

YSDP102 钻孔有孔虫动物群与南黄海 东南部古水文重建*

李铁刚 李绍全 苍树溪 刘 健 Jeong Hae Chang^{††}

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

[†](国土资源部海洋地质研究所 青岛 266071)

^{††}(韩国地质矿产和材料研究所 Daejeon 305-350 韩国)

提要 所研究的 YSDP102 钻孔岩心(33°49.496' N, 125°45.009' E)是由韩国能源研究所和中国国土资源部海洋地质研究所于 1995 年 8 月联合取自南黄海东南部水深 62m 的巨厚泥质沉积区内,岩心长 60.65m。通过对岩心沉积物中浮游和底栖有孔虫动物群的分析,结合相应的 AMS¹⁴C 测年数据,对黄海暖流及与其相伴生的南黄海东南部冷水体的形成及演化进行了初步的探讨。结果表明,黄海暖流及与其相伴生的南黄海东南部冷水体形成于距今约 6400 日历年前。形成伊始,冷水体处于明显的强势状态,而暖流的强度却相对较弱,这一过程约持续了 2200 年左右,是南黄海东南部巨厚泥质沉积区的主要堆积期。直到距今 4200 日历年前后,黄海暖流的影响强度开始加强,冷水体相对减弱,直至达到现代的水文状态。

关键词 浮游和底栖有孔虫 古水文 全新世 南黄海东南部

学科分类号 P736.22

南黄海现代的水文特征受到黄海暖流及与其相伴生的冷水体的深刻影响,从而控制着南黄海特殊的沉积环境和沉积物分布格局。南黄海中部和东南部两个巨厚泥质沉积区,尽管在物质来源或更为具体的成因机制等方面存在不同的看法,但它的形成与黄海暖流及其伴生冷水体的存在有着直接的关系已成为共识(Zhao *et al.*, 1990; Park *et al.*, 1992)。反过来,巨厚的泥质沉积,作为古海洋环境信息最有效的载体,为研究黄海暖流及其相关冷水体的形成与演化提供了最佳的材料。所研究的岩心样品是取自南黄海东南部的泥质沉积区(SEYSM)内,它恰好位于一个以低温、高盐和一个封闭的反时针密度流为特征的冷水体内。该冷水体的形成,是由于黄海暖流附近冷水体的切割现象,并伴随着月和年季间的变化(蓝淑芳等, 1986)。这里将根据该泥质沉积区内沉积物中浮游和底栖有孔虫的群落结构特征,探讨这个冷水体及黄海暖流的形成和演化过程。

1 材料与方法

所研究的 YSDP102 钻孔岩心(33°49.496' N, 125°45.009' E)是由韩国能源研究所和中国国土资源部海洋地质研究所于 1995 年联合取自南黄海东南部水深 62m 的巨厚泥质沉积区内(图 1)。岩心长 60.65m, 51.57m 以上至岩心顶部,是由岩性均一的浅绿灰色和

* 国家自然科学基金重点基金资助项目, 49736210 号和中国科学院院长基金资助项目。李铁刚, 男, 出生于 1965 年 8 月, 博士, 研究员, E-mail: qyscxli@ms. qdio. ac. cn

收稿日期: 1999-10-03, 收修稿日期: 2000-05-31C

橄榄灰色的泥或粉砂质泥组成。在孔深 51.57—57.6m 之间的岩性比较复杂, 主要是暗黄褐色或褐黄色含生物碎片的中砂或细砂, 伴有暗灰色和浅灰绿色粉砂质泥夹层; 57.6m 以下直至孔底, 由含有生物碎屑的粗砂砾组成。

所分析的样品平均按 30cm 的间隔取样, 共获得可供分析的样品 187 块。称取 10g 干样用清水浸泡分散, 以 0.063mm 的铜筛冲洗, 烘干后在显微镜下对其浮游和底栖有孔虫分别进行鉴定和统计。由于底栖有孔虫出现的种类较多, 为更客观、更精细的描述其所反映的古环境意义, 对至少在 3 个样品中大于 2% 的属种利用 Q 型因子方法进行分析处理。

