

# 南黄海及东海北部夏季若干 水文特征和环流的分析\*

邹娥梅 郭炳火 汤毓祥

(海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

李载学 李兴宰

(韩国海洋研究所 安山 汉城 425-600)

**提要** 利用“中韩黄海水循环动力学合作研究”1997年7月航次和“黄海综合环境调查”1998年8月航次观测所得的CTD资料,对南黄海及东海北部夏季的水文特征和特大洪水年长江冲淡水扩展特征进行探讨。同时还根据夏季所施放的卫星跟踪漂流浮标的轨迹、底层人工水母的漂移路径及等密面深度的分布对夏季环流作了阐述,提出夏季南黄海环流并非单一的气旋式系统,其内部还存在着气旋、反气旋的多个较小的环流;东海北部交替出现气旋、反气旋涡旋。

**关键词** 南黄海, 东海北部, 水文特征, 潮致冷水域, 环流, 涡旋

**中图分类号** P731

关于南黄海及东海夏季水文基本特征,毛汉礼等(1964)、Nakao(1977)已做过较系统的描述。80年代的研究主要集中在某些突出的水文现象,如揭示了夏季南黄海冷水团存在两个冷中心(林金祥等,1981),黄海近岸区存在若干个潮致冷水域(Guo *et al.*, 1982<sup>1)</sup>;赵保仁,1987),及长江冲淡水异常变化等(林金祥等,1985)。中、韩、美三国于1986年1月和7月进行了联合调查,赵保仁等(1986, 1991)利用调查所得的CTD资料进一步地细分了黄海冷水团的内部结构并给出南黄海和东海的环流图像。当今对黄海环流的研究已进入深化阶段,有些学者对夏季黄海暖流的存在提出质疑(Lie *et al.*, 1994)。中韩黄海水循环动力学合作研究项目,试图以更现代化的手段,在较完全的空间尺度和季节时间尺度上进一步深入调查研究,以期弄清黄海环流的主要特征。本文根据1997年<sup>2)</sup>和1998年两个夏季的调查资料<sup>3)</sup>及1994年<sup>4)</sup>和1997年卫星跟踪漂流浮标的轨迹<sup>2)</sup>及1997年底层人工水母运移路径<sup>2)</sup>来探讨调查海区若干突出的水文特征和环流型式,为认识整个黄海的水文及环流特征提供依据。

\* 国家自然科学基金资助项目,49676283号。邹娥梅,女,出生于1943年2月,研究员, E-mail: ysea@public.qd.sd.cn

1) Guo Binghuo, 1982. The temperature and salinity structure and the circulation in the Yellow Sea. In: Proceedings of the Japan-China Ocean Study Symposium. Oct. 1981, Shimizu 1982. 174-197

2) 中韩黄海水循环动力学合作研究(1996-1998)

3) 黄海综合环境调查研究(1997-2001)

4) 韩国海洋研究所提供的卫星跟踪浮标(1986, 1994, 1997)

收稿日期: 1999-03-09; 收修改稿日期: 2000-05-17

### 1 近岸冷水域分布

黄海近岸夏季存在若干个潮致冷水域(或称为陆架锋区),是黄海突出的水文现象之一。1997年7月和1998年8月的调查结果(图1),显示了这些冷水域在近表层(5m)的分布特征。图1a表明,围绕着山东半岛东端存在近表层水温小于20℃(最低水温为19.57℃)的冷水域,它比周围的温度约低4—5℃,位于苏北浅滩外侧存在一个冷水带,它的中心水温低于20℃(最低水温为19.52℃),比周围水域约低4—5℃。此外,在木浦外海,虽然测站离岸较远,但仍然存在水温低于22℃(34°N断面124°50′测站温度为21.90℃)的冷水域。1998年8月苏北浅滩外的冷水域更加发达,它可扩展到大沙水域并与长江口门外冷水连成一片,并在其边缘形成一条又长又强的陆架锋区。

