

夏季南黄海深层冷水团 内部的水文结构*

赵保仁 熊庆成 张法高

(中国科学院海洋研究所)

在整个黄海水域,夏季存在着范围广阔的深层冷水块。习惯上根据地域分布的不同,把地处北黄海的冷水块叫“北黄海冷水团”,地处南黄海的叫“南黄海冷水团”,这两冷水块连成一体通称“黄海冷水团”。赫崇本^[5]是我国最早分析黄海冷水团的基本属性和消长变化的学者之一;而后,管秉贤^[4]分析了黄海冷水团的水温变化和环流结构,并进一步确认黄海冷水团是冬季保留下来的。近几年来我国学者对黄海冷水团的成因和水文、环流结

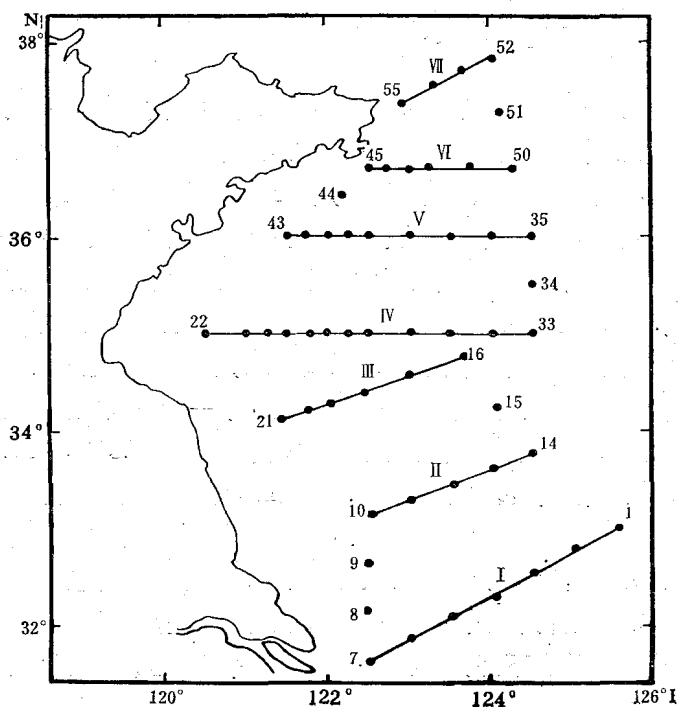


图 1 站位图

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1330 号。

本文主要依据中美南黄海联合调查第二航次资料写成(英文稿发表于“Chinese Journal of Oceanology and Limnology” Vol. 4, No. 1)。参加调查的有中美双方的海洋科学家和“科学一号”、“金星二号”调查船,文中插图由杜涓山同志清绘,毛汉礼教授审阅全文并提出宝贵意见,在此一并表示感谢。

收稿日期:1986年3月1日。

构又有不少新的研究。例如,袁业立^[3]提出的热生模式较好地讨论了北黄海冷水团中心区域的热结构和环流结构;Guo Binghuo (郭炳火)^[6]根据南黄海冷水团分裂成两个低温中心,指出:围绕南黄海冷水团存在着大小两个气旋式冷水团环流。万国铭等¹⁾依据经典的水团分析技术指出:南黄海冷水团仅分布于123°E以西的狭小区域,而123°E以东的广阔水域则为黄海暖流底层水所占据。赵保仁^[2]提出潮混合对黄海冷水团的边界起着重要的控制作用。以上几种观点,对进一步分析黄海的水团和环流结构都有着启发意义。

本文的主要目的,是依据1984年7月中美联合调查所获得的水文资料(站位见图1)和部分历史资料来阐明南黄海冷水团内部的复杂结构。分析结果表明,夏季南黄海深层冷水团内部,仍然存在着春季保留下来的具有高温高盐性质的黄海暖流水系的扩张现象。这一扩张现象似可理解为与黄海暖流同源但已被切断联系的黄海暖流残迹在黄海冷水团内部继续前进的反映。因此,夏季黄海冷水团可进一步划分为具有高温高盐性质的“黄海暖流水”和具有低温低盐性质的“黄海本地冷水”两个次级水团。在这两种水团之间,存在着明显的锋面和显著的混合现象,在锋面处还可以观测到由双扩散产生的两水团之间的相互侵入现象。

一、冷水团内部的水文结构

1. 断面特征 为了阐明南黄海深层冷水团内部的水文结构,我们首先分析温盐等要素的断面分布特征。图2给出沿35°N线的温度、盐度和溶解氧的断面分布图。为了剖析季节性主温跃层下的冷水区的水文结构,图2a中用较小的温度间隔,以点线画出冷水团内部的温度分布。从温度断面看出,季节性主温跃层的位置在10—30 m的深度处。断面西侧接近冷水边界处,跃层较浅,强度较大,等温线有明显的抬升现象。27站以东,温跃层减弱,等温线分布比较平展。从断面图2a, b看出,在主温跃层以深的冷水区域,断面中部(30—31站附近)有一从海底凸起的高温高盐区,其温、盐度的最高值分别为8.26°C和33.65‰。在此高温高盐区两侧各有一低温低盐区,一个在断面西部水深约45 m的底部斜坡上(中心位置在122°E附近),最低温、盐度分别为7.3°C和32.4‰;另一个在124°E附近,这里水深较大,冷中心位于中层45 m处,最低温、盐度分别为6.9°C和32.8‰。

