果相一致。长尾住囊虫和小齿海樽根据最适温盐划分的生态类型为亚热带外海种^[23], 这与其在南黄海的分布格局相符, 但小齿海樽在北黄海也有分布且长尾住囊虫在山东半岛北部近岸有高值区, 典型的暖水种在北黄海的大量出现并成为浮游动物的优势种可能是温带水域的海洋生态系统对全球变暖的响应信号^[29]。

类型 4 仅包括双壳类幼体, 主要分布在调查海域的北部而在南部鲜有出现(图 3(i))。双壳类幼体集中分布在山东半岛附近海域, 其他学者^[11, 27]也报道过类似的情况。夜光虫的分布格局与双壳类幼体类似, 也表现为北多南少, 在莱州湾近岸海域存在极高值分布, 徐东会等^[16]的调查显示 2013 年秋季夜光虫在渤海中部广泛、大量的分布。在本文中, 夜光虫和双壳类幼体丰度均与表层盐度成显著负相关, 因此表层盐度可能是调控这种分布模式的重要因素。

3.3 浮游动物群落划分

很多学者对黄海浮游动物群落进行了划分。左涛等^[30]将黄、东海陆架区浮游动物划分为黄海沿岸群落、黄海中部群落、黄东海交汇水混合群落、东海近岸混合水群落和东海外陆架高温高盐群落。2012 年春、秋

季黄海浮游动物均被划分为北黄海群落、黄海中部群落、沿岸群落和东海近岸混合水群落^[11, 31]。与之前的研究相比较, 本文研究范围向西延申至将渤海包含在内, 根据渤、黄海浮游动物的种类组成和地理分布, 本文将划分的组群 A、B、C 分别命名为渤海及黄海沿岸群落、黄海北部及中部群落和黄东海交汇水混合群落。

在渤海及黄海沿岸群落中, 黄海沿岸的站位与上述学者划分的沿岸群落基本相符。渤海浮游动物受到沿岸流影响较大, 包括鲁北沿岸流和辽南沿岸流, 主要分布着近岸种和广温广盐种, 因而渤海与黄海沿岸的浮游动物群落结构相似度较高, 在本文中被划分为一个群落。黄海北部及中部群落包括了北黄海大部分站位和南黄海多数站位, 在地理位置上看, 李雨苑等^[11]和雷发灿等^[31]文中的北黄海群落和黄海中部群落在本文中合并成为一个群落, 在一定程度上反映出北黄海和南黄海之间的水团交汇。该群落受到黄海冷水团和黄海暖流的影响, 生态类型较多样, 对组群贡献率较高的浮游动物既包括冷水种(细长脚蚰和太平洋磷虾), 又包括暖水种(小齿海樽)。黄东海交汇水混合群落分布在南黄海最南端, 与左涛等^[30]划分的同名群落和李雨苑等^[11]及雷发灿等^[31]划分的东海近岸混合水群落地理分布相符, 该群落水温最高, 90%贡献率的物种中存在多个偏暖水的物种, 其中以背针胸刺水蚤和双生水母最为重要, 其他主要种类中还包含了肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)、精致真刺水蚤和芦氏拟真刺水蚤(*Pareuchaeta russelli*)等暖水种。本研究海域范围及组群划分虽与前人略有差异, 但总体上是相符的。

参考文献:

- [1]STEINBERG D K, LANDRY M R. Zooplankton and the ocean carbon cycle[J]. Annual Review of Marine Science, 2017, 9: 413-444.
- [2]CAVAN E L, HENSON S A, BELCHER A, et al. Role of zooplankton in determining the efficiency of the biological carbon pump[J]. Biogeosciences, 2017, 14(1): 177-186.
- [3]KEAN-HOWIE J C, PEARRE S, DICKIE L M. Experimental predation by sticklebacks on larval mackerel and protection of fish larvae by zooplankton alternative pery[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1988, 124(3): 239-259.
- [4]BATCHELDER H P, DALY K L, DAVIS C S, et al. Climate impacts on zooplankton population dynamics in coastal marine ecosystems[J]. Oceanography, 2013, 26(4):34-51.
- [5]FERNANDES L F L, PAIVA, T R M. Marine zooplankton dynamics after a major mining dam rupture in the Doce River, southeastern Brazil: Rapid response to a changing environment[J]. Science of The Total Environment, 2020, 736:139621.
- [6]胡放, 于非, 王建丰等. 黄海暖流源区附近温盐结构及其季节变化[J]. 海洋科学, 2016, 40(7):160-169
- [7]王克, 张武昌, 王荣等. 渤海中南部春秋浮游动物群落结构[J]. 海洋科学集刊, 2002 (44): 34-42.
- [8]张武昌, 王克, 高尚武等. 渤海春季和秋季的浮游动物[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 630-639.
- [9]邹艺伟, 杨青, 李全宝等. 北黄海浮游动物群落结构及年间比较[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(5): 683-687.
- [10]陈学超, 朱丽岩, 黄瑛等. 南黄海浮游动物群落结构研究[J]. 海洋科学, 2017, 41(10): 41-49.
- [11]李雨苑, 刘光兴, 陈洪举. 秋季黄海 WP2 型网采浮游动物的群落特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(07): 46-52.
- [12]国家海洋局. 海洋调查规范海洋生物调查: GB/T12763. 6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- [13] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana IL: University Of Illinois Press, 1949.
- [14] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系[J]. 生态学杂志, 1989(4): 13-15.
- [15] CLARKE K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure[J]. Australian Journal Of Ecology, 1993, 18(1): 117-143.
- [16] 徐东会, 孙雪梅, 陈碧鹃等. 渤海中部浮游动物的生态特征[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(4): 7-18.
- [17] 王晓, 姜美洁, 刘萍等. 秋季南黄海浮游动物分布及其影响因素[J]. 海洋学报, 2016, 38(10): 125-134.
- [18] 王荣, 王克. 两种浮游生物网捕获性能的现场测试[J]. 水产学报, 2003 (S1): 98-102.
- [19] 李奕璇, 葛汝平, 叶振江等. 南黄海近岸海域初夏浮游动物的群落特征[J]. 海洋科学, 2020, 44(4): 33-43.
- [20] PU X, SUN S, YANG B, et al. Life history strategies of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer[J]. Journal of Plankton Research, 2004, 26(9): 1059-1068.
- [21] 刘青, 朱海燕, 刘芳等. 温度、盐度对强壮箭虫耗氧率和窒息点的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3081-3086.
- [22] 刘青, 曲晗, 张硕, 魏杰. 强壮箭虫摄食生态的实验研究[J]. 水产学报, 2006(6):767-772.
- [23] 田丰歌, 徐兆礼. 福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 93-100.
- [24] 徐兆礼, 高倩. 长江口海域真刺唇角水蚤的分布及其对全球变暖的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1196-1201.
- [25] ZHANG Q H, JANOWITZ G S, PIETRAFESA L J. The interaction of estuarine and shelf waters: a model and applications[J]. Journal of Physical Oceanography, 1987, 17(4): 455-469.
- [26] 王钰, 金玉珩, 戎嘉余. 概论腕足动物的演化[J]. 古生物学报, 1982 (1): 28-36.
- [27] 王亮, 李超伦, 于非. 冬季南黄海浮游动物群落结构及其对黄海暖流的指示[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(4): 853-859.
- [28] 左涛, 王荣, 王克等. 夏季南黄海浮游动物的垂直分布与昼夜垂直移动[J]. 生态学报, 2004(3): 524-530.
- [29] 陈洪举, 刘光兴, 姜强,等. 北黄海海樽类的种类组成和分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(6):39-44.
- [30] 左涛, 王荣, 陈亚瞿, 等.春季和秋季东、黄海陆架区大型网采浮游动物群落划分[J].生态学报, 2005(7): 1531-1540.
- [31] 雷发灿,李雨苑,刘光兴等.春季黄海 WP2 型网采浮游动物的群落特征[J].海洋环境科学, 2020, 39(4):585-592+599.

Characterization of zooplankton community structure and distribution in the Bohai Sea and Yellow Sea in autumn 2014

WANG Shanshan^{1,2}, LI Haoran^{1,3,4}, CHEN Hongju^{1,2}, LIU Guangxing^{1,2}, ZHUANG Yunyun^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China; 3. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Zooplankton community structure and distribution in the South Yellow Sea (SYS), North Yellow Sea

(NYS) and Bohai Sea (BS) was studied in November 2014. The species composition, abundance, biomass, dominant species and biodiversity were examined. A total of 70 species and 22 taxa of planktonic larvae were identified. The species composition, abundance and biomass were significantly different among the three studied areas. The highest number of species and Shannon-Wiener diversity index were detected in the SYS, followed by the NYS and BS. The average abundance excluding *Noctiluca scintillans* of zooplankton in the SYS, NYS and BS was 225.5 ind/m³, 295.1 ind/m³ and 128.2 ind/m³, respectively. The highest abundance zooplankton was mainly distributed in the North Yellow Sea Cold Water Mass. There were 6, 5 and 4 dominant species in the South Yellow Sea, North Yellow Sea and Bohai Sea, respectively. *Calanus sinicus* and *Sagitta crassa* are the common dominant species in the three areas. Based on the horizontal distribution patterns, the dominant species were categorized into four groups. Cluster analyses revealed three communities, the Bohai Sea and the Yellow Sea Neritic Community, the Yellow Sea Northern and Central Community and the Yellow Sea and East China Sea Mixed Water Community. Redundancy analysis showed that the significant environmental factor affecting zooplankton community was surface salinity.

Keywords: Bohai Sea; Yellow Sea; zooplankton; community structure; distribution characteristics; environmental factors