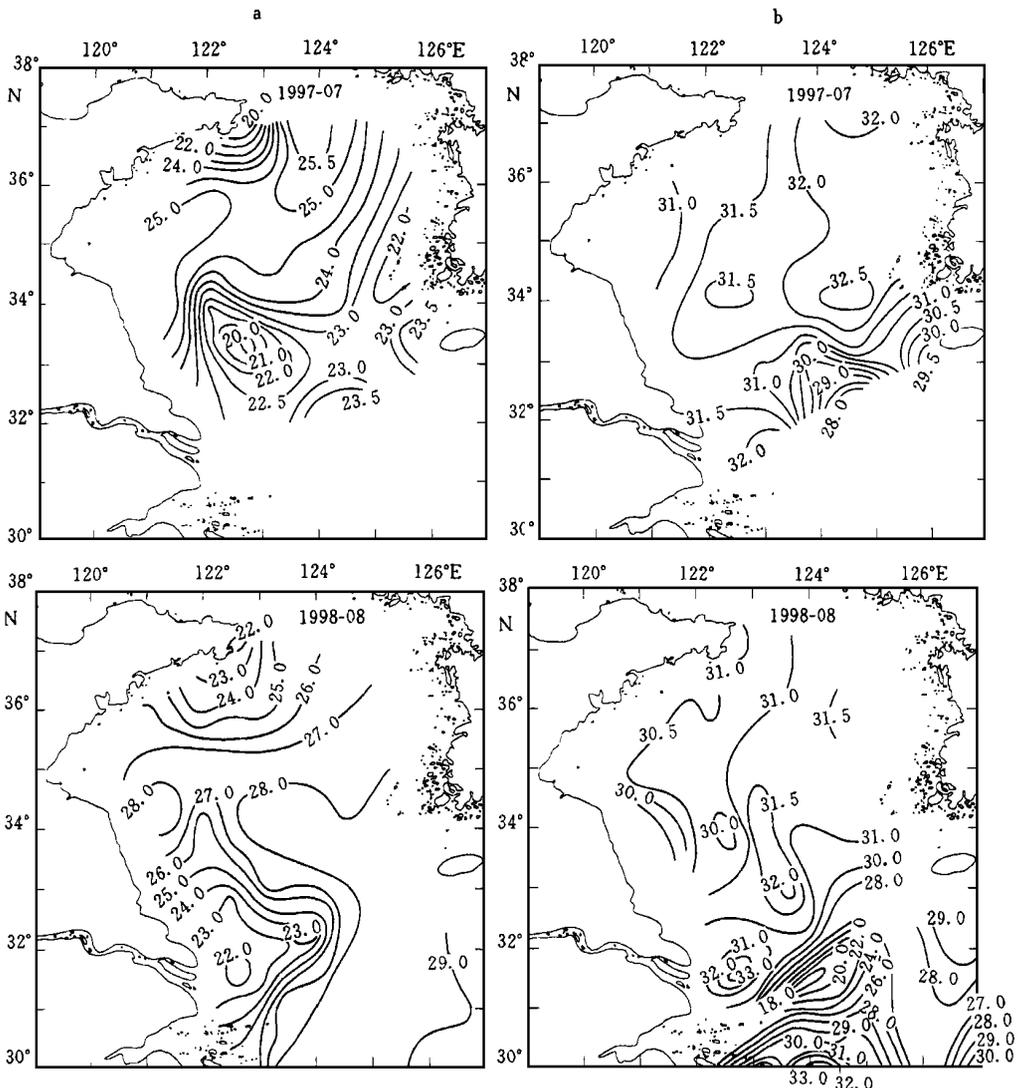


图1 5m层温(a)、盐度(b)的分布

Fig. 1 The distributions of temperature (a) and salinity (b) at 5m depth

以上所提到的黄海近岸几处冷水域,绕山东半岛所出现的冷水域是由上升流所引起的(Guo *et al.*, 1982)<sup>1)</sup>。郭炳火等(1986)还根据动力学原理导出了物理机制的一种解析模式,并用热动力学方程的解描述了上升流在夏季造成局部冷水的现象;而苏北浅滩外的冷水域普遍被认为是潮混合所致,1998年7月28日的卫星红外影像揭示了在苏北浅滩外缘出现与地形完全匹配的冷水带,也展现了低温相隔的辐射状条纹。由此可见,这种冷水抬升是潮混合所致。但冷水域(或称陆架锋区)是否存在上升流,不少学者进行了定性分析、理论推导和数值计算,他们得到的结果却完全不同。这些冷水域位于黄海冷水团的边缘,Hu(1994)在研究黄海冷水团垂直环流时认为冷水团中心为上升流,边缘为下降流,而Takahashi等(1995)、苏纪兰等(1998)、赵保仁等(1996)得到完全相反的结论,即冷水团中心为下降流,而边缘为上升流;袁业立等(1993)的理论模式得到,冷水团垂向环流只在温跃层附近很薄的水层中进行。显然潮致冷水域存在上升流或下降流有待于进一步深入研究。