我们进而分析该断面溶解氧的分布特征。从图2c可以看出,夏季黄海溶解氧分布的主要特征是在主温跃层底部附近存在着一个高氧层。但是,处于底部高温高盐水区上面的这一高氧层,溶解氧值明显下降,而与两个冷中心相对应区域的溶解氧值却高达8 mL/L以上。

在其他断面上,温度、盐度及溶解氧的断面分布也有与上述类似的特征。这些现象表明,在南黄海冷水团内部,存在温、盐度较高,溶解氧值较低的另一水体。

2. 温度和盐度的平面分布特征 现在我们进一步揭示冷水团内部高温高盐水的平面分布特征。图3给出底层(图3a, b)和50 m层(图3c, d)的温、盐度分布。如图3a所

1) 万国铭,朱敬椿,袁增盛,1982。南黄海冷水团月变化及其成因的初步分析。海洋调查,第1期。

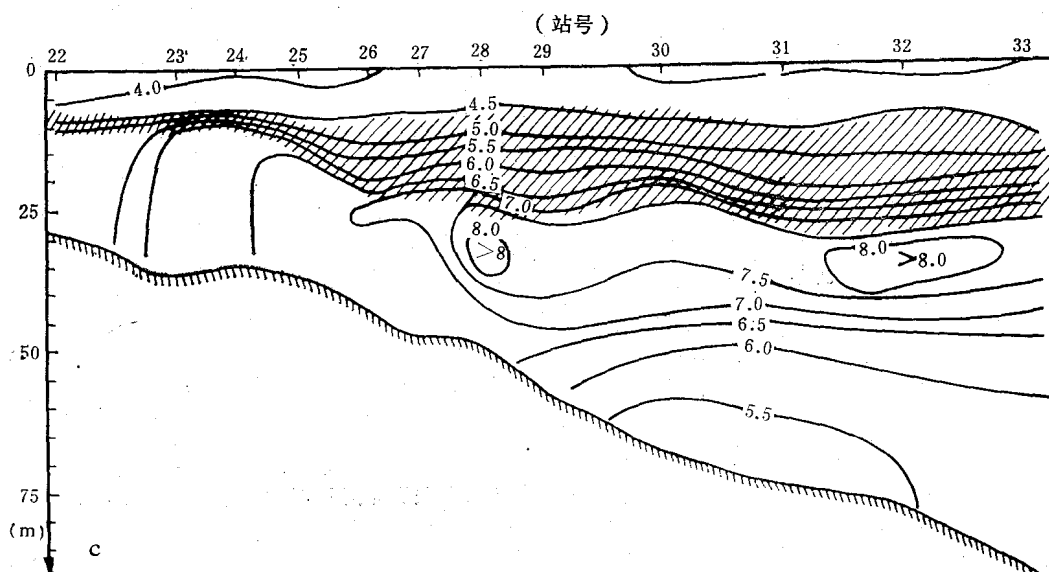
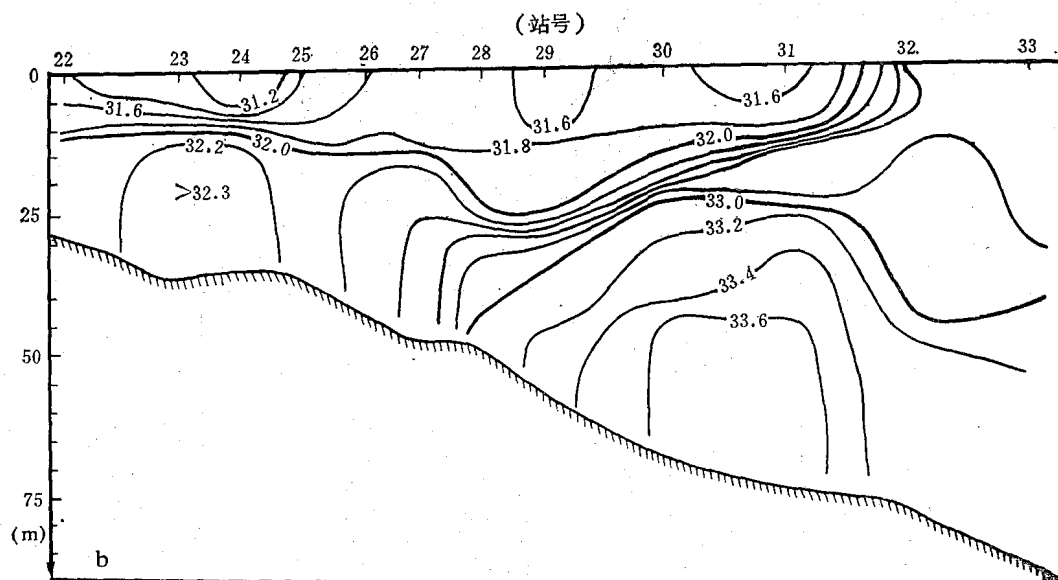
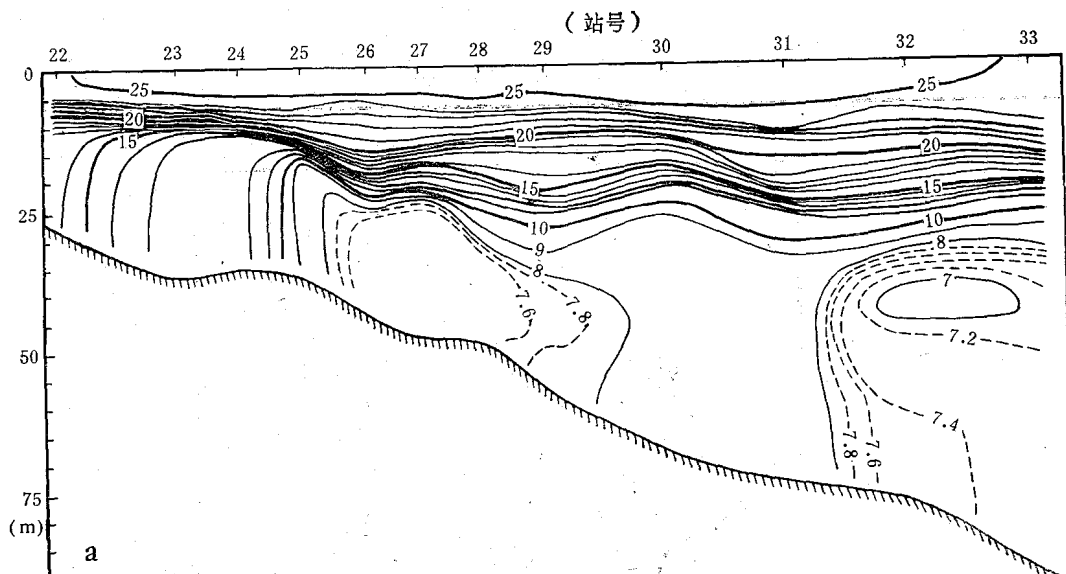