2 年代地层

确定该岩心地层时代标尺的 8 个加速器质谱 AMS¹⁴C 年代数据是利用 5—10mg 的底栖有孔虫混合种, 由美国 Arizona 州立大学测试完成的。由于所获得年龄数据均小于 1 万年, 选用全新世海洋和大气碳储库之间的差值 - 440 年 (Mangerud *et al.*, 1975) 对所有的原始测年数据进行了校正。然后通过 CALIB3.0 程序 (Stuiver *et al.*, 1993) 将校正后的¹⁴C 年代转换成日历年。一些异常偏老年代数据很可能是由较老的壳体发生再沉积作用所致, 因此在进行年代分析时将其作为奇异点而排除 (表 1)。

表 1 AMS¹⁴C 年代及其对应的日历年

Tab. 1 Accelerator mass spectrometer radiocarbon measurements and corresponding calibrated (Calendar) ages

孔深(m)	原始年份数据	校正后的年份	日历年龄 (a)
6.13- 6.27	4745 ± 50*	4305	4410
8.84- 8.96	4340 ± 50	3900	3850
12.35- 12.52	4440 ± 60	4000	3980
41.34- 41.54	6910 ± 110*	6470	6930
48.02- 48.12	6480 ± 100*	6040	6440
50.07- 50.32	5649 ± 93	5209	5570
50.27- 50.37	6500 ± 100*	6060	6460
51.62- 51.72	6440 ± 100	6000	6400

* 作为奇异点而排除

3 结果

3.1 浮游有孔虫群落特征

在所分析的 187 个沉积物样品中, 共获得浮游有孔虫 15 个种。其主要分子有 *Globigerina bulloides*, *Globigerina quinqueloba*, *Globigerinoides ruber* 和 *Neogloboquadrina*

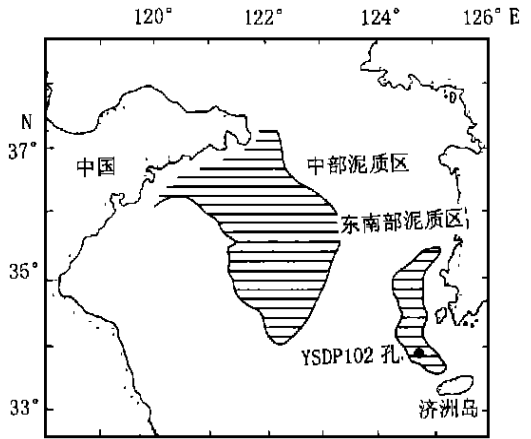


图 1 黄海中部泥质区(CYSM)和东南部泥质区(SEYSM) (据 Park 等, 1992 年) 及 YSD-P102 孔的位置

Fig. 1 Location of core YSDP102 and distribution of the Central Yellow Sea Mud (CYSM) and the Southeastern Yellow Sea Mud (SEYSM) (after Park *et al.*, 1992)

duter-trei 等, 平均含量均在 1% 以上。在孔深 51.95m 以下层位, 浮游有孔虫稀少, 个体丰度变化较大; 在孔深 51.95—16.25m 之间层位, 浮游有孔虫数量及种类明显增多, 以冷水种 *G. bulloides* 和 *G. quinqueloba* 占优势; 16.25m 以上层位, 浮游有孔虫动物群的丰度达到该剖面的最大值, *G. bulloides* 和 *G. quinqueloba* 明显减少, 暖水种 *G. ruber* 和 *N. dutertrei* 占显著优势(图 2)。