## 2 长江冲淡水的扩展

长江冲淡水是夏季表层最重要的水文特征之一,主要是浙江沿岸流在向北运移过程中与长江及钱塘江的入海径流相汇合,在长江口外形成一股较强的冲淡水,水舌的指向通常是东北向,扩展远而广。但也存在一种异常现象,如1975、1982和1984年8月其方向转向北上(林金祥等,1985)。根据1997和1998年夏季航次所绘制的表层(1m层)盐度分布(图2)可以清楚地看出,长江冲淡水向南黄海扩展的迹象;而1998年8月正当长江流域暴发特大洪水,长江径流先由长江口门附近冲向东南,然后约于 $31^{\circ}\text{N}$ 、 $122^{\circ}30'\text{E}$ 附近转向东北直指济州岛形成一个明显的冲淡水舌,盐度的变幅相当大,口门外的盐度低于6,而且冲淡水的核心区( $S < 26$ )可抵达 $125^{\circ}30'\text{E}$ ,冲淡水舌几乎可扩展到济州岛附近,盐度小于28的扩展范围超过 $128^{\circ}\text{E}$ 。5m以浅均有很明显的舌状分布。与已有的历史观测资料相比较,从1998年8月长江冲淡水的盐度指标及扩展范围来分析,可以认为其是迄今为

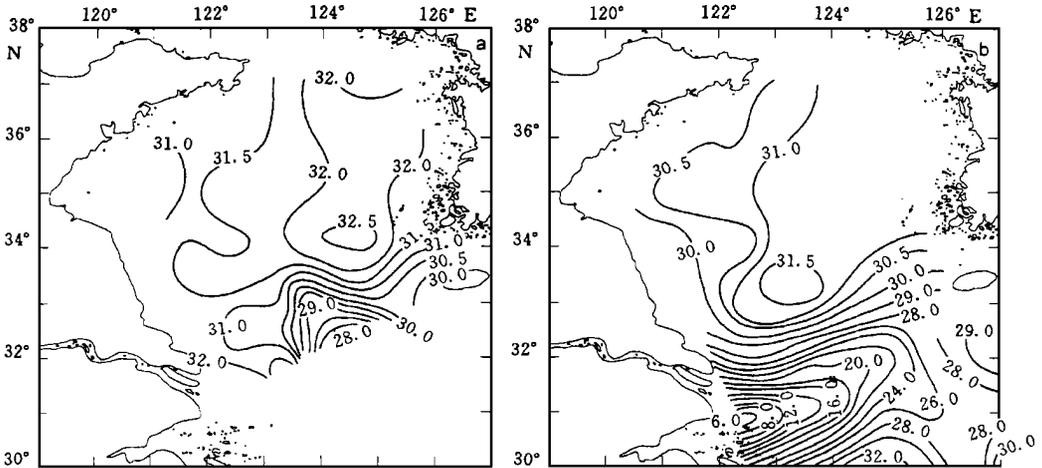


图2 1997年7月(a)和1998年8月(b)表面(1m)盐度的分布

Fig. 2 The distributions of salinity at the surface (1m) in July 1997 (a) and August 1998 (b)

1) 见第340页脚注1)

止所观测到的最强的一次。

根据 1998 年 8 月的调查和历史上断面调查资料所展示的长江冲淡水扩展形态, 将长江冲淡水入海之后的扩展可分为 3 个阶段。

第 1 阶段: 转向阶段, 其转向点均发生在  $122^{\circ} 30' E$  以西的口门外。经分析认为长江冲淡水转向的原因是多方面的, 冬季浙江沿岸流顺岸南流, 而夏季浙江沿岸流在偏南风作用下沿岸北上, 阻碍了冲淡水的南下使冲淡水转向。这也正如浦泳修等(1984) 和赵保仁等(1991) 所论证的沿岸水位南高北低的水位梯度与冲淡水转向现象密切相关。还应提到长江径流入海流量大也将影响冲淡水的转向位置。