图2 35°N线温度、盐度和溶解氧的断面分布
a. 温度(°C); b. 盐度(‰); c. 溶解氧 (mL/L)

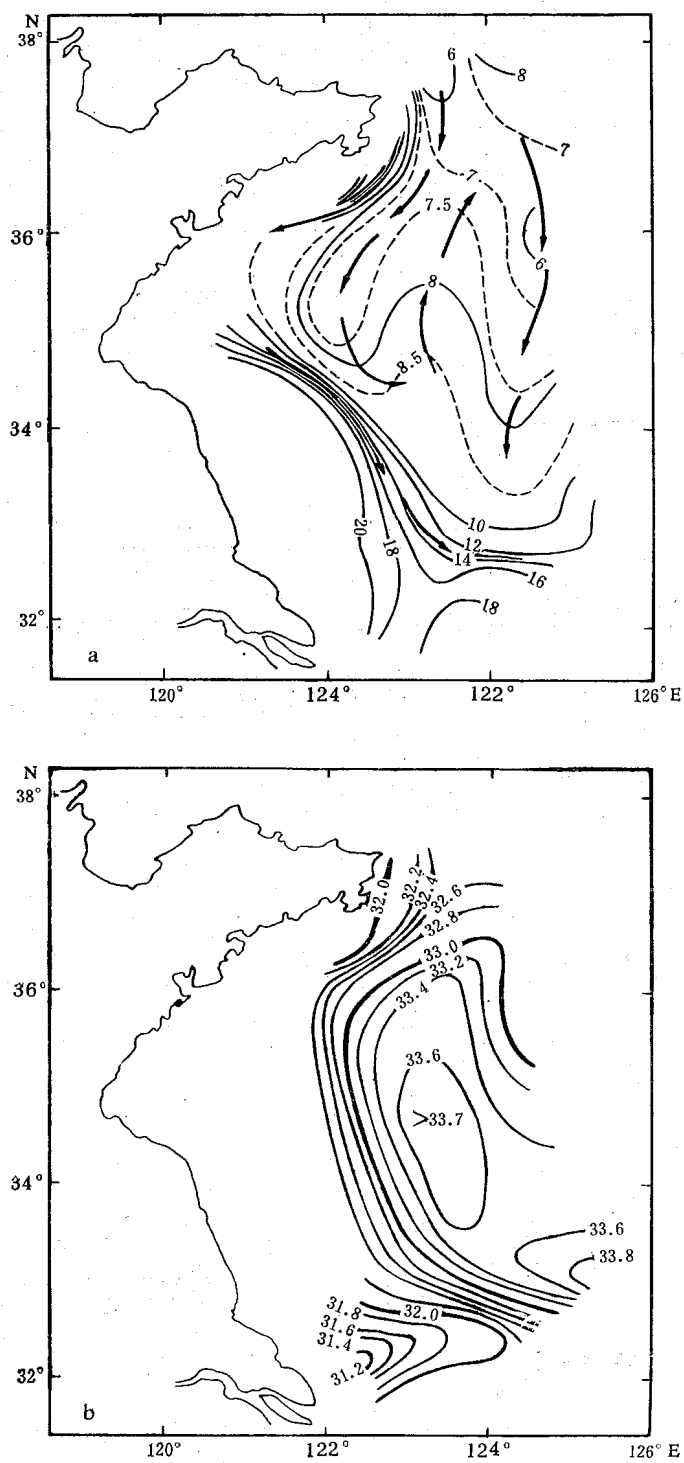
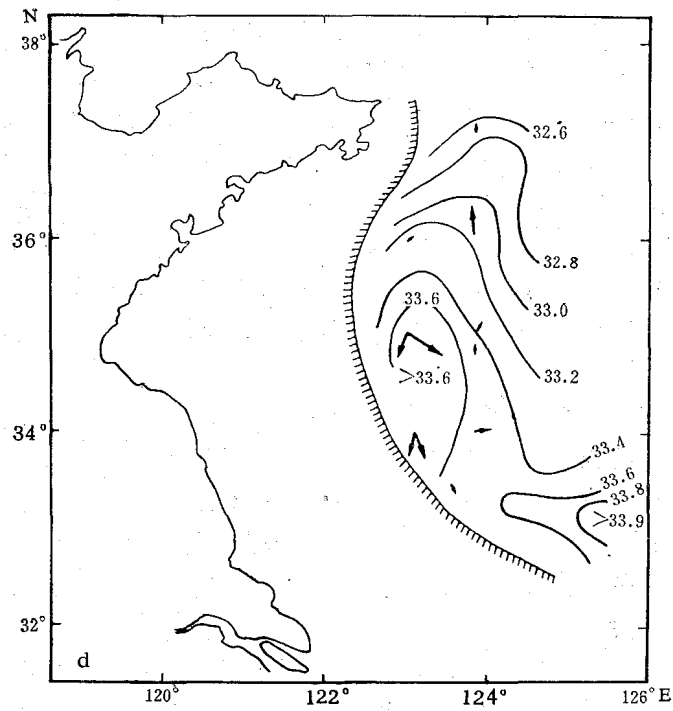
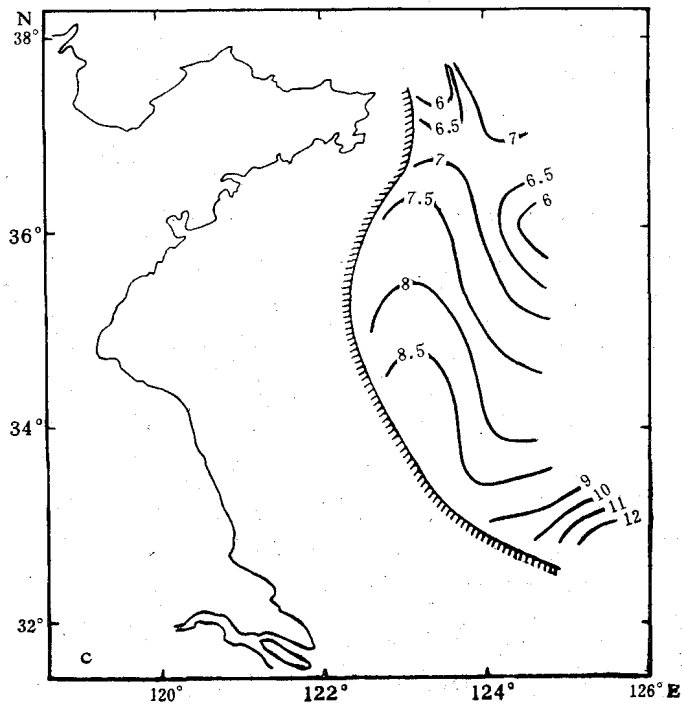


