

296-3044

第15卷 第3期
1995年9月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICA

5866(4)

Vol. 15, No. 3
Sep. 1995

东海黑潮锋面涡旋区浮游动物的分布

孟凡 毛兴华 黄凤鹏 俞建奎 张锡烈

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛, 266003)

马兆党 李钦亮

(国家海洋局北海分局, 青岛, 266033)

A 摘要 本文根据中日黑潮合作调查研究, 1989年4月航次在东海北部黑潮及其邻近海域采集的浮游生物样品, 分析黑潮锋面涡旋区饵料浮游动物的分布特点及其与海洋环境的关系。首次报道了在东海黑潮锋面涡的冷中心区发现冷水性桡足类, 从而丰富了调查区浮游动物区系的冷水种成分, 并为锋面涡涌升水的研究和黑潮潜流的研究提供了生物学证据。

关键词: 浮游动物, 分布, 黑潮, 东海

黑潮锋面涡是一种中尺度的海洋现象, 它对黑潮同其周围海水的能量和质量交换能起重要的作用。在陆架和陆坡区, 由于这类中尺度过程产生频繁, 当下层水涌升时, 给表层水带来的丰富营养盐常是近岸上升流区的数倍^[1]。这将大大地肥沃了上层水, 促进了浮游生物的生长与繁殖, 为经济鱼类的产卵、索饵提供了良好的条件。锋面涡旋的产生, 往往是形成渔场环境的一个重要因素^[2]。

由于浮游动物在海洋生态系统所起的纽带作用和它对生物地球化学循环及全球气候变化的重要影响^[3], 浮游动物与环境间相互作用的研究已成为现代海洋生态学研究的一个核心问题。近年来, 对发生在陆架和陆坡区一类中尺度涡浮游动物的研究, 多以湾流和日本黑潮为主^[4-6], 但对东海黑潮锋面涡浮游动物的研究并不多见。本文探讨东海黑潮锋面涡饵料浮游动物的分布特点及其与海洋环境的关系, 并为生物地球化学循环及全球气候变化的研究提供有益的资料和科学依据。

1 材料与方法

本文材料系根据“向阳红 09”调查船于 1989 年 4 月在东海北部黑潮及其邻近海域 (29°00'—31°21'N, 126°00'—129°00'E, 图 1) 开展中日黑潮合作调查, 使用大型浮游生物网 (网长 270cm, 网口面积 0.5m², 筛绢孔径 0.529mm), 从 200m 水层至海面 (水深 < 200m 的测站, 则从海底至海面) 垂直拖网, 采集的浮游生物样品。浮游动物生物量系指从样品中分离去含水量多的水母类、被囊类等称的湿重, 换算为 mg/m³。温、盐要素使用美国 Mark II 型 CTD 测定, 数据均取自表层至浮游生物拖网深度各层次的平均值。浮游生物网的滤水量使用德国 HYDRO-BIOS 公司产的 438-110 型数字流量计校正。浮游动物资料的聚类分析参考金丕焕等介绍的方法^[10]。