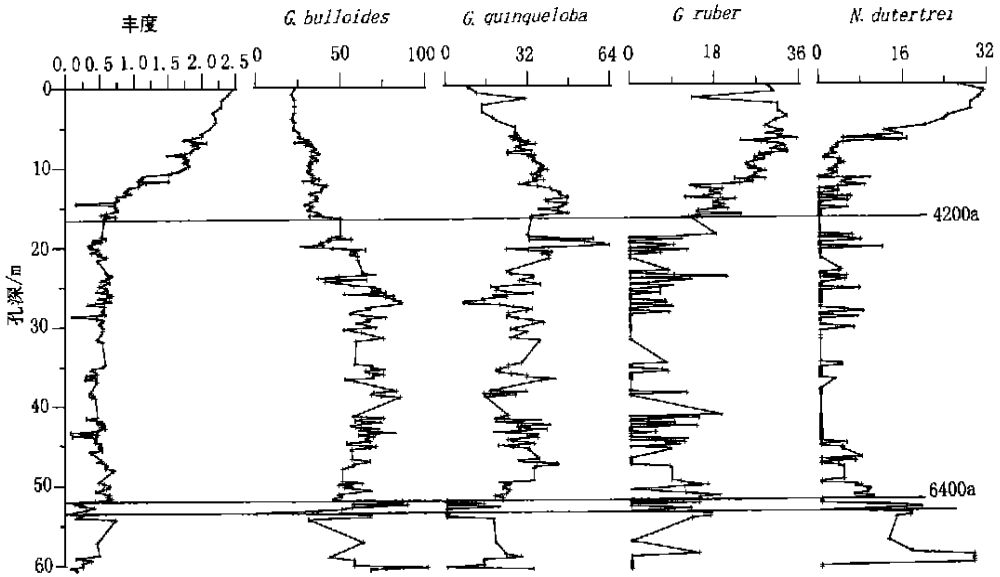


图 2 浮游有孔虫丰度[个/g, $\lg(n+1)$, $n = \text{个/g}$]
及 4 个主要属种的百分含量变化曲线

Fig. 2 Planktonic foraminiferal abundance [个/g, $\lg(n+1)$, $n = \text{个/g}$]
and percentage changing curve of the four dominant species

3.2 底栖有孔虫群落特征

在光学显微镜下鉴定统计, 共获得底栖有孔虫 122 个种, 其中有 46 种至少在 3 个样品中超过 2%。这里通过 Klován 等(1971)的 Q 型因子分析方法, 研究这 46 个主要属种的群落特征所反映的古环境变化。

经方差最大旋转的因子分析结果显示出 4 个主要的底栖有孔虫的群落结构, 这 4 个主因子共占总方差的 91%。每个主因子均在某些相关的层位出现较高的正载荷或负载荷(图 3), 从而反映了特定的沉积环境特征。根据主因子的得分, 以具有最高得分的属种来命名不同的群落(表 2)。

因子 1 为 *Epistominella naraensis* 组合; 因子 2 为 *Ammonia ketienziensis* 组合; 因子 3 为 *Buccella frigida* 组合; 因子 4 为 *Cibicides pseudoungerianus* 组合

Epistominella naraensis (Kuwanó) 组合(主因子 1), 是该剖面最大的因子组成, 可说明总方差贡献的 52.3%, 并在孔深 16.25—51.95m 之间的层位显示了最大的正载荷。相应地 *E. naraensis* 显示了最高正的得分值, 其次是 *Bolivina robusta* (Brady) 和 *Cassidulina carinata* (Silvesri)。尤其是典型的冷水种, *Buccella frigida* (Cushman) 也呈现较高的