图3 底层和50m层温度(°C)和

a. 底层温度; b. 底层盐度;

图3a中的矢线表示深层冷水团可能存在的环流状态;



盐度(‰)的平面分布

c. 50m 层温度；d. 50m 层盐度

图 3d 中的矢量为 6—9 月历史上观测到的 50m 层的余流矢量

示,除了沿岸浅水区域以外,调查海区底层大部为水温小于 10°C 的冷水占据,山东半岛外海和苏北浅滩外海等温线密集,这是黄海冷水团的边缘,亦即其锋区。本文第一作者曾指出,夏季黄海冷水团锋面的位置是由潮混合控制的^[2]。图 3 中等温线密集的区域正是潮混合比较发达的区域。

总的说来,黄海冷水团是水文因子相对均匀的水体,因此为了分析冷水团内部的水文结构,图 3a 中用虚线加绘出 7° , 7.5° , 8.5°C 等温线。由图看出: 在冷水团内部, 34°N 线以北有一个大致沿 123°E 线向北伸展的暖水舌,其水温较两侧水温高 $1.5^{\circ}-2.0^{\circ}\text{C}$ 。该暖水舌两侧各有一个低温中心,它们的位置分别在 $35^{\circ}30'\text{N}$, 122°E 和 36°N , $124^{\circ}30'\text{E}$ 附近。因调查范围所限,图中没有勾划出东侧冷水分布的全貌。调查期间西侧冷中心的最低温度略大于 7°C , 东侧冷水区的最低温度在 6°C 以下。从等温线的分布趋势看,暖水舌两侧的冷水有向南扩张趋势。此外,离黄海暖流源地最近的 1 站水温较高(在 12°C 以上),在后面将指明,它同上述冷水团内部的高温水舌已无直接联系。

底层盐度分布(图 3b)与温度相比差别较大,盐度分布的主要特点是:(1)在整个苏北浅滩外侧,温度分布比较均匀。(2)图中存在一个明显的高盐水舌,它从东南角伸进调查海区。此高盐舌起初指向西北偏西方向,其后在 $33^{\circ}30'\text{N}$ 一线几乎转成正北方向,并沿 123°E 线向北推进,这一高盐水舌呈闭合形状。(3)高盐水舌占据的区域比底层冷水明显缩小,图 3b 的盐度锋面在图 3a 给出的冷水团内部。但是从图 3b 也可以明显地看到,在 34°N 以北,高盐水舌的走向同图 3a 底层冷水中的高温水舌的走向基本一致。