2 结果与讨论

图 2 和图 3 表明, 在东海黑潮左侧锋区 (30°—31°N, 128°—129°E) 由切变引起的切变波,

收稿日期: 1993 12 17, 修改稿收到日期 1994 05 03。

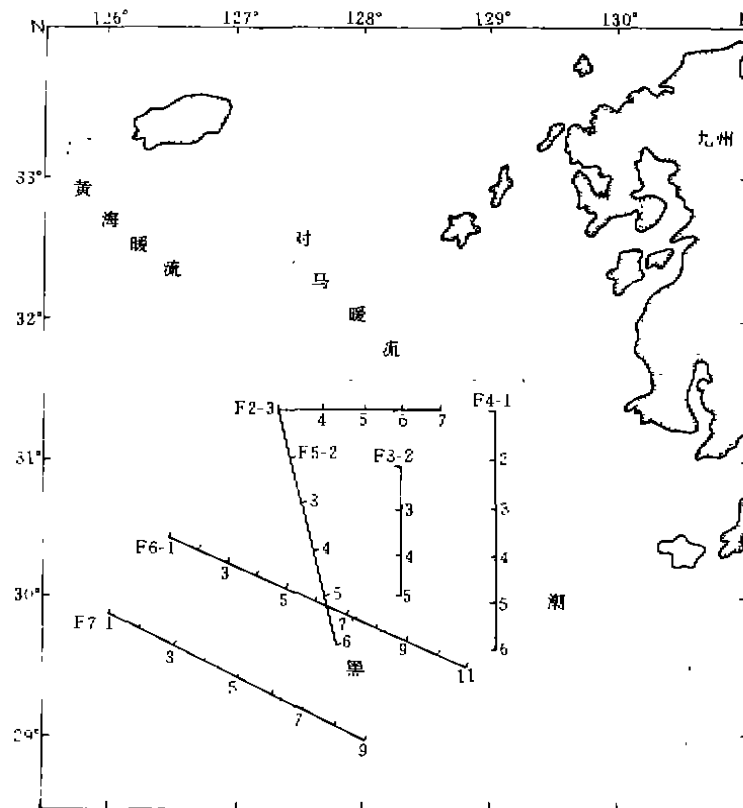


图 1 浮游生物调查的站位图

Fig. 1 Location of plankton investigated stations

随着振幅的增大,导致黑潮水向陆架倒卷,形成锋面涡的暖水舌区;陆架水向黑潮插入,并伴随着下层水涌升,形成表层水温低于 20℃ 的锋面涡冷中心区。它的周期约为 10d。垂直尺度可达 100 多米(它能同涌升到 200m 以浅的深层冷水相接轨,从而使涌升现象从海洋深层一直扩展至表层)^[11]。下面叙述锋面涡与其周围海域浮游动物的分布特点及其同海洋环境的关系。

2.1 锋面涡的暖水舌区

暖水舌区主要包括 F4-3、4, F3-2、3 和 F5-4 等测站。这个区域温度变化范围为 17.96—20.40℃,盐度变化范围为 34.41—34.54。

暖水舌区平均生物量为 48.8mg/m³。在其边缘区域(F5-4 测站),生物量有个峰值为 70.84mg/m³,是生物量最低测站(F4-4, 17.70mg/m³)的 4 倍多(图 4)。组成生物量的主要种类有桡足类的 *Nannocalanus minor*、*Eucalanus subtenuis*、*Oncaea venusta*,端足类的 *Hyperoides longipes*,磷虾类的 *Euphausia tenera*、*E. diomedea*,毛颚类的 *Sagitta enflata*、*S. pacifica* 等。这些种类全是暖水种。

在暖水舌区共记录浮游动物 162 种,占整个调查区浮游动物总种数的 59%。其中桡足类 95 种,端足类 20 种,磷虾类 19 种,莹虾类 3 种,毛颚类 18 种,浮游多毛类 7 种及浮游幼虫 4 类。

从数量看,桡足类在浮游动物中占首位,为 83%。其次是毛颚类,为 12%。其他类群的比

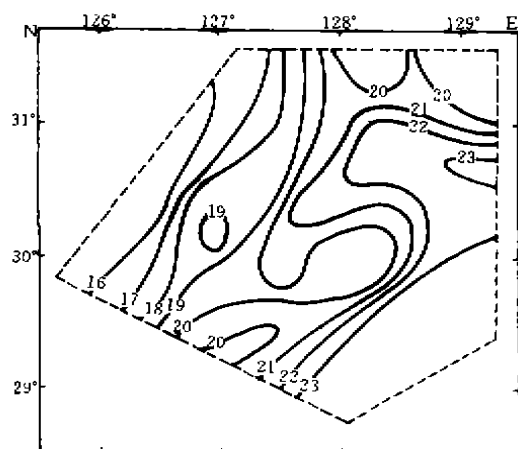


图 2 表层水温的平面分布(°C)