正得分。

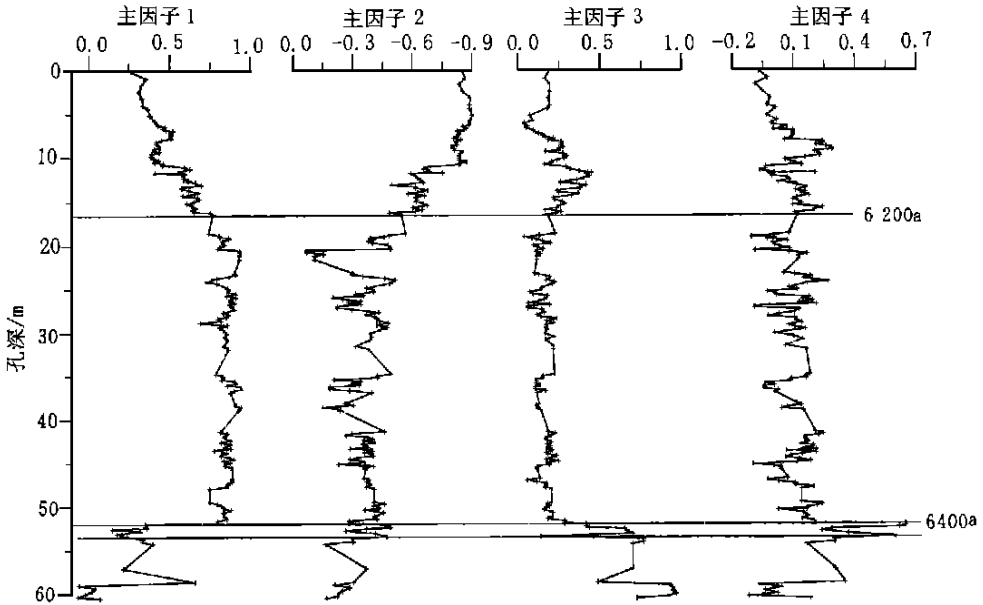


图 3 4 个主因子方差最大因子载荷变化曲线

Fig. 3 Curves of varimax loadings for four factor assemblages against the core depth

表 2 46 种底栖有孔虫在 4 个主因子上的方差最大因子得分

Tab. 2 Vamax factor score matrix for 46 dominant benthic foraminifera

属种	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
<i>Ammonia beccarii</i> var.	0.0135	0.0252	0.1835	0.0070
<i>Ammonia compressiuscula</i>	-0.0657	-0.1097	0.0105	-0.0428
<i>Ammonia confertitesta</i>	-0.0167	-0.0030	0.0792	0.0036
<i>Ammonia ketienziensis</i>	-0.0223	-0.7026	-0.0581	-0.2930
<i>Astronion tasmanensis</i>	-0.0730	-0.4868	-0.0691	-0.0290
<i>Bolivina robusta</i>	0.4337	-0.2804	-0.0794	0.1477
<i>Buccella frigida</i>	0.1118	0.0042	0.8393	-0.2096
<i>Bulimina marginata</i>	-0.0556	-0.1646	0.0034	-0.0554
<i>Canceris intermedius</i>	-0.0354	-0.0521	0.475	-0.0333
<i>Cassidulina carinata</i>	0.2485	-0.0797	-0.0057	0.0390
<i>Cassidulina minuta</i>	0.0100	-0.0019	0.0039	-0.0019
<i>Cibicides lobatulus</i>	0.0103	0.0156	0.0536	0.0769
<i>Cibicides pseudoungeriensis</i>	-0.1916	-0.2220	0.1679	0.7000
<i>Elphidium advenum</i>	0.0546	-0.0221	0.0997	0.2037
<i>Elphidium magellanicum</i>	-0.0445	0.0164	0.1552	-0.1657
<i>Epistominella naraensis</i>	0.7957	0.0265	-0.0462	-0.0155
<i>Epistominella nipponica</i>	0.0950	0.0111	-0.0229	0.0002
<i>Fissurina</i> spp.	-0.0010	-0.0321	0.0015	0.0044
<i>Florilus atlanticus</i>	0.0628	0.0121	0.0045	-0.0231
<i>Florilus decorus</i>	0.0578	0.0489	0.1666	0.0882
<i>Florilus japonicus</i>	-0.0517	-0.0488	-0.0218	0.0692