第 2 阶段: 扩展阶段, 冲淡水以水舌形态向外海扩展, 其范围即为盐度小于 26 的冲淡水的核心区。朱建华等(1997) 的数值模拟结果认为苏北沿岸流对长江冲淡水扩展方向有重要的影响; 关于变性的台湾暖流水对长江冲淡水路径的偏北起“顶托”作用已有许多作者论述过(苏育嵩, 1989)。图 1a、b 显示在近表层(5m) 能看到零星抬升上来的变性台湾暖流水, 进一步证实了夏季在西南季风作用下, 变性的台湾暖流水在北伸过程中不断上爬从长江冲淡水的下方插至长江口门外。综合前人的研究及近期的调查, 可以认为北上的台湾暖流与南下的苏北沿岸流在长江口以东汇合转向东, 因此冲淡水的扩展方向, 应取决于在它们之间的强弱之比。然而, 此阶段冲淡水舌仍然保持它的整体运动属性, 从图 3 可以看到浮在近表层的冲淡水流态与其下方的背景流域仍存在明显的差别。

第 3 阶段: 冲淡水运移阶段, 即盐度小于 30 的范围, 冲淡水运移方向完全溶入背景流场。由图 2 可以看出盐度小于 28 的表层水形成低盐带先向东南, 后转东北, 延伸到  $128^{\circ} E$  以东, 在此低盐带还出现盐度小于 27 的间断水块, 冲淡水扩散是绕济州岛西南水域做气旋式的涡旋运移。

### 3 环流特征

由于缺乏南黄海和东海北部大范围连续观测的海流资料, 因而将以上述所描述的研究海域温、盐结构为基础, 并根据 1994 和 1997 年卫星跟踪漂流浮标的轨迹分析及 1997 年夏季底层水母运移路径探讨夏季黄海环流的基本特征。

#### 3.1 南黄海上层环流

通过与实测流的比较, 研究选取位于跃层中的等密面, 并绘制其深度分布图能较好地反映斜压流场的特征。图 3 为 1998 年 8 月夏季  $\sigma_t = 23.0$  的等密面所在深度的分布。由图 3 可见, 黄海表层环流形态主要是: 黄海沿岸流在苏北沿岸一部分水沿着 40—50m 等深线东南下, 在  $32^{\circ} - 33^{\circ} N$  附近由东南转向偏东流入东海, 与 1986 年 7 月 WHOI 漂流

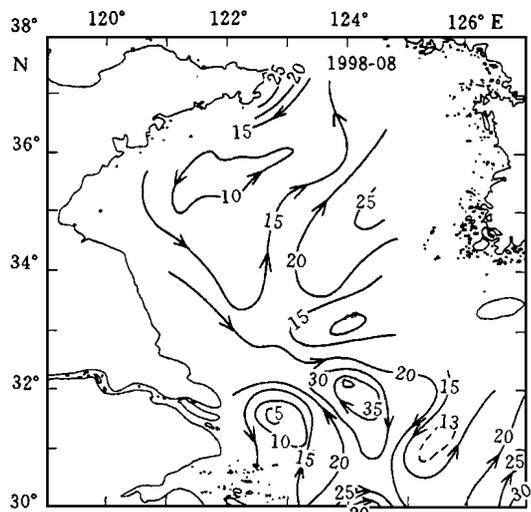


图 3 1998 年夏季  $\sigma_t = 23.0$  等密度面上深度(m) 的分布

Fig. 3 The distribution of depth (m) at 23.0 isopycnal

surface in the summer of 1998

浮标显示的漂移轨迹十分相似(汤毓祥等, 2000); 而另一部分水约在  $33^{\circ}30'N$  处沿  $124^{\circ}E$  北上构成逆时针方向的气旋式环流; 10—20m 层温度的水平分布(图 4) 都呈现出在研究海区的东侧, 存在由东北向西南伸展的相对高温的暖水舌, 其构成的顺时针向的反气旋与西侧的气旋环流的配合, 使  $123^{\circ}-124^{\circ}E$  间形成向北的流, 可达到北黄海。这一向北的流也同样从韩国海洋研究所 1994 年和 1997 年夏季(中韩合作项目) 所施放的卫星漂流浮标的轨迹(汤毓祥等, 2000) 得以证实。另外, 青岛外海的  $36^{\circ}N$ 、 $122^{\circ}E$  处所存在的冷水也在等密度面深度分布图上明显地反映青岛外海域存在的气旋式冷涡(图 3), 而在漂流浮标轨迹上未能被显示出来, 这可能是由于此环流比较弱的原因。