Fig. 2 Horizontal distribution of the surface temperature

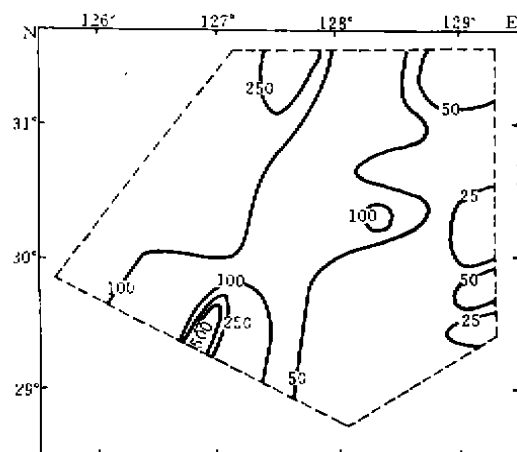
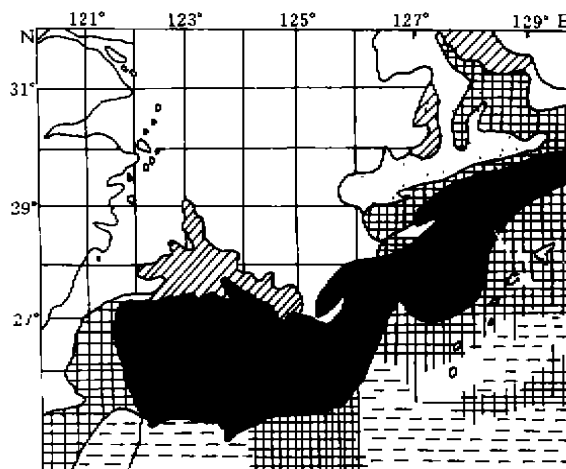


图 4 浮游动物生物量的平面分布(mg/m³)

Fig. 4 Horizontal distribution of the biomass of zooplankton



陆架水 The shelf water
 黑潮水 The kuroshio water
 黑潮暖丝水 The warm filament

图 3 1989 年 4 月 16 日 NOAA-11 卫星红外影像图

Fig. 3 Satellite AVHRR-infrared images from NOAA-11 on 16 April, 1989

例都较少。

从生态属性看,该区浮游动物大致有以下 3 个主要生态类群。

2.1.1 暖水种和热带外海种 这个类群在桡足类、端足类、莹虾类和毛颚类中约占 95%;在磷虾类、浮游多毛类中约占 85%。主要种类有桡足类的 *Neocalanus robustior*、*Xanthocalanus pulcher*、*Scolecithricella tenuiserata*、*Euaugaptilus filigerus*,端足类的 *Parascelus edwardsi*,磷虾类的 *Euphausia hemigibba*、*Stylocheiron*

carinatum,莹虾类的 *Lucifer intermedius*,毛颚类的 *Sagitta hexaptera*、*S. lyra*、*S. enflata*,浮游多毛类的 *Tomopteris elegans* 等。其中,热带外海种主要分布在靠近黑潮水一侧(F4-3、F4-4 测站),暖水种则更多地密集在暖水舌的边缘区(F3-2、F3-3 测站)。

2.1.2 暖温带近海种 这个类群占的比例很小,主要有桡足类的 *Calanus sinicus*,端足类的 *Parathemisto gracilipes*,磷虾类的 *Euphausia nana*,毛颚类的 *Sagitta naga* 等。这一类群的密集区多出现在暖水舌的边缘区(F5-4 测站)。

2.1.3 深水种 这一类群种类较少,有桡足类的 *Calanoides carinatus*、*Undeuchaeta plumosa*、*Heterorhabdus papilliger* 和磷虾类的 *Nematoscelis microps* 等,主要分布在暖水舌的边缘区。

以上 3 种不同生态类群浮游动物及其生物量的分布趋势与黑潮水向陆架倒卷的势态是大

体一致的。

2.2 锋面涡的冷中心区

冷中心区主要包括 F3-4、5, F5-5、6, F6-5、6、7、8, F7-6、7 等测站。这个区域温度变化范围为 16.80—20.28℃, 盐度变化范围为 34.35—34.51。

冷中心区平均生物量为 41.3mg/m³, 生物量的分布仍然以锋区最高(F3-4 测站, 105.10mg/m³)、冷中心区的中心位置生物量最低(F6-7 测站, 35.35mg/m³; F3-5 测站, 46.39mg/m³, 图 4)。组成生物量的种类主要是暖温带近海种, 如桡足类的 *Calanus sinicus*, 磷虾类的 *Euphausia nana*, 毛颚类的 *Sagitta nagae* 及一些暖水种, 如桡足类的 *Eucalanus subtenius*, *Temoradiscadata*, *Pareuchaeta russelli*, *Pleuromamma gracilis*, 莹虾类的 *Lucifer intermedius*, 毛颚类的 *Sagitta bedoti*, *S. enflata* 等。

