

秋季南黄海水文特征及海水的混合与交换^{*}

邹娥梅 郭炳火 汤毓祥 李载学

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266033)

(韩国海洋研究所, 汉城)

熊学军 曾宪模

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

摘要 根据 1996 年 10 月中韩合作调查获得的 CTD 资料, 分析探讨了南黄海秋季跃层的分布特征及垂直混合状况, 同时对黄海冷水团的垂向混合进行了初步探讨. 还利用改进后的逐步聚类分析法划分了表、底层水团, 确定了各水团的温度、盐度、溶解氧和 pH 值 4 要素的平均特征值, 并根据各水团的特性和温度、盐度的平面分布特征, 重点探讨了黄海水与沿岸水及东海水的混合和交换.

关键词 南黄海水 混合和交换 聚类分析 判别分析

1 引言

对于黄海水文, 过去偏重于冬、夏季的调查和研究, 而对秋季这样的过渡季节, 人们较少给予关注. 1986 年中国科学院海洋研究所和美国伍兹霍尔海洋研究所对南黄海联合调查工作, 亦偏重于对冬、夏两季水文特征的研究^[1]. 1996 年国家海洋局第一海洋研究所和韩国海洋研究所对南黄海进行了春、夏、秋、冬四季的合作调查, 试图从较为完整的时空尺度来探讨黄海水动力循环问题. 秋季黄海水文特征状况正在向冬季的垂直均匀分布特征转化, 随着秋季对流混合的加强, 温、盐跃层的深度逐月下沉, 下层冷水顶界也逐月下沉, 同时冷水区范围也开始逐月缩小, 黄海与东海水和沿岸水的交换也发生了变化, 在沿岸冲淡水衰弱的同时, 东海外海高盐水向北扩展. 本文将利用中韩黄海水循环动力学 1996 年 10 月秋季合作调查所获得的 SBE 25 CTD 资料(站位标记在图 1), 对南黄海秋季海水的混合和交换进行分析探讨, 其目的除了对南黄海秋季水文特征有进一步的认识外, 更主要的是试图探讨南黄海水文状况如何从夏季型向冬季型转变.

本文于 1998-01-20 收到, 修改稿于 1998-06-10 收到.

^{*} 国家海洋局和国家自然科学基金联合资助项目(编号:49676283).

第一作者简介: 邹娥梅, 女, 55 岁, 副研究员, 现主要从事黄海水文特征及其季节变异的研究.

2 南黄海温、盐和密度垂直混合状况

2.1 温、盐和密度的垂直分布特征

中韩合作调查的6条固定断面中,除最南的断面F外,其余断面温、盐和密度垂向分布特征基本相似,为此文中仅给出断面B(36°N)和断面F温、盐、密剖面分布(图1)。断面B的分布图表明南黄海秋季的跃层甚强,它与黄海海盆的地形相类似,但反向地覆盖在海盆之上。黄海海盆东西两侧的浅水区(40 m以浅)已是垂直均匀的状态。跃层以深为低温($t < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)、相对高盐(32.5~33.8)和高密(25~26 kg/m^3)的黄海冷水团,它所占据的面积由北向南逐渐减小,

