冬季南黄海浮游动物群落结构及其 对黄海暖流的指示^{*}

王 亮^{1,2} 李超伦¹ 于 非³

(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 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国科学院海洋研究所实验海洋环境工程技术研究发展中心 青岛 266071)

提要 2009 年 12 月和 2010 年 1 月对南黄海进行浮游动物采集,以了解冬季浮游动物群落结构及 其对黄海暖流的指示作用。结果表明,南黄海冬季仍然以温带和暖温带种为主,中华哲水蚤 Calanus sinicus、强壮滨箭虫 Aidanosagitta crassa、细足法域Themisto gracilipes 等温带和暖温带种类在浮游 动物数量组成中具有较大优势。与此同时,一些暖水种在调查海域局部出现。2009 年 12 月暖水种仅 分布在南黄海东南部黄海暖流源地附近。位于黄海中部的调查区东侧温盐层化现象明显,近底层低 温、高盐、高营养盐的水文特征体现了黄海冷水团的残留; 2010 年 1 月在 35°—36°N 区域暖水种种 类明显增加,截平头水蚤 Paracandacia truncata、长尾基齿哲水蚤 Clausocalanus furcatus 出现的位置 与暖流路径相吻合,海洋真刺水蚤 Euchaeta rimana 数量相比 12 月有明显向北推进的趋势。主成分 分析显示暖水种的分布与温度有良好的相关性。Shannon-Weaver 指数、丰富度指数、均匀度指数等 没有呈现明显的分布规律,对黄海暖流的指示作用不如种类明显。

关键词 黄海暖流;浮游动物;群落结构;指示生物 中图分类号 Q178.1

黄海暖流(Yellow Sea Warm Current, YSWC)是指 位于东海东北部、济州岛以西的一支沿西北方向进入 南黄海的流动(蓝淑芳, 1993),是黄海环流的重要组 成部分。由于它是黄海唯一的一支输运外海高盐水的海 流(蓝淑芳, 1993),故黄海暖流对黄海的整个环流体 系、水团分布、水交换以及黄海的海洋环境皆起着至 关重要的作用。

浮游动物是海洋生物主要类群之一。由于大多数 浮游动物生命周期短,自身游泳能力较弱,随波逐流, 因此其分布格局的变动主要受海水温度以及海流系 统变化的影响(Hays *et al*, 2005)。与此同时,浮游动物 其种类的分布、数量等变化一定程度上与水团、海流等 水文现象密切相关。因此,浮游动物指示种研究有助 于了解海流和水团的移动路径及强度,判断不同海流的交汇锋面,为物理海洋学研究提供生物学的佐证(郑 重,1986; Lavaniegos *et al*, 2009; Willis *et al*, 2006)。

黄海暖流研究在物理海洋学上起步较早(Uda, 1934;管秉贤等, 1964),但有关黄海暖流与浮游动物 的关系研究较少。郑执中、郑守仪曾报道过浮游有孔 虫与黄海暖流的关系(郑执中等, 1962)。王荣等依据 季风转换后在南黄海进行的一次调查,从多种暖水 性浮游动物的出现、分布与温盐的关系,验证了黄海 暖流的存在并探讨了它的路径、水层和可能的北限 (王荣等, 2003)。但前人的研究工作没有结合其它环 境因子对黄海暖流进一步讨论。本文对冬季黄海暖流 流经海域的浮游动物群落结构进行分析,并进一步

通讯作者: 李超伦, 研究员, E-mail: lcl@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-02-14, 收修改稿日期: 2011-09-16

^{*} 国家海洋局 908 专项, 908-01-BC12 号; 国家重点基础研究发展计划, 2011CB403604 号;国家自然科学基金项目, 41076099 号和 40821004 号。王亮,硕士研究生, E-mail: wangliang208@mails.ucas.ac.cn

探讨浮游生物群落对黄海暖流的指示作用。

1 材料与方法

1.1 调查区域与方法

本研究依托国家海洋局 908 " 黄海暖流系统调查 与研究 " 项目, 分别于 2009 年 12 月 2 日—12 月 17 日和 2010 年 1 月 26 日—1 月 29 日对 34°00′—37°00′N, 119°40′—124°00′E 的南黄海海域进行调查。调查船为 中国科学院海洋研究所 " 科学一号 "。调查海区和分 布站位见图 1。2009 年 12 月航次设 46 个采样站, 2010 年 1 月又增加 35°00′N、36°00′N 两个断面共 14 站进 行采样。