以下对 50m 层的温、盐度分布特征作进一步分析。由于主温跃层通常在 30m 层以浅(见图 2),因而 50m 层的温、盐度水平分布较好地揭示了黄海冷水团内部水文要素的水平分布和侧向混合状态。由温、盐度的水平分布(图 3c, d)可知,在 34°N 线以北,正好在底层高温高盐水系的上部,50m 水层处也有一个高温高盐水舌向正北伸展;该高温高盐水舌东侧,则有大片低温低盐水向南扩张。同底层一样,调查海区东南角的高温高盐水(1, 2 两站)同上述指向正北方向的高盐暖水舌之间有一低盐区存在;在该低盐区的南侧,温度的水平梯度显著增大,因此调查期间上述两高温高盐水之间已无明显的直接联系。

必须指出,南黄海冷水团内部,几乎每年夏季都存在着深层和底层高温高盐水舌向北伸展的扩张现象。例如,毛汉礼等^[1]给出的夏季黄、东海 50m 层和底层温盐分布,在南黄海同图 3 给出的结果基本一致。

3. 温、盐度的垂直结构与细致结构 前述高温高盐水在黄海深层冷水团中的扩张现象也表现在温、盐、密度的垂直分布图中。图 4a, b 分别给出 17, 29 两个有代表性的测站的温、盐、密度要素的垂直分布。图 4a 的特点是: 在季节性主温跃层以下,中层出现一个最低温度值,相应水层中的盐度也较低。在中层冷水区以下,温、盐度值都增加得较快,然后进入底均匀层。这样一来,在主跃层之下,底均匀层之上,出现了温、盐、密度等要素的第二次跃变现象。在图 3 中的高温高盐水舌区的大多数测站,都在主跃层下观测到这种第二次跃变现象。这一跃层(第二跃层)代表了上述深层高温高盐水舌的上界。

在图 3 所示高温高盐水舌两侧的某些测站上,观测到温、盐、密度要素垂直分布的另一类型,如图 4b 所示。这里温、盐度垂直分布曲线出现多个极值,并且当温度增大时盐度相应地增大,当温度减小时盐度也随之减小。这种现象很象大洋中两个水团边界处经常

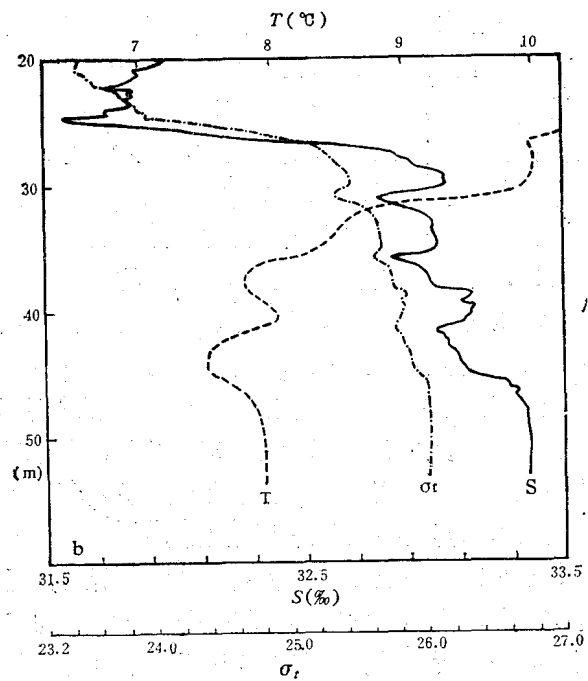
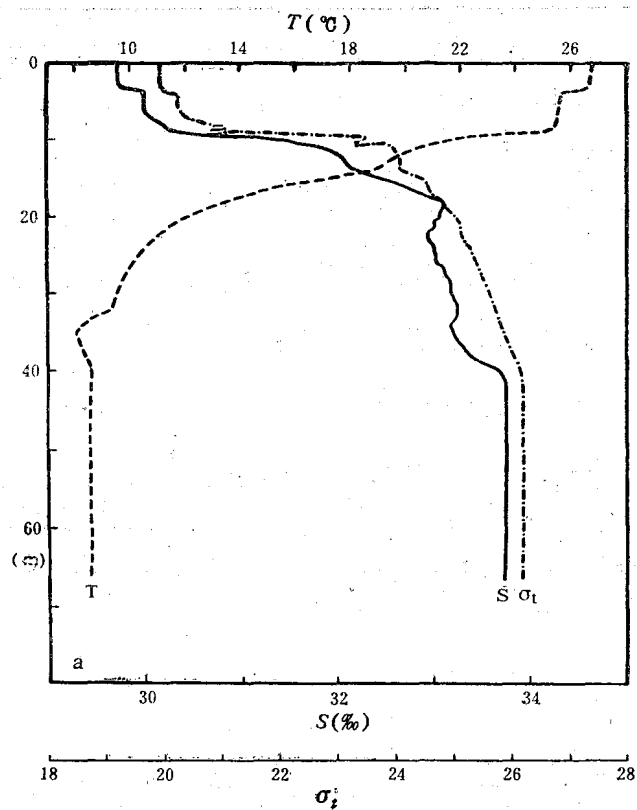