在冷中心区共记录浮游动物 156 种, 占调查区浮游动物总种数的 57%。其中桡足类 95 种, 端足类 18 种, 磷虾类 14 种, 莹虾类 2 种, 翼足类 2 种, 毛颚类 19 种, 浮游多毛类 6 种及浮游幼虫 3 类。

从数量看, 桡足类在浮游动物中仍占首位, 为 83%。其次是毛颚类, 为 13%。其他类群的比例都较少。

从生态属性看, 该区浮游动物大致有以下 4 个主要生态类群。

2.2.1 暖水种 与暖水舌区不同, 该区暖水种多以暖水广布种和近岸暖水种为主, 热带外海种极少。桡足类、端足类、莹虾类、毛颚类和浮游多毛类等暖水种都约占 95% 左右, 磷虾类的占 86%。主要种类有桡足类的 *Eucalanus subtenius*, *E. pseudotenuatus*, *Gaidius pungens*, 莹虾类的 *Lucifer intermedius*, 翼足类的 *Crescis acicula*, 磷虾类的 *Euphausia recurva*, *E. mutica*, 毛颚类的 *Sagitta enflata*, *S. bedoti* 等。其中, 桡足类主要分布在冷中心区的中心位置和锋区, 莹虾类、磷虾类、毛颚类主要分布在锋区, 翼足类主要分布在冷中心区的中心位置。

2.2.2 暖温带近海种 这个类群占的比例很小, 主要种类有桡足类的 *Calanus sinicus*, *Scolecithricella longispinosa*, *Corycaeus (Ditrichocorycaeus) affinis*, 端足类的 *Parathemisto gracilipes*, 磷虾类的 *Euphausia nana*, 毛颚类的 *Sagitta nagae* 等。其中, 除了毛颚类的密集区出现在锋区外, 其余类群的都出现在冷中心区的中心位置。

2.2.3 深水种和冷水种 这两个类群种类较少。深水种主要有桡足类的 *Undeuchaeta plumosa*, *Scottocalanus securifrons*, *Heterorhabdus papilliger*, 磷虾类的 *Nematoscelis microps*, 毛颚类的 *Sagitta decipiens* 等。冷水种仅桡足类的 *Eucalanus bungii bungii* 一种。这两个类群主要出现在冷中心区的中心位置和锋区(图 7)。

以上 4 种生态类群浮游动物及其生物量的分布趋势与冷中心区涌升水的途径基本吻合。

2.3 不同生态特性的浮游动物对调查区的划分及其与东海水系的关系

对下面 3 个区域先后列出的 16 种不同生态特性的浮游动物在调查区 21 个测站(已剔除缺项资料的测站)的数量分布, 用相关系数为指标进行系统聚类, 取相似系数为 0.3, 可把调查区划分为 3 个区域(图 5): 第一区域位于调查区中部和南部, 包括 F7-6、F6-7、F6-3、F7-4、F5-3 等测站。这个区域主要受东海混合水控制, 称之为混合水区。在数量上能对这个区域起指示作用的主要是一些暖水广布种, 如毛颚类的 *Sagitta bedoti*, 介形类的 *Euconchoecia maimai* 等。第二区域位于调查区西部和西北部, 包括 F3-5、F6-5、F3-4、F2-7、F2-5、F7-1、F6-1、F2-3 等测站。

这个区域主要受近海水(大陆沿岸变性水)控制,称之为近海水区。在数量上能对这个区域起指示作用的主要是一些暖温带近海种,如毛颚类的 *Sagitta naga*、桡足类的 *Calanus sinicus*、磷虾类的 *Euphausia nana*、端足类的 *Parathemisto gracilipes* 等。第三区域位于调查区东部,包括 F6-10、F4-4、F7-7、F3-3、F4-3、F4-6、F7-9、F4-1 等测站。这个区域主要受潮水控制,称之为黑潮水区。在数量上能对这个区域起指示作用的全是黑潮指示种,如桡足类的 *Euchirella pulchra*、*Scolecithricella vittata*、*S. emarginata*、*Haloptilus spiniceps*、*Sapphirina metallina*、*Spr-noecia parthoenoda*、毛颚类的 *Sagitta hexaptera*、磷虾类的 *Euphausia hemigibba*、介形类的 *Paraconchoecia echinata*、莹虾类的 *Lucifer typus* 等。