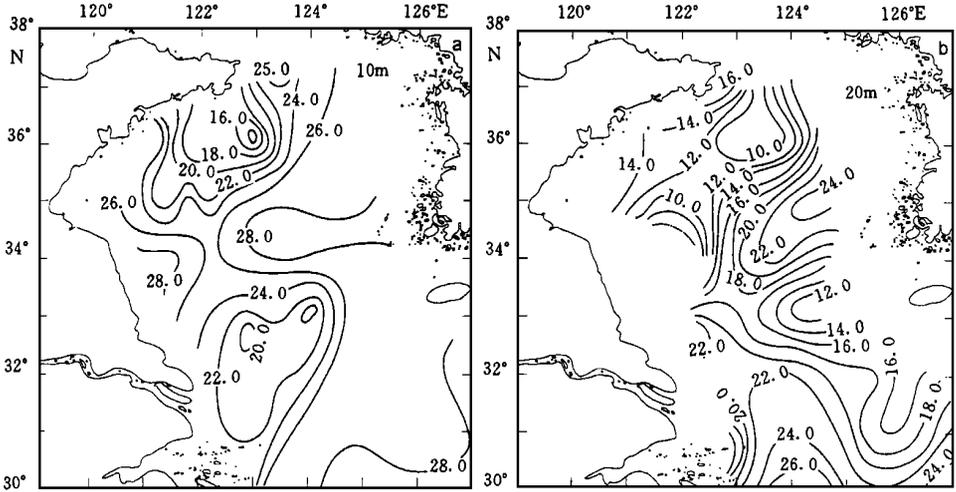


图 4 1998 年 8 月 10m (a) 和 20m (b) 层温度分布

Fig. 4 The distributions of temperature at 10m (a) and 20m (b) in August 1998

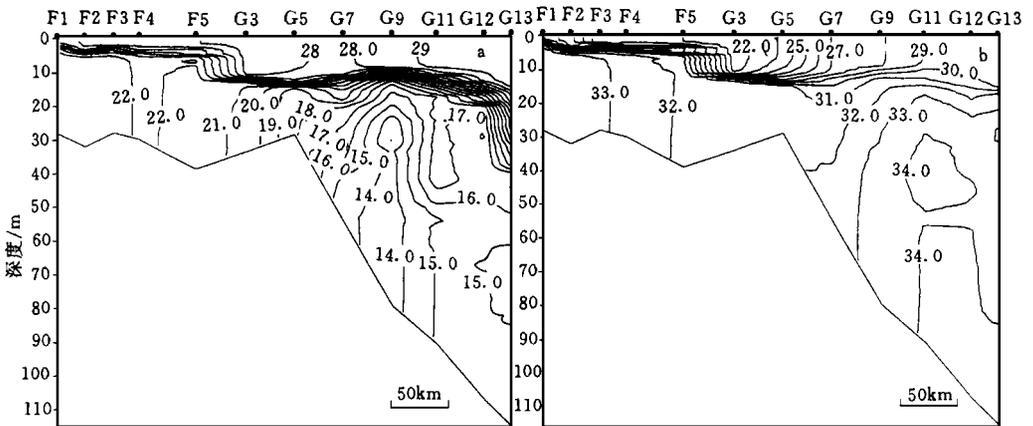


图 5 1998 年 8 月 FG 断面温度(a) 和盐度(b) 断面分布

Fig. 5 The distributions of temperature and salinity at the FG profile in August 1998

### 3.2 东海北部涡旋

东东北部是北上的台湾暖流和浙江沿岸流、南下的苏北沿岸流、黄海冷水团环流及东

侧的对马暖流等分支流交汇的水域, 它们之间相互作用构成了复杂的环流图像。根据  $\sigma_t = 23.0$  等密度面上深度的分布(图 3), 推测可能存在气旋、反气旋交替出现的以下 3 个涡旋。

(1) 长江口门外气旋式涡旋 分析已知, 夏季长江冲淡水入海后, 顺口门冲向东南, 至离岸不远处转向东, 或东北, 这一转向导致了长江口门外气旋式涡旋的形成, 从而将冲淡水下方插入口门外的台湾暖流水泵吸抬升至近表层。因此长江口门外的冷水抬升现象不是潮混合所致, 而是气旋式涡旋导致的底层冷水的抬升, 该涡旋的存在还说明夏季在苏北沿岸投放的海流瓶以较快的速度漂至舟山北部水域的原因(陈则实, 1979)。

(2)  $125^\circ - 126^\circ 30' E, 30^\circ - 32^\circ N$  气旋式涡( 济州岛西南冷涡) 该涡由于在暖季向东推移, 外海水受阻而不能进入南黄海。郭炳火等(1998)曾指出, 济州岛的西南角附近出现的  $S > 34.0$  的高盐水块能沿冷水顶边缘升到 50m 层, 但约只有 10m 厚度, 而且只达到