图 4 温、盐、密度要素的垂直分布
a. 17 站; b. 29 站

观测到的不同水团之间的相互侵入现象。不过这里相互侵入的垂直尺度比较小,一般只有 3—5 m。根据 Ruddick 和 Turner^[7] 的研究,当相互侵入是由双扩散引起时,侵入的垂直尺度 L 可以用下式表示:

$$L = \beta \Delta S / \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right)$$

式中: ΔS 为沿等密度线的相邻两水团的盐度差;在计算中我们近似地用出现侵入时的盐度平均变幅来代替。密度随盐度的变化率为: $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial S}$ 。以 29 站为例,根据实测资料,平均取 $\Delta S = 0.177$, $\beta = 0.78 \times 10^{-3}$, $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} = 2.8 \times 10^{-5}$;由此得出两水团相互侵入时的垂直尺度 L 约为 3.2 m,实测为 3.4 m,两者十分接近。因此我们可以较有信心地推断:在黄海深层,温、盐度不同的两种水体的侵入现象,可能主要是由双扩散现象引起的。双扩散现象的出现,进一步说明:黄海冷水团内部确实存在着两种不同性质的水团,并且在水团边界处还存在着剧烈的混合现象。

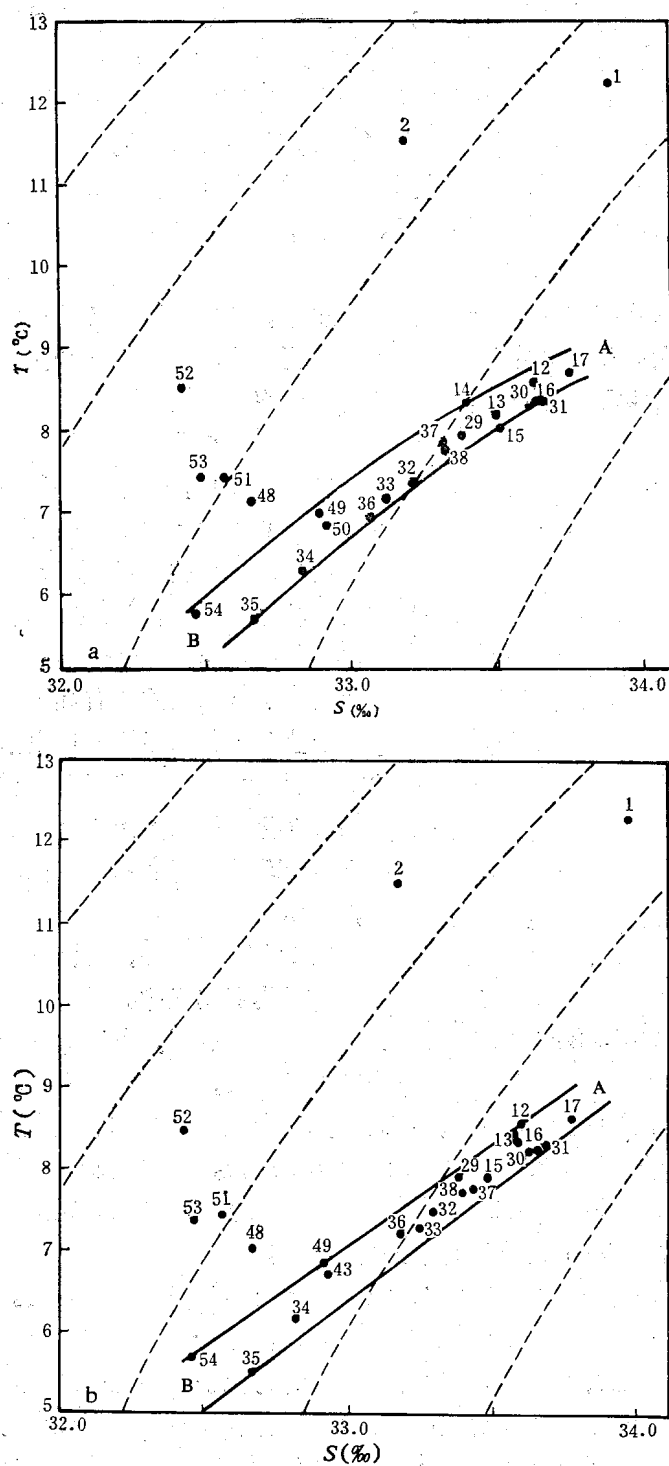
二、讨 论

根据上述温盐特征,我们再深入地讨论如下几个问题。

1. 冷水团内部的两个次级水团 前已阐明,在南黄海的深层冷水中,存在着相对高温、高盐和低温、低盐的两种不同水团的相互混合和扩张现象。为了进一步揭示这一现象,图 5 给出 50 m 层 (5 a) 和水深大于 50 m 的底层 (5 b) $T-S$ 点聚图。图中 $T-S$ 点旁的数字表示站号。由图可见,除少数测站外,绝大多数 $T-S$ 点都落在 A—B 的窄带内。点聚带非常窄长,它较好地反映了图 2 中的高温高盐水舌同两侧低温低盐水的混合过程。由图中表出的站号可知:高温高盐水以 17 站为中心向外扩散, $T-S$ 点从 A 到 B 的排列次序,在温、盐度的平面分布图中,大体是由高温高盐水舌的舌根到舌尖,由舌轴向两侧按顺序排列。根据图 5 给出的 $T-S$ 点聚图可知,具有相对高温、高盐性质的次级水团的原始温、盐度值为 8.6°C 和 33.76‰ ,而具有低温、低盐性质的次级水团的原始温、盐度值为 5.6°C 和 32.5‰ 。由于黄海冷水团和黄海暖流的温盐特性有明显的年际变化,上述两次级水团的原始水型的温、盐度值各年也将是不完全相同的。