续表

属种	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
<i>Gavelinopsis praegeri</i>	0.0358	0.0182	- 0.0232	0.1535
<i>Globocassidulina subglobosa</i>	0.0560	0.0146	0.0218	0.0236
<i>Gyroidina nipponica</i>	- 0.0379	- 0.0455	0.0319	- 0.0471
<i>Hanzawia nipponica</i>	0.0629	- 0.2274	0.2686	0.3044
<i>Heterolepa dutemplei</i>	0.0350	0.0229	- 0.0003	0.1487
<i>Hoeglundina elegans</i>	0.0025	- 0.0276	- 0.0068	0.0468
<i>Lagena</i> spp.	0.0192	- 0.0482	0.0236	- 0.0279
<i>Lenticulina orbicularis</i>	0.0103	- 0.0188	- 0.0143	0.0228
<i>Nonionella stella</i>	0.0196	0.0101	0.0064	0.0008
<i>Nonionella magnalingula</i>	0.0104	- 0.0001	0.0086	- 0.0243
<i>Nonion akitæse</i>	0.0008	0.0089	0.0272	0.0070
<i>Pararotalia nipponica</i>	- 0.0275	0.0403	0.1482	0.0538
<i>Protelphidium tuberculatum</i>	- 0.0526	- 0.0481	0.1752	- 0.0937
<i>Pseudozonitoides japonicus</i>	- 0.0079	- 0.0159	0.0148	- 0.0059
<i>Pullenia quinqueloba</i>	0.0072	- 0.0152	0.0006	- 0.0035
<i>Quinqueloculina akneriana</i>	0.0065	0.0180	- 0.0122	0.1014
<i>Quinqueloculina sabulosa</i>	0.0535	0.0246	- 0.0667	0.2051
<i>Quinqueloculina seminula</i>	0.0268	0.0287	- 0.0312	0.1853
<i>Quinqueloculina seminulangukata</i>	0.0598	0.0214	- 0.0034	0.0866
<i>Rectobolivina raphana</i>	- 0.0587	- 0.1358	0.0187	- 0.0754
<i>Rosalina bradyi</i>	0.0021	- 0.0019	0.0577	- 0.0201
<i>Rosalina vilarbodeana</i>	0.0212	- 0.0140	0.0650	- 0.0605
<i>Sigmolina tenuis</i>	- 0.0432	- 0.0263	0.0223	- 0.0064
<i>Trifarina</i> spp.	- 0.0113	- 0.0077	- 0.0071	0.0269
<i>Uvigerina</i> spp.	0.0088	- 0.0099	- 0.0016	- 0.0012

Ammonia ketienziensis (Ketienziensis) 组合(主因子 2), 可解释总方差贡献的 27.9%, 在孔深 16.25m 以上层位显示了最重的负载荷, 该组合的主要属种除 *A. ketienziensis* 之外, 还包括 *Astrononion tasmanensis* (Carter), *Hanzawia nipponica* (Asano) 和 *Bulimina marginata* (d'Orbigny)。

B. frigida 组合(主因子 3), 解释总方差的 8.3%, 在孔深 52.55m 以下的层位显示了最高的正载荷, 此外在 52.55—51.95m 之间的层位也显示了较高的正载荷。 *B. frigida*, *Protelphidium tuberculatum* (d'Orbigny), *H. nipponica* 和 *Ammonia beccarii* (Linn) var. 是该组合中最重要的分子。

Cibicides pseudoungerianus (Cushman) 组合(主因子 4), 解释总方差的 2.5%, 只在孔深 51.95—52.55m 之间的 4 个样品中显示了最高的正载荷。在该组合中, *C. pseudoungerianus*, *H. nipponica*, *Quinqueloculina sabulosa* (Cushman), *Elphidium advenum* (Cushman) 和 *Quinqueloculina seminula* (Linn) 等显示了最高的正得分, 同时 *A. ketienziensis* 和 *B. frigida* 显示了与该组合具有明显的负相关。

4 分析与讨论

浮游和底栖有孔虫的群落组成主要是受其赖以生存的海流和水团的控制,反之根据浮游和底栖有孔虫的组合特征便可以恢复过去地质历史时期的古海洋环境的演化过程。YSDP102 岩心大于 0.15mm 的浮游有孔虫的丰度分布在绝大多数层位均超过 10 枚/g 干样,尤其是在 16.25m 以上层位,最多超过 300 枚/g 干样,这与南黄海西部浮游有孔虫的匮乏形成鲜明的对照,同时也说明该孔浮游有孔虫的分布与黄海暖流的影响有着密切的关系。这里既通过上述的分析结果结合测年资料来获得有关黄海暖流及其相伴生的冷水体的形成与演化信息。根据 YSDP102 岩心沉积物中的浮游和底栖有孔虫的群落结构,自下而上可以反映出 4 个不同的沉积环境类型。

孔深 52.55m 以下层位,主因子 3 在这里显示了最高的正载荷,底栖有孔虫动物群主要由 *B. frigida* 和 *P. tuberculatum* 及 *A. beccarii* var. 组成。其中 *B. frigida* 为浅海凉水种, *P. tuberculatum* 在南黄海西北部主要见于黄海沿岸流冷水分布区(汪品先等, 1988),二者指示的是冷水环境。该组合另一重要分子 *A. beccarii* var. 是西北太平洋边缘海主要分布在水深处 0—25m 之间的广盐性滨岸种(Murray, 1991)。浮游有孔虫呈零星分布,岩性则以反映高能环境的砂和砾石为主。因此,该层位所反映的是冰期结束后海面开始上升或全新世早期温凉气候环境下水深不足 20m 的近岸滨海环境。