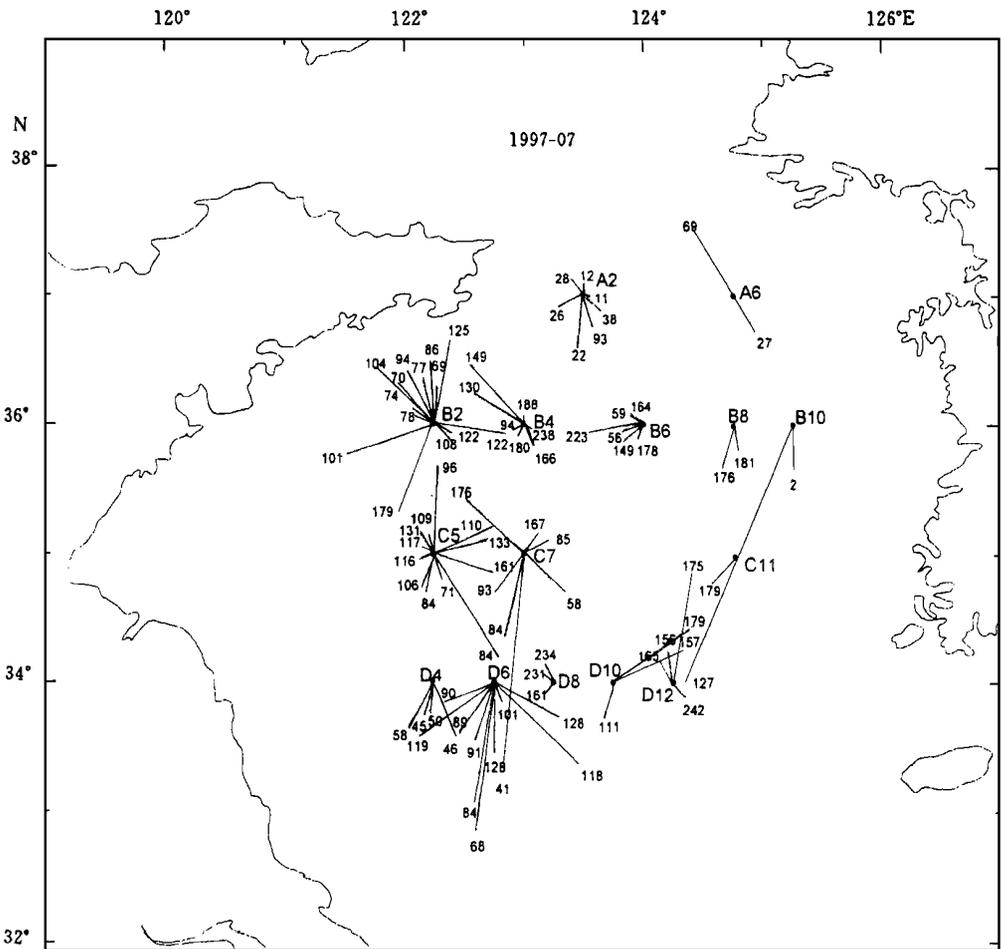


图 6 1997 年 7 月底层漂浮物运移轨迹

Fig. 6 The bottom drifters trajectories in July 1997

图中英文字母表示不同的断面: A 为  $37^\circ N$  断面; B 为  $36^\circ N$  断面; C 为  $35^\circ N$  断面; D 为  $34^\circ N$  断面; 数字表示测站号

济州岛的西侧近邻水域。1997年7月,底层盐度  $S > 34.0$  的高盐水仅出现在  $33^{\circ}27' N$ 、 $125^{\circ}30' E$  附近水域,因此进一步证实夏季没有外海高盐水进入南黄海的观点。

(3) 在上述两个气旋式涡之间存在反气旋式涡。由 FG 断面温、盐度断面分布图(图4)显示  $32^{\circ}10' N$ 、 $124^{\circ}E$  和  $32^{\circ}N$ 、 $125^{\circ}E$  之间的水域海水下沉,下沉最明显的区域位于  $32^{\circ}N$ 、 $124^{\circ}30' E$ ; 同样在  $31^{\circ}N$  断面温、盐的断面分布图(图略)也显示出  $31^{\circ}N$ 、 $124^{\circ}30' E$  附近水域的海水下沉特征,可以推断约在  $31^{\circ}N - 32^{\circ}N$ 、 $123^{\circ}30' - 124^{\circ}30' E$  间必然存在反气旋式涡。