还须指出,在图 5 中作为整个调查海区高温高盐水源地的 1 站的 $T-S$ 点远离 A—B 点聚带,其盐度值略高于 17 站,水温却比 17 站高 3°C 以上。这说明,1 站的高温高盐水,同黄海冷水团内部的高温高盐水在调查期间已无直接的联系;从而可知:夏季冷水团外部的黄海暖流高温高盐水已不再直接进入冷水团内部。

2. 冷水团内高温高盐水的来源及其传布现象 如上所述,夏季南黄海冷水团分裂为东、西两个冷中心,并且在两冷中心之间存在着一个向北扩展的高温高盐水舌。根据类似的现象,近年来国内有些学者认为,在 123°E 线附近南黄海存在着一支横贯南北的流动^[6],也就是说,即使在黄海冷水团发育最盛的夏季,黄海暖流仍可以插入黄海冷水团内部。从前一节的分析结果来看,夏季黄海暖流直接进入黄海冷水团内部的可能性极小。这

图5 50 m 层(a)和底层(b)的 T - S 点聚图

是因为：第一，这一高温高盐水舌在 33°N 一线已被盐度较低的水块分成两段；第二，暖水舌中心区域(17站)的密度大于1站的密度，很难想象，作为源地的1站密度较低的海

水会直接插到密度较高的冷水团内部；第三，在 $T-S$ 点聚图上，1 站的高温高盐水孤立地存在着，同 $T-S$ 点聚带上的点子相比，它已明显变性，且两者之间无混合现象发生。

有人推测^[4]，夏季南黄海深层的高温高盐水舌是冬季黄海暖流的遗迹。由于东海北部和黄海南部春季的环流状态与冬季比较接近，因此我们认为，更确切的提法应是：南黄海夏季深层冷水团中的高温高盐水舌，是冬、春季进入南黄海的黄海暖流的遗迹被切断联系后在冷水团内部继续向北推进的表现。为此，我们进而利用部分历史资料来阐明这一观点。

黄海暖流是从外海流入黄海的高温高盐水系，它与对马暖流同源。因此我们可以把各断面的盐度最大值和相应的温度值作为暖流到达这一断面的一个指标。为了排除降水和径流以及其他气象因子的影响，我们取各断面底层的盐度极大值作为讨论黄海暖流在南黄海扩张和变化的指标因子。图 6 指出了 1975—1981 年间 34° 、 35° 、 36° 和 $36^\circ 43'N$ 四个断面

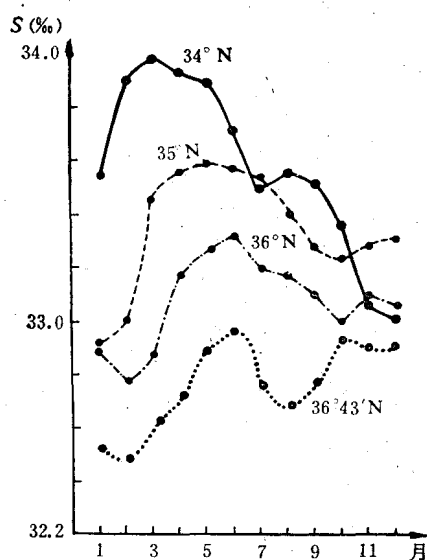


图 6 多年平均的南黄海各断面底层盐度极大值年变化曲线

多年平均的底层盐度极大值(以下简称“断面盐度极大值”)的年变化曲线。在所用的资料系列中，有的月份没有观测值，统计中多数月份有 6—7 次记录，个别月份只有 4 次记录。由图 6 可知，各断面盐度极大值年变化曲线有如下特点：(1) 断面盐度极大值和极大值平均变幅由南向北依次递减；(2) 各断面盐度极大值季节变化趋势基本一致，但季节变化的位相由南向北依次滞后，极值盐度最高值出现的时间自南向北依次为 3 月，5 月，6 月，6 月。

除 $34^\circ N$ 断面外，与极值盐度对应的温度值也有类似的变化规律。

上述事实表明，在南黄海存在着周期为一年的某种盐度波，自南向北传布。根据各断面极值盐度最高值出现的地理位置和时间，可以估算出上述盐度波的传布速度：在 $34^\circ N$ 至 $35^\circ N$ 之间为 3 cm/s ，在 $35^\circ N$ 至 $36^\circ N$ 之间为 4 cm/s 。上述量值大体同南黄海同一区域的深层和底层实测流速(见图 3c)十分接近。相应地盐度谷(出现在冬季)的传布速度要更快一些。这似乎同冬季黄海暖流强的概念一致。

上述盐度极值的传布现象主要与黄海暖流的流动和强弱变动有关。此外，还可能同垂直对流、湍流扩散以及黄海暖流源地的盐度季节变化有关。根据上述盐度波的传布现象，对夏季南黄海深层冷水团内部的高温高盐水舌，似乎可以这样来理解：在黄海冷水团形成以前，黄海暖流畅通于本文讨论的海区；但当黄海冷水团形成之后，冷水团外部的黄海暖流水开始增温，并且已不再进入冷水团内部。而与黄海暖流同源但已被切断联系、已经进入黄海冷水团内部并具有高温、高盐性质的黄海暖流水，却像孤立波那样继续向前推进，并通过水平湍流扩散过程，同黄海暖流两侧的黄海低温低盐水相混合，从而构成了如图 5 所示的 $T-S$ 点聚图和图 6 所示的盐度锋的传布图象。