以上对调查区划分的 3 个区域,分别受上述 3 种不同水系的控制。这 3 种水系与用水文方法划分的调查区水系配置^[11]是相当一致的。

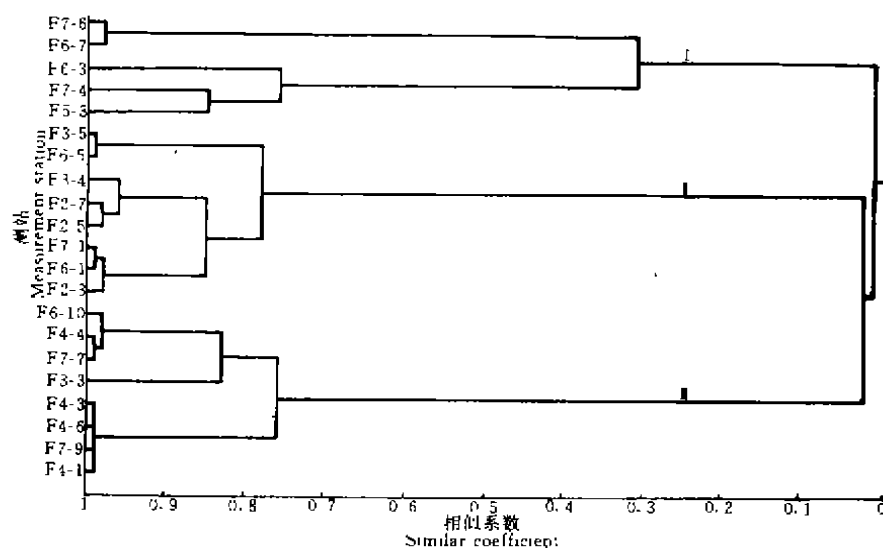


图5 浮游动物指示种的聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of indicator species of zooplankton

2.4 浮游动物的分布与锋面涡涌升水的关系

本次调查发现,在冷中心区的中心位置生物量较低(F3-5 测站, $46.39\text{mg}/\text{m}^3$),而锋区生物量较高(F3-4 测站, $105.10\text{mg}/\text{m}^3$)。这里尽管出现涌升水,但由于在涌升过程中海水的辐散运动,导致浮游动物在锋区“堆积”,而冷中心区中心位置的生物量反而比其周围区域的低(图6)。这种发生在冷中心区的低生物量现象,在一定程度上表明了冷中心区涌升水的存在。

Yamamoto 对日本东北水域黑潮暖环的研究表明,浮游动物在暖环边缘大量群集,而冷中心区的数量却较少^[4]。这与本次调查的结果是相当一致的。奥田的研究发现,在日本东北水域这种暖环边缘产生的锋面涡,往往能形成重要的渔场,并利用渔场和锋面涡的这种关系,成功地探讨了通过卫星资料来预报、寻找渔场的方法^[5]。那么东海黑潮锋面涡与渔场的形成是否也有这种关系呢?这是值得今后深入调查研究的问题。

本次调查发现的深水种主要有 6 种,它们是桡足类的 *Calanoides curinatus*、*Undeuchaeta plumosa*、*Scottocalanus securifrons*、*Heterorhabdus papilliger*、磷虾类的 *Nematoscelis microps*、

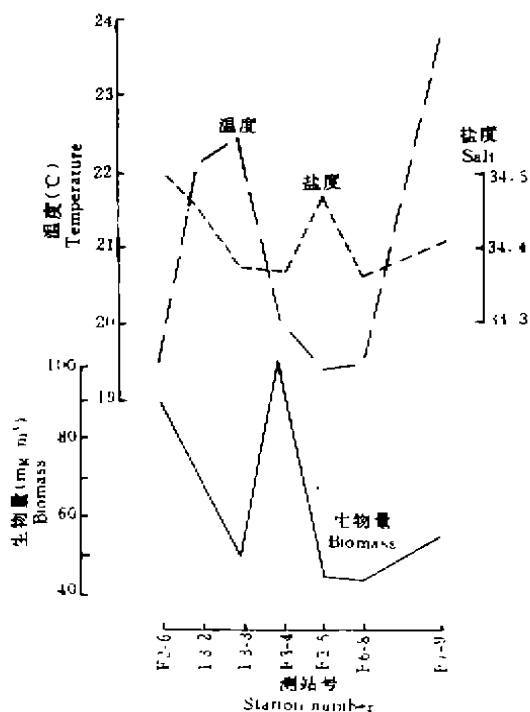


图6 黑潮锋面涡温、盐和生物量分布

Fig. 6 Distributions of temperature, salinity and biomass in the Kuroshio frontal eddy

毛颚类的 *Sagitta decipiens* 等。这些种类一般都分布在 300—500m 以深的下层水中^[11-15]。在调查区它们多出现在黑潮水或受黑潮水影响的区域,尤其在锋面涡的冷中心区出现深水种达 5 种之多,而且数量较大(图 7)。显然,这些深水种有可能在下层水涌升时被带到 200m 以浅水层。多种深水种在冷中心区及其周期区域出现,是冷中心区存在涌升水的又一佐证。

特别值得指出的是,在锋面涡的冷中心区竟发现桡足类 *Eucalanus bungii bungii* (图 7、图 8)。这是一种栖息在亲潮水中的冷水性桡足类,主要分布在 500—1000m 水层的亚寒带水中^[12,16]。*E. bungii bungii* 既是冷水种,何以能在东海黑潮区出现? 这是个值得讨论的问题。

在日本海沟中深层,有一支起源于亲潮水的南向潜流。栖息在亲潮水中的 *E. bungii bungii* 能随着这支潜流,沿着日本海沟一直分布到伊豆海岭的东侧区,并可扩布到其西侧和

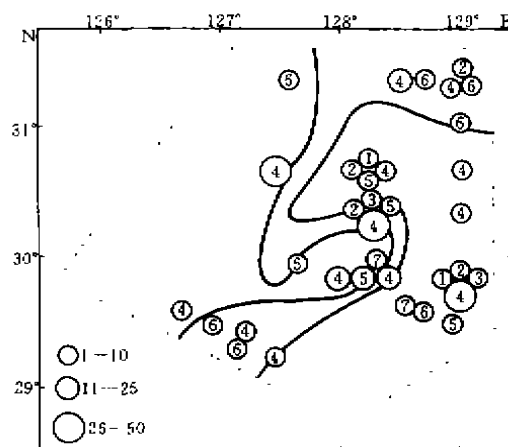


图7 深水种和冷水种的分布 ($\times 10^{-2}$ 个/ m^3)

Fig. 7 Distributions of deep-water species and cold-water species ($\times 10^{-2}$ inds/ m^3)

1. *Calanoides carinatus* 2. *Undeuchaeta plumosa*
3. *Scottocalanus securifrons* 4. *Heterorhabdus papilliger* 5. *Nematoscelus microps* 6. *Sagitta decipiens* 7. *Eucalanus bungii bungii*

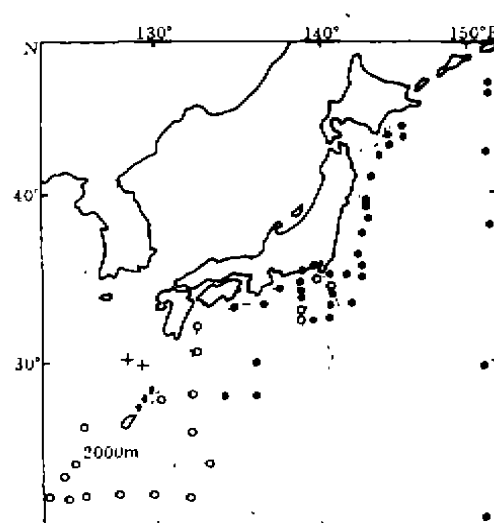


图8 邦氏真哲水蚤的分布

黑田等资料^[12,16]:●为出现,○为不出现;
本次调查资料:十为出现

Fig. 8 Distribution of *Eucalanus bungii bungii*
Data quoted from Kuroda (1980) and Sekiguchi (1975): ● indicates present, ○ absence; for the present investigated data: + indicates presence

西南区^[12,16](图 8)。本次调查,在吐噶喇海峡西侧的东海区发现了这种桡足类,这预示着位于吐噶喇海峡东侧的北太平洋下层水可能穿越吐噶喇海峡进入东海,同时把 *E. bungii bungii* 带到调查区。又由于下层水涌升,可能把这种桡足类输送到 200m 以浅——本研究拖网的水层。本次调查除了在 F3-5 测站发现这种桡足类外,还在 F6-10 测站采集到它。这可能是随着调查时间的推移,锋面涡以 30cm/s 的速度向东移动^[11]的结果。*E. bungii bungii* 在冷中心区的发现,丰富了调查区浮游动物区系的冷水种成分,并为锋面涡涌升水的研究和黑潮潜流的研究提供了生物学证据。

2.5 东海北部 4 个区域浮游动物生态特点的比较

表 1 把暖水舌区、冷中心区、近海水区、黑潮主流区浮游动物的主要生态特点进行了比较。从种类组成看,黑潮主流区的最多(188 种),近海水区的最少(96 种)。从生物量看,正好相反,近海水区的最高(196.3mg/m³),黑潮主流区的最低(35.3mg/m³)。暖水舌区和冷中心区这两种的数量都居中。

表 1 4 个区域浮游动物生态特性的比较

Table 1 A comparison of the ecological characters of the zooplankton in 4 area

区 域 Area	暖水舌区 Warm water tongue area	冷中心区 Cool core area	近海水区 Neritic waters	黑潮主流区 Kuroshio main stream area
平均生物量(mg/m ³) Aveaged biomass	48.8	41.3	196.3	35.3
种类组成(种) Species composition (Species)	162	156	96	188
两区域总种数 Total number of species of these 2 areas	206			209
两区域共有种 Common species of these 2 areas	113			74
共有种占总种数的百分比(%) The percentage(%) of the common species in total number of species	54.9			35.4

从上表看出,冷中心区和暖水舌区浮游动物共有种有 113 种,占这两个区域浮游动物总种数的 54.9%。这两个区域浮游动物种类组成的这种差异是陆架混合水和黑潮水相互作用的结果。黑潮主流区和近海水区浮游动物共有种仅 74 种,占两区域总种数的 35.4%。由此看来,前两个区域的种类组成相似性要比后两个区域的大得多。这是由于前两个区域都处在黑潮水与陆架水的交汇区,两者都具有混合水的相似面貌,而黑潮水和大陆沿岸水却是东海区两种性质决然相异的水系,所以浮游动物的种类组成相似性较小。

综上所述,在东海黑潮锋面涡旋区、近海水区和黑潮主流区,浮游动物在种类组成、数量分布和种类组成相似性等方面都各有不同特点。这些生态特性揭示了东海这一陆缘海区浮游动物分布的基本规律。

致谢 参加本文工作的还有国家海洋局第三海洋研究所陈瑞祥研究员和林景宏同志。我所吴宝铃教授和郭炳火研究员审阅本文初稿并提出宝贵意见。我所蓝乾文教授、卢中发副研究员、陈水明和丘建文博士对本文工作给予大力支持和帮助。日本水产厅中央水产研究所本立孝先生和黑田一纪博士对本文有关问题提出宝贵意见、谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 Lee T N, *et al.* Observations of a Gulf Stream frontal eddy on the Georgia Continental shelf, April 1977, *Deep-sea Res.*, 1981, **28A**(4): 347—378
- 2 奥田邦明. 暖水渔场的成果とその资源. 海洋研究上の意义, 渔业资源研究会议报, 第 26 号, 1988, 12—26
- 3 ICO-SCOR Workshop on GLOBEC. IOC Workshop Report, 1991, **75**, 1—12
- 4 Yamamoto T *et al.* Small scale zooplankton aggregations at the front of a Kuroshio warm-core ring, *Deep-Sea Res.*, 1986, **33**(11/12): 1729—1740
- 5 Peter H W, *et al.* Macrozooplankton biomass in Gulf Stream warm-core rings: spatial distribution and temporal changes, *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(C5): 8885—8901
- 6 Cabell S D, *et al.* Macrozooplankton biomass in a warm-core Gulf Stream ring: time series changes in size structure, taxonomic composition and vertical distribution, *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(C5): 8871—8884
- 7 Michael R R, *et al.* Temporal and spatial changes in epipelagic microzooplankton and mesozooplankton biomass in warm-core Gulf Stream ring 82-B, *Deep-Sea Res.*, 1985, **32**(9): 1007—1022
- 8 Peter H, *et al.* Coarse-scale horizontal patchiness and vertical migration of zooplankton in Gulf Stream warm-core ring 82-H, *Deep-Sea Res.*, 1992, **39**, Suppl. 1: 8247—8278
- 9 Terazaki M. Horizontal and vertical distribution of chaetognaths in a Kuroshio warm-core ring, *Deep-Sea Res.*, 1992, **39**, Suppl. 1: S231—S245
- 10 金玉焕主编. 医用统计方法. 上海: 上海医科大学出版社, 1993
- 11 郭炳火等. 春季东海黑潮锋面涡旋的观测和分析. 海洋学报, 1995, **17**(1): 13—23
- 12 黑田一纪. 黑潮海域における動物プランクトン——おもに毛顎動物の分布と親潮系冷水性動物プランクトンの出現について. 海洋科学, 1980, **12**(10): 695—710
- 13 郑重等. 台湾海峡浮游桡足类的分布. 1982, **1**(1): 69—79
- 14 陈清湖等. 南海北部和中部的磷虾类. 南海海洋生物研究论文集(一). 北京: 海洋出版社, 1983
- 15 Nitani H. Beginning of the Kuroshio. In "Kuroshio". Tokyo Univ. Tokyo Press, 1972
- 16 Sekiguchi H. Distribution expansion of the pelagic copepod in relation to its large-scale ontogenetic vertical migration, *Bull. Fac. Fish. Mie Univ.*, 1975, **2**: 19—28

DISTRIBUTION OF ZOOPLANKTON IN THE FRONTAL EDDY REGION OF THE KUROSHIO IN THE EAST CHINA SEA

Meng Fan Chen Shuiming Huang Fengpeng Yu Jianluan Zhang Xilie

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266003)

Ma Zhaodang Li Qinliang

(North China Sea Subadministration, SOA, Qingdao 266033)

This paper analyses the ecological characters of the food zooplankton in the frontal eddy region of the Kuroshio using the plankton samples collected from the Kuroshio and its adjacent waters in the North East China Sea in April 1989. The results are as follows:

1. 162 zooplankton species were recorded with an average biomass of 48.8 mg/m^3 in the warm water tongue area of the frontal eddy region. The trends of the distribution of the warm water species, the warm temperate neritic species and the deep-water species in the warm water tongue area were in general conformity with the dynamics of the inversion of the Kuroshio water towards the continental shelf.

2. 156 zooplankton species were recorded with an average biomass of 41.3 mg/m^3 in the cool core area of the frontal eddy region. The trends of the distribution of the warm water species, the warm temperate neritic species, the deep-water species and the cold water species in the cool core area were basically coincident with the path of the upwelling water of the cool core area.

3. Cluster analysis was made of the quantitative distribution of the 16 zooplankton species with different ecological characters. As a result, the investigated area was divided into 3 areas, which were respectively controlled by 3 different water systems. These 3 water systems were basically consistent with the distribution of the water systems of the investigated area as divided by hydrological methods.

4. The discovery of the deep water species, the cold water species and low biomass in the cool core area provided biological evidences for studies on the upwelling water of the frontal eddy region and the undercurrent of the Kuroshio.

5. In the frontal eddy region of the Kuroshio, the neritic waters and the Kuroshio main stream area in the East China Sea the zooplankton have different ecological characters. These ecological characters revealed the general patterns of the distribution of the zooplankton in the East China Sea.

Key words: zooplankton, distribution, Kuroshio.