Fig.1 Sampling stations

浮游动物样品采集所用网具为标准大型浮游生 物网(网口直径 80cm, 网孔直径 505μm)、标准中型浮 游生物网(网口直径 50cm, 网孔直径 169μm)和分层 垂直拖网(网口直径 80 cm, 网孔直径 335μm)。分层 垂直拖网水层为: 10—0m, 20—10m, 30—20m, 50— 30m, 海底–50m。样品置于 5%甲醛海水溶液中固定 保存, 实验室内进行镜检计数。滤水量由德国 Digital Flow Meter Model 438 115 型流量计测得。各种类丰 度以每立方米海水的个体数表示(ind/m³)。生物量为 固定样品后称得的湿重(mg/m³)。温度、盐度数据由 调查船配置的 CTD 现场测定。叶绿素 *a* 由 HITACHI F-4500 荧光光度计测定。

1.2 数据处理

各生态学指标计算公式如下: Shannon-Weaver 多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^{5} P_i \log_2 P_i$$

其中 P; 是第 i 种的个数与该站位样品总个数的比值; S 为样品种数。

均匀度:
$$J' = \frac{H'}{\log_2 S}$$

均匀度的大小反映了群落中各个种个体数的差 异程度。

丰富度:
$$D = \frac{S-1}{\log_2 A}$$

其中S为样品种数,A为该站位的平均丰度(ind/m³)。

优势度:
$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$$

其中 n_i 为第 *i* 种的个体数; f_i 为该种在各站位出现的频率; *N* 为每个种出现的总个体数。取优势度 $Y \ge 0.02$ 的浮游动物种为优势种。

2 结果

2.1 种类组成

2009年12月航次鉴定种类共65种,其中桡足类 19种,磷虾类2种,糠虾类2种,樱虾类2种,毛颚 类4种,腔肠动物14种,栉水母类2种,被囊类3种, 端足类3种,介形类1种,十足目1种,涟虫目1种, 原生动物1种,其它浮游幼体10种。

2010年1月航次鉴定种类49种,其中桡足类14 种,磷虾类2种,糠虾类2种,樱虾类2种,毛颚类3 种,腔肠动物10种,栉水母类1种,被囊类1种,端 足类2种,介形类1种,十足目1种,涟虫目1种,原 生动物1种,其它浮游幼体8种。

调查海区仍以中华哲水蚤 Calanus sinicus、小拟 哲水蚤 Paracalanus parvus、强壮滨箭虫 Aidanosagitta crassa(旧称强壮箭虫 Sagitta crassa)等温带和暖温带 种为优势种。2009年12月航次大网中中华哲水蚤具 有绝对优势(Y=0.5547),强壮滨箭虫(0.2373)、细足法 . 蛾Themisto gracilipes(0.0500)及中华带箭虫 Zonosagitta sinica(旧称中华箭虫 Sagitta sinica) (0.0216)也 是大网优势种; 中网小拟哲水蚤 Paracalanus parvus (0.3967)、拟长腹剑水蚤 Oithona similes (0.3643)、近 缘大眼水蚤 Corycaeus affinis(0.0292)和长腕幼虫 Ophiopluteus larva(0.0210)具有优势。2010年1月航 次与 2009 年 12 月差别不大。大网优势种为中华哲水 蚤(0.5430)、强壮滨箭虫(0.3240)、细足法蜮(0.0507); 中网优势种为拟长腹剑水蚤(0.4487)、小拟哲水蚤 (0.3608)、强额孔雀哲水蚤 Pavocalanus crassirostris (0.0556)、近缘大眼水蚤(0.0316)、长腕幼虫(0.0250)。

群落多样性指数中,2009年12月航次 Shannon-Weaver 指数平均为 1.821,最高值站位为 A5,为 2.448;均匀度指数平均值为 0.450,最高值站位为 C6, 达到 0.675;丰富度指数平均 1.567,C5 的丰富度值最 高,为 2.662。2010年1月航次的 Shannon-Weaver 指 数、均匀度指数比 2009年12月有所增高,而丰富度 指数略微降低。各多样性指数均未呈现明显的空间分 布规律。