### 3.3 黄海盆内底层环流

为查明黄海冷水团内部环流形态,于1997年7月的调查期间投放了上千个底层人工水母(底层漂流伞)。从图6中所示的是回收到的人工水母漂移情况。其中  $B_2$ 、 $C_5$ 、 $C_7$  站人工水母漂移方向四面八方都有,考虑到渔船拖网时从拖到人工水母至起网,可能移动一段距离,因此对于距投放点较短的那些资料不予考虑。可粗略地勾画出黄海底层的环流,其中有几支底层流是比较明显的。苏北浅滩处的南向流,  $125^{\circ}E$  附近的南向流,黄海中部( $124^{\circ}E$  附近)的北向流,山东半岛东端东南水域的气旋式环流,比较图6和图3可以看到,黄海上层和底层环流的基本形态是一致的,依据人工水母漂移距离和时间,得到底层流最大流速不超过  $2\text{cm/s}$ 。以上分析表明,夏季南黄海环流并非仅是单一的气旋式系统,其内部还存在着气旋,反气旋的多个较小的环流。

## 4 结语

4.1 黄海近岸夏季存在若干个潮致冷水域,它是黄海突出的水文现象之一。1997年7月和1998年8月的调查结果(图1),也显示了这些冷水域在近表层(5m)的分布特征。

4.2 1998年8月长江流域暴发特大洪水,长江径流先由长江口门附近冲向东南,然后约于  $31^{\circ}N$ 、 $122^{\circ}30' E$  附近转向东北直指济州岛形成一个明显的冲淡水舌。口门外的盐度低于  $S < 6$ ,冲淡水的核心区( $S < 26$ )可抵达  $125^{\circ}30' E$ ,冲淡水舌几乎可扩展到济州岛附近。长江冲淡水的扩展大致可分为转向、扩展和运移3个阶段。

4.3 夏季南黄海环流并非仅是单一的气旋式系统,其内部还存在气旋、反气旋的环流。在东北北部交替出现的3个涡旋。它们分别是:长江口门外气旋式涡旋;  $31^{\circ}N - 32^{\circ}N$ 、 $123^{\circ}30' - 124^{\circ}30' E$  间存在反气旋的涡和  $125^{\circ} - 126^{\circ}30' E$ 、 $30^{\circ} - 32^{\circ}N$  间所形成的气旋式冷涡。

## 参 考 文 献

- 毛汉礼,任允武,孙国栋,1964. 南黄海及东海北部夏季的水文特征及海水类型的初步分析. 海洋科学集刊, 1: 23—27
- 朱建华,沈焕庭,周健,1997. 夏季苏北沿岸流对长江冲淡水扩展影响的数值模拟. 华东师范大学, 2: 62—67
- 陈则实,1979. 黄海海流状况. 海洋研究, 3(增刊): 1—42
- 苏纪兰,黄大吉,1998. 黄海冷水团的环流结构. 海洋与湖沼, 29(5增刊): 1—7
- 苏育嵩,1989. 黄、东海地理环境与环流系统分析. 青岛海洋大学学报, 19(1) II: 145—158
- 汤毓祥,邹娥梅,李兴宰等,2000. 南黄海环流的若干特征. 海洋学报, 22(1): 1—16
- 林金祥,宋万先,1981. 黄海冷水团的基本特征. 海洋研究, 4: 1—16
- 林金祥,王宗山,1985. 关于长江冲淡水异常变化的分析. 黄渤海海洋, 3(4): 11—19
- 赵保仁,1987. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究. 海洋与湖沼, 18(3): 217—226