夏季黄海冷水团内部高温高盐水的向北扩张现象也可以从历史测流资料中得到证实。图 3c 中给出了夏季 (6—8 月) 50 m 层的历史实测余流矢量。由图可知, 在 35°N 以北, 50 m 层的实测余流同图中的高盐水舌非常吻合。

3. 夏季南黄海冷水团内部的弱环流 综上所述, 夏季南黄海西部的深层环流图似乎可以用图 3a 中的矢线表示。在这里, 沿黄海冷水团锋面有黄海沿岸流, 即冷水团环流南下。而在冷水团内部, 123°E 附近有高温高盐水舌向北扩张; 但是由于该水舌已经同黄海暖流的源地切断联系, 因而水体只有从两侧低盐冷水的南下来补偿。我们初步认为: 在南黄海深层与底层 (冷水团内部), 可能存在着如图 3a 中矢线所示的方向相反的一对弱环流。

三、结 语

夏季, 黄海暖流不再进入南黄海冷水团内部; 但是南黄海深层冷水团内部仍然存在着高温、高盐的黄海暖流水的向北扩张现象, 它是在冷水团形成之前已经进入黄海冷水团内部的暖流水向北继续传送的表现。

南黄海深层冷水团可进一步划分为“冬、春季进入冷水团内部的黄海暖流水”和“黄海本地冷水”两个次级水团。这两个水团之间有着明显的锋面, 在锋面处并观测到由双扩散形成的侵入现象。

从历史资料看出, 南黄海深层及底层存在着由南向北传布的盐度波, 根据各纬度处盐度波峰值出现的位相差, 估算其传布速度为 $3\text{—}4\text{ cm/s}$, 这同该区域深层和底层的实测余流相当。冷水团内部, 暖水向北扩张, 两侧冷水则向南伸展。我们初步认为, 南黄海深层与底层冷水团内部, 可能还存在着如图 3a 所示的两个方向相反的弱环流。

参 考 文 献

- [1] 毛汉礼、任允武、孙国栋, 1964。南黄海和东海北部 ($28^{\circ}\text{—}37^{\circ}\text{N}$) 夏季的水文特征以及海水类型 (水系) 的初步分析。海洋科学集刊 01: 23—77。
- [2] 赵保仁, 1985。黄海冷水团锋面与潮混合。海洋与湖沼 16(6): 451—460。
- [3] 袁业立, 1977。黄海冷水团环流 I。冷水团中心部分的热结构和环流特征。海洋与湖沼 10(3): 187—199。
- [4] 管秉贤, 1963。黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析。海洋与湖沼 5(4): 255—284。
- [5] 赫崇本、汪园祥、雷宗友、徐斯, 1959。黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨。海洋与湖沼 2(1): 11—15。
- [6] Guo Binghuo, 1981. The temperature and Salinity Structure and circulation in the Yellow Sea. *Proceedings of the Japan-China Ocean Study Symposium on Physical Oceanography and Marine Engineering in the East China Sea*, Tokai University, pp. 174—197.
- [7] Ruddick, B. R. and J. S. Turner, 1979. The vertical length scale of double-diffusive intrusions. *Deep-Sea Res.* 26 (8A): 903—913.

THE INTERNAL HYDROGRAPHIC STRUCTURE OF THE HUANGHAI COLD WATER MASS (HCWM) IN SUMMER*

Zhao Baoren, Xiong Qingcheng and Zhang Fagao

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

The deep and bottom water within the Huanghai Cold Water Mass (HCWM) in summer time was, for a long time, considered as a homogeneous body of water. Various investigations carried out in recent years have pointed out that this may not be true.

After a detailed analysis of the most recently obtained refined CTD data and historical hydrographic data at our disposal, some significant results have been obtained.

1. The Huanghai Warm Current (HWC) didn't enter into HCWM in summer time. However, there exist two types of second-class watermasses within HCWM in summer: (1) a localformed water mass with low temperature and low salinity, which was formed in the preceding winter by vertical mixing process locally; and (2) a watermass with relatively high temperature and high salinity, which is the remanent body of HWC entered into HCWM in preceding seasons, but is completely cut off from its source in summer. The spreading of these two water masses, the existence of a frontal zone at the boundary of the two watermasses and the cross-isopycnal mixing process have been identified.

2. The most recent CTD data showed that at most stations within HCWM, there existed a central cold and less saline water under the main thermocline. In both temperatures and salinity profiles, a temperature/ salinity inversion and a secondary thermocline/ halocline were clearly seen. The appearance of the central cold and less saline water suggests the existence of intrusion of one watermass into another. The vertical dimension of the intrusion agrees satisfactorily with the calculated values according to Ruddick and Turner's formula based upon double-diffusion hypothesis. These facts further prove the existence of different secondclass water masses (at least two) and also suggest the existence of double-diffusion process in HCWM.

3. From the time difference of the occurrence of salinity maximum/minimum at different latitudes, a "salinity wave" with a velocity 3-4 cm/s (and a period about a year) was inferred, this agrees very well with the measured currents in this area.

* Contribution No. 1330 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.