在孔深 52.55—51.95m 之间的层位,以 *C. pseudoungerianus* 为代表的主因子 4 显示了最高的正载荷。*C. pseudoungerianus* 为印度太平洋区常见的暖水分子,在东海主要分布在黑潮暖流控制的浅海区(汪品先等, 1988)。此外,喜盐的 *Quinqueloculina* (Murray, 1991) 显示了较高的正得分,典型的凉水分子 *B. frigida* 则显示了与该组合所反映的环境成负相关的较高的负得分。因此该组合说明当时开始受到温暖高盐水的影响。浮游有孔虫仍然呈零星分布态势,岩性以砂和粉砂质泥夹层为主。可见,该层位反映的是黄海暖流及其相关冷水体正式形成之前海洋环境的快速过渡过程。

在孔深 51.95—16.25m 间的层位,距今约在 6400 和 4200 日历年之间,岩性开始以泥和粉砂质泥为主。以 *E. naraensis*, *B. robusta* 和 *C. carinata* 为代表的主因子 1 显示了十分稳定的高的正载荷,说明当时的海洋环境比较稳定。*E. naraensis* 是阿拉斯加湾(Echols et al, 1980) 和北冰洋陆架(Green, 1960) 的主要分子,在那里其所栖息的海水温度分别为 4—13℃ 和 -0.5—0.4℃,可见 *E. naraensis* 应该代表冷水环境。*B. robusta* 和 *C. carinata* 为中国近海广布的常见种, *B. robusta* 在东海中陆架 40—120m 水深区最为丰富,而 *C. carinata* 在陆坡和海槽区含量较高(汪品先等, 1988),说明海水已达到相当的深度。此外,代表底层冷水环境的 *B. frigida* 在该因子组合中也出现较高的正得分可进一步证明表明当时底层冷水体比较活跃。在考察浮游有孔虫群落时,发现其丰度在迅速增加的同时,凉水分子 *G. bulloides* (同时也是上升流区的标志种) 和 *G. quinqueloba* 占明显的优势。底栖和浮游有孔虫的这些特征表明,形成于黄海暖流切割现象的冷水体,在形成之后的相当一段时期内,即距今约 6400 和 4200 日历年之间异常强盛,因此这一时期也是南黄海东部巨厚的泥质沉积的主要形成时期。相对地,在这一时期黄海暖流的强度较弱。可见黄海暖流从开始形成就伴随着强大冷水体的存在。

孔深 16.25m 以上,即距今约 4200 日历年以来的层位仍以泥和粉砂质泥为主,但浮

游和底栖有孔虫组合却发生了明显的变化。由于主因子 2 的最高载荷集中在这一层位, 因此其底栖有孔虫的群落特征主要反映在主因子 2 的结构组成上, 其较高的载荷表明它所代表的环境与其它因子组合呈明显的负相关关系。在该因子组合中, *A. ketienziensis*, *A. tasmanensis* 和 *H. nipponica* 显示了相对较高的负得分, 成为其特征种属。该群落组合与南黄海现代 50m 以深的组合面貌吻合(汪品先等, 1988), 说明该层位所反映的海洋环境特征已经与现代基本接近。这时, 代表底层冷水体活跃的 *E. naraensis* 和 *B. frigida* 等冷水分子, 在该组合不占明显的比重, 且与该群落组合有呈负相关的趋势。浮游有孔虫群落在该层位也发生了重大变化。丰度急剧增加达到该剖面的最大值, 暖水种 *G. ruber* 和 *N. dutertrei* 开始逐渐成为优势类型, *G. bulloides* 和 *G. quinqueloba* 开始明显减少。据此推断从距今 4200 日历年开始, 黄海暖流的强度在逐渐加强, 一直达到现代最强盛的时期。相对地, 与黄海暖流相伴生南黄海东部冷水体的强度在距今 4200 年前开始逐渐减弱, 直至达到现代的状态。