- 赵保仁, Limeberner R, 胡敦欣等, 1991. 夏季南黄海和东海北部水文特征. 海洋与湖沼, 22(2): 132—139
- 赵保仁, 1996. 北黄海冷水团环流结构探讨——潮混合锋对环流结构的影响. 海洋与湖沼, 27(4): 429—435
- 郭炳火, 夏综万, 1986. 潮流绕半岛诱导上升流的解析模式. 海洋学报, 8(3): 272—282
- 郭炳火, 李兴宰, 李载学, 1998. 夏季对马暖流区黑潮水与陆架水的相互作用. 海洋学报, 20(5): 1—12
- 浦泳修, 许小云, 1984. 长江口南北两岸间海面坡度的季节性变化. 东海海洋, 2(1): 9—14
- 袁业立, 李惠卿, 1993. 黄海冷水团的环流结构及生成机制研究——1.0 阶解及黄海冷水团的环流结构. 中国科学(B 辑), 23(1): 93—103
- Hu Dunxin, 1994. Some striking features of circulation in Huanghai Sea and East China Sea. *Oceanology of China Seas*, Volume 1. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 27—28
- Lie Heung Jae, Cho Cheol Ho, 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. *J Geophys Res*, 99(C12): 25081—25091
- Nakao T, 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *J Faculty Mar Sci and Technol*, Special Number, 199—234
- Takahashi S, Yanagi T, 1995. A numerical study on the formation of circulation in the Yellow Sea during summer. *Lamer*, 33: 135—147
- Zhao Baoren, Xiong Q, Zhang F, 1986. The internal hydrographic structure of the Huanghai Cold Water Mass. *J Oceanol Limnol*, 4(1): 28—40

# AN ANALYSIS OF SUMMER HYDROGRAPHIC FEATURES AND CIRCULATION IN THE SOUTHERN YELLOW SEA AND THE NORTHERN EAST CHINA SEA

ZOU E-Mei, GUO Bing-Huo, TANG Yuxiang

(Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration;  
First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266003)

Jae Hak Lee, Heung Jae Lie

(Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Korea Seoul 425-600)

**Abstract** Summer hydrographic features and the extension of the Changjiang River Diluted Water in the southern Yellow Sea and northern East China Sea are described, based on the CTD data measured in summer cruise (July 1997) of “PRG-Korea Joint Investigation of Ocean Circulation Dynamics in the southern Yellow Sea” and that (August 1998) of “Comprehensive Hydrographic Investigation in Continental Shelf of the Yellow and the East China Seas”. Analyses show that there are several cold water areas induced by tidal mixing near shore in summer, which is one of the outstanding features in the Yellow Sea. The satellite infrared imagery on the July 28 of 1998 demonstrated the belt of cold water coincided completely with topography near the edge of Subei shallow shoal and it also shows radiated stripes with low temperature alternatively, which implies that the upwelling cold water near the Subei shallow shoal is totally caused by tidal mixing. Changjiang River Diluted Water is another surface important feature in summer. The Changjiang River runoff from the river mouth flowed southeastward firstly, and then turned to northeast at about  $31^{\circ}\text{N}$ ,  $122^{\circ}30'\text{E}$  toward the direction of Chejudao to form a distinct fresh water tongue which almost extended through to Chejudao in the high flooding year of 1998. According to the in situ CTD observed data from the August of 1998 and the analysis of historical data, the authors suggested that the extension of Changjiang River Diluted Water could be summarized into three stages after it flows into the sea, i. e. turning, extending and transmitting stages.

In the meantime, the summer circulation is also depicted in this paper, based on the satellite drifter buoy trajectories deployed in summer, the bottom drifter trajectories in the July of 1997 and the distribution of depth at 23.0m isopycnal in the August of 1998. The results show that one part of coastal currents near the Subei shallow shoal flow southeastward along the 40–50m isobath, and then turns by east flowing into the East China Sea at about  $32^{\circ}$ – $33^{\circ}\text{N}$ , whereas another part flows northward along  $124^{\circ}\text{E}$  at about  $33^{\circ}30'\text{N}$ . Thus, an anti-clockwise cyclonic circulation is formed. In the east of the study sea area, there is a warm water tongue with relative high temperature stretching from the northeast to the southwest, which forms a clockwise anticyclonic circulation. The existence of both cyclonic and anticyclonic circulations make the water between  $123^{\circ}\text{E}$  and  $124^{\circ}\text{E}$  flow northward, up to the northern Yellow Sea. Meanwhile, three alternative gyres are present in the northern East China Sea: the cyclonic gyre out of the Changjiang River mouth, the cyclonic gyre between the sea area of  $125^{\circ}$ – $126^{\circ}30'\text{E}$ ,  $30^{\circ}$ – $32^{\circ}\text{N}$ , and the anticyclonic gyre between  $123^{\circ}30'$ – $124^{\circ}30'\text{E}$ ,  $31^{\circ}$ – $32^{\circ}\text{N}$ .

**Key words** Southern Yellow Sea, The northern East China Sea, Hydrographic feature, Cold water induced by tidal mixing, Circulation, Gyre