2.2 丰度和生物量分布

大网浮游动物丰度(图 2)高值区位于调查海域的 东南部和东北部,这两个区域分别是太平洋磷虾和 中华哲水蚤的高值中心,由生物量的分布特点(图 4) 也可以看出这一点。生物量由远海至近岸递减的趋势 较为明显。中网浮游动物丰度分布特点是近岸高,远 岸低(图 3),其原因主要是近岸水体长腕幼虫、双壳 类幼体、多毛类幼体急剧增加,大幅提高了中网浮游 动物丰度。

2.3 暖水种分布及对黄海暖流的指示

图 6 给出了两航次暖水种的分布位置。在 2009 年 12 月鉴定到的暖水种中,小齿海樽 Doliolum denticulatum、软拟海樽 Dolioletta gegenbauri 由于适温 范围宽,故分布最广;海洋真刺水蚤 Euchaeta rimana(旧称 Euchaeta marina)出现站位也较多,但主 要集中在 34°N 和 34.5°N 断面, 35°N 以北数量锐减(图 7); 典型暖水种丽隆剑水蚤 Oncaea venusta、异尾宽 水蚤 Temora discaudata、微刺哲水蚤 Canthocalanus pauper 都只出现一站,数量很少,而且这些暖水种都 分布在 123.5°E 以东 34°—35°N 之间受到表层暖水舌 影响的站位。



图 2 2009 年 12 月航次大网丰度(ind/m³) Fig.2 Abundance of zooplankton with 505µm net in Dec, 2009 (ind/m³)



图 3 2009 年 12 月航次中网丰度(ind/m³) Fig.3 Abundance of zooplankton with 169 μm net in Dec, 2009 (ind/m³)



2010 年 1 月航次中,新发现长尾基齿哲水蚤 Clausocalanus furcatus、带小壳水蚤 Scolecithricella vittata、截平头水蚤 Paracandacia truncata。另外,缘 齿小壳水蚤 Scolecithricella nicobarica、海洋真刺水 蚤在出现站位和数量上都比 12 月份有所增加。12 月 份海洋真刺水蚤分布北限至 35.5°N,且丰度仅为 0.1ind/m³;1 月份其在 35°N、36°N 数量大幅增加,在 36°N 的 E6 站丰度达到 2.1ind/m³(图 7)。由此可见暖 水种海洋真刺水蚤在数量上具有向北推进的特点。

对站位经度、纬度、水深、叶绿素 *a*、平均温度、 平均盐度及有无暖水种 7 个变量进行主成分分析。结 果显示,前两个主成分累计贡献率达到了 78.46%。暖 水种的出现与温度相关性较强,水深、盐度和经度有 良好的相关性,这与盐度从远海向近岸递减的分布 特点相吻合(图 8)。 按暖水舌的延伸方向,将A5、B6、C7、C6、C5 站连线做一断面。从该断面的温度垂直分布可以清楚 看到黄海暖流的入侵,位于黄海暖流源地附近的A5 站其中层水温最高(图9),与底层相差3—4℃。随着 暖水舌向近岸延伸,暖水种数量逐渐减少(图7),温 度的铅直分布也趋于均匀。利用分层垂直拖网将各水 层出现的暖水种进行计数,结果发现,2009年12月和 2010年1月两个航次中,30—50m均为暖水种丰度最 高的层次(图10),指示黄海暖流从源地进入南黄海的 位置不是在表层和底层,而是在中层(王荣等,2003)。

3 讨论

从浮游动物的种类组成上看,中华哲水蚤、小拟

哲水蚤、强壮滨箭虫、细足法蛾、拟长腹剑水蚤、近 缘大眼水蚤等温带和暖温带种在冬季南黄海占绝对 优势。在多样性指数上, Shannon-Weaver 指数、丰富 度指数、均匀度指数等均未呈现明显分布规律, 说明 黄海暖流对这些指标的影响十分有限。

在 34°—37°N 海域, 王荣等(2003)鉴定到的暖水 种种类数要比本次调查多, 所报道的分布北界分别 到达 36°N 和 35°N 的暖水种, 平滑真刺水蚤 Euchaeta plana 和芦氏拟真刺水蚤 Pareuchaeta russelli, 在本文 的两次调查中均未出现。虽然本文的调查时间(12 月 2 日—12 月 17 日)晚于王荣等(2003)调查时间(11 月 17 日—12 月 1 日), 但此时的黄海暖流可能仍处于成 长发育阶段。从 2009 年 12 月航次的暖水种分布来看,



nicobarica; 滋 丽隆剑水蚤 Oncaea venusta; 《 长尾基齿哲水蚤 Clausocalanus furcatus; ◆ 带小壳水蚤 Scolecithricella vittata; ■ 截平头水蚤 Paracandacia truncata



图 / 海洋具则水蛋 Euchaeta rimana 丰度(ind/m²)受14 Fig.7 The abundance of Euchaeta rimana (ind/m³) a. 2009 年 12 月; b. 2010 年 1 月



图 8 暖水种及环境因子主成分分析散点图 Fig.8 PCA scatter diagram of warm species and environmental factors in Dec, 2009



大多数暖水种集中在调查海区的东南部,与表、底层 的暖水舌没有形成很好的契合,其原因可能是此时 黄海暖流的强度不大,而从温度、盐度垂直分布来看, 远岸水体没有充分垂直混合,温盐及营养盐的层化 现象明显,近底层低温、高盐、高营养盐的水文特征 体现了黄海冷水团的残留,从冷水团指示种太平洋 磷虾 *Euphausia pacifica* 的垂直分布可以说明这一点。 2009 年 12 月太平洋磷虾在 123°—124°E 底层大量聚 集,表明该部分水体仍然受冷水团控制。而在 122.5°E 太平洋磷虾数量急剧减少,122°E 以西数量全部为零。 从底层温度的水平分布来看,122.5°E,34.5°N 恰好位 于底层暖水舌的舌缘位置上(图 5)。

相比 2009 年 12 月航次, 2010 年 1 月份 35°N、 36°N 两断面出现的暖水种种类增多, 尤其是截平头



图 9 A5-C5 断面温度垂直剖面图($^{\circ}$ C) Fig.9 Vertical distribution of temperature on transact A5-C5($^{\circ}$ C)





水蚤, 主要分布于日本黑潮区和马来群岛等, 属于典型热带种。12 月航次中大量存在的适温适盐较宽的 暖水性种类小齿海樽 Doliolum denticulatum、软拟海 樽 Dolioletta gegenbauri、肥胖软箭虫 Flaccisagitta enflata(旧称肥胖箭虫 Sagitta enflata)在1月航次中均 未发现, 而对温盐有更严格要求的暖水种却出现在 35°N、36°N 断面上, 说明此时温度已成为众多暖水 种存活的限制因子。而从历史资料和研究报道来看, 这一区域冬季的温度条件不能满足这些暖水种完成 生活史, 因此截平头水蚤、长尾基齿哲水蚤、带小壳 水蚤等暖水种在这一纬度的出现是黄海暖流强迫输 运的结果。

此外,2010年1月份调查的暖水种分布可以较好 地反映黄海暖流的路径。E6站(36°N,123°E)既是热带 种截平头水蚤出现的站位,也是海洋真刺水蚤数量 的高值区。王辉武等(2009)利用经验函数正交分解及 相关分析方法也推算出 36°N 黄海暖流的位置在 123°E 附近,即沿黄海槽西侧 50—60m 等深线北上。

在物理海洋学上,一些学者认为黄海暖流不是 一支持续稳定的流(Lie *et al*, 2001; 汤毓祥等, 2001; 许一等, 2005)。通过本文和前人的研究来看,指示黄 海暖流的浮游动物指示种的出现确实具有一定的波 动性,并且其出现频率和数量分布特点同样存在较 大的年际变化(图 8, 图 10; 王荣等, 2003),从而从生 物指示种角度支持物理海洋学这一研究推断。因此, 虽然在暖流强盛期,暖水种的分布和数量确实可以 指示黄海暖流的路径和强度,但是由于黄海暖流具 有偶发性的特点,加上水文条件复杂,暖水种生存耐 受限度也不尽相同,给黄海暖流指示种研究带来一 定的困难。而要想从生物海洋学角度揭示黄海暖流的 输运途径与强度,必须在研究指示生物生态分布基 础上,辅以其他环境因子的综合分析和验证。

致谢 本文叶绿素 a 数据由中国科学院海洋研究所于仁成研究员提供,特此致谢。

参考文献

- 中国科学院海洋研究所, 2008. 中国海洋生物名录. 北京: 科 学出版社, 608—626
- 王荣, 高尚武, 王克等, 2003. 冬季黄海暖流的浮游动物指示. 水产学报, 27(増刊): 39—48
- 王辉武,于非,吕连港等,2009. 冬季黄海暖流区的空间变化 和年际变化特征. 海洋科学进展,27(2):140—148
- 许一,于非,张志欣等,2005. 冬季黄海暖流的诊断计算.海洋科学进展,23(4):398—407
- 汤毓祥, 邹娥梅, Lie H J, 2001. 冬至初春黄海暖流的路径和 起源. 海洋学报, 23(1): 1—12
- 郑执中,郑守仪,1962. 黄海和东海浮游有孔虫的研究. 海洋 与湖沼,4(1—2):60—85
- 郑重,1986. 海洋浮游指示生物研究. 海洋浮游生物生态学文 集. 厦门: 厦门大学出版社,11—27
- 郑重,郑执中,1962. 海洋浮游生物研究的现状. 海洋与湖沼, 4(3—4):230—238
- 蓝淑芳, 1993. 黄海暖流水的调查研究. 海洋科学, 1(1): 38-40
- 蓝淑芳, 顾传宬, 傅秉照, 1986. 南黄海暖流水的温、盐度分布 特征. 海洋科学集刊, 27: 45—53
- 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
- Hays G C, Richardson A J, Robinson C, 2005. Climate change and marine plankton. Trends in Ecology and Evolution, 20(6): 337—344
- Lavaniegos B E, Hereu C M, 2009. Seasonal variation in hyperiid amphipod abundance and diversity and influence of mesoscale structure off Baja California. Marine Ecology Progress Series, 394: 137–152
- Lie H J, Cho C H, Lee J H *et al*, 2001. Does the Yellow Sea Warm Current really exist as a persistent mean flow. Journal of Geophysical Research Oceans, 106(C10): 22199–22210
- Uda M, 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June . J Imperial Fish Exped Stns, 5: 57–190
- Willis K, Cottier F, Kwasniewski S et al, 2006. The influence of advection on zooplankton community composition in an Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard). J Marine Systems, 61: 39-54

ZOOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE IN THE SOUTH YELLOW SEA IN WINTER AND INDICATION OF THE YELLOW SEA WARM CURRENT

WANG Liang^{1, 2}, LI Chao-Lun¹, YU Fei³

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 2. University of The Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049; 3. Research and Development Center of Marine Environmental Engineering and Technology, Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Abstract Zooplankton community structure in winter was studied in the South Yellow Sea during two cruises in December 2009 and January 2010. The indication of warm water zooplankton to the Yellow Sea Warm Current (YSWC) was also analyzed based on these data. The zooplankton community was dominated by temperate and warm-temperate species in the South Yellow Sea in winter, of which *Calanus sinicus, Aidanosagitta crassa*, and *Themisto gracilipes* were overwhelming species. In December 2009, most warm water species were found in the southeast part of survey area where YSWC intruding. The eastern part of the survey area presented hydrographic characteristics of the remained Yellow Sea Cold Water: low temperature, high salinity and high nutrient contents. In January 2010, more warm water species were found between 35°N and 36°N. The locations of the tropical species *Paracandacia truncata* and *Clausocalanus furcatus* were consistent with the path of the YSWC. The distribution of the amount of *Euchaeta rimana* presented the northward trend in comparison with that in December, 2009. Principal Component Analysis indicated that occurring of warm species was related to seawater temperature. The influence of YSWC on zooplankton community structure was small during the study period.

Key words Yellow Sea Warm Current; zooplankton; community structure; bio-indicator