5 结论

根据上述对浮游和底栖有孔虫动物群的分析, 可以初步认定黄海暖流及与其相伴生的南黄海东部冷水体形成于距今 6400 日历年前。此后, 南黄海东部区域的底层冷水异常活跃, 并发生强烈上涌过程, 导致一个稳定而强盛的冷水体的产生, 开始沉积大量的泥质沉积物。在此过程中黄海暖流的影响强度却相对较弱。这一过程大约持续到距今约 4200 日历年。随后, 黄海暖流的强度显著加强, 一直达到现代最为强盛的状态。相对地, 与黄海暖流相伴生的南黄海东部冷水体, 经过形成后近 2200 年的强盛期后开始减弱, 直到现代的水文状态。

参 考 文 献

- 汪品先, 章纪军, 赵泉鸿等, 1988. 东海底质中的有孔虫和介形虫. 北京: 海洋出版社, 1—307
- 蓝淑芳, 顾传晨, 傅秉照, 1986. 南黄海暖流水附近冷水块的分析研究. 海洋科学集刊, 27: 54—64
- Echols R J, Armentrout J M, 1980. Holocene foraminiferal distribution patterns on the shelf and slope, Yakutat-Yakutat area, northern Gulf of Alaska. In: Field M E, Bouma A H *et al* ed. Quaternary Depositional Environments of the Pacific Coast, Pacific Coast Paleogeography Symposium Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 281—303
- Green K E, 1960. Ecology of some Arctic foraminifera. *Micro-paleontology*, 6: 57—78
- Klovan J E, Imbrie J, 1971. An algorithm and FORTRAN-IV program for large-scale Q-mode factor analysis and calculation of factor scores. *Mathematics Geology*, 3: 61—77
- Mangerud J, Gulliksen S, 1975. Apparent radiocarbon ages of recent marine shells from Norway, Spitsbergen and Arctic Canada. *Quaternary Research* 5: 263—273
- Murray J W, 1991. Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera. John Wiley and Sons Inc, New York, 1—397
- Park Y A, Kim B K, 1992. Origin and dispersal of recent clay minerals in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 104: 205—213
- Stuiver M, Reimer P J, 1993. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon*, 35: 215—230
- Zhao Y Y, Li F Y, Qin Z Y *et al*, 1990. On the source and genesis of the mud in the central area of the south Yellow Sea. *Chin J Oceanol Limnol*, 8: 66—73

PALEO-HYDROLOGICAL RECONSTRUCTION OF THE SOUTHERN YELLOW SEA INFERRED FROM FORAMINIFERAL FAUNA IN CORE YSDP102

LI Tie-gang, LI Shaø-quan, CANG Shu-xi, LIU Jian, Jeong Hae Chang

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

(*Institute of Marine Geology, MLNR, Qingdao, 266071*)

(*Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Dajeon 305-350, Korea*)

Abstract The Yellow Sea Warm Current (YSWC), as a major current in the Yellow Sea plays an important role in controlling heat and salt transfer, circulation structure and sedimentation environment in the region. We studied when the YSWC and its accompanying cold water body were formed, and how did they evolve after formation based on foraminiferal communities in the Southeastern Yellow Sea Mud. Core YSDP102 (33°49.496' N, 125°45.009' E) of 60.65 m long, was drilled from the thick muddy deposit area at water depth of 62 m in the southeastern Yellow Sea (off northwest of Cheju Island). Planktonic and benthic foraminiferal census in the 183 sediment samples from the core were analyzed and age control was based on AMS¹⁴C datings using mixed benthic foraminiferal samples. Q-mode factor analysis was employed on 46 benthic foraminiferal species with relative abundance of more than 2% in at least three samples. The results indicate that the YSWC and the southeastern Yellow Sea Cold Water Body were formed at 6400 cal. yrs BP. From 6400 to 4200 cal. yrs BP, the bottom cold water mass was extremely active and had strong upwelling, so the southeastern Yellow Sea Cold Water Body was relatively strong and the YSWC was relatively weak. Since 4200 cal. yrs BP, the YSWC began to enhance gradually and is the strongest at present. Comparatively, the bottom cold water mass had experienced a weakening process and ended up with the weakest condition presently.

Key words Planktonic and benthic foraminifera Paleohydrology Holocene Southeastern Yellow Sea

Subject classification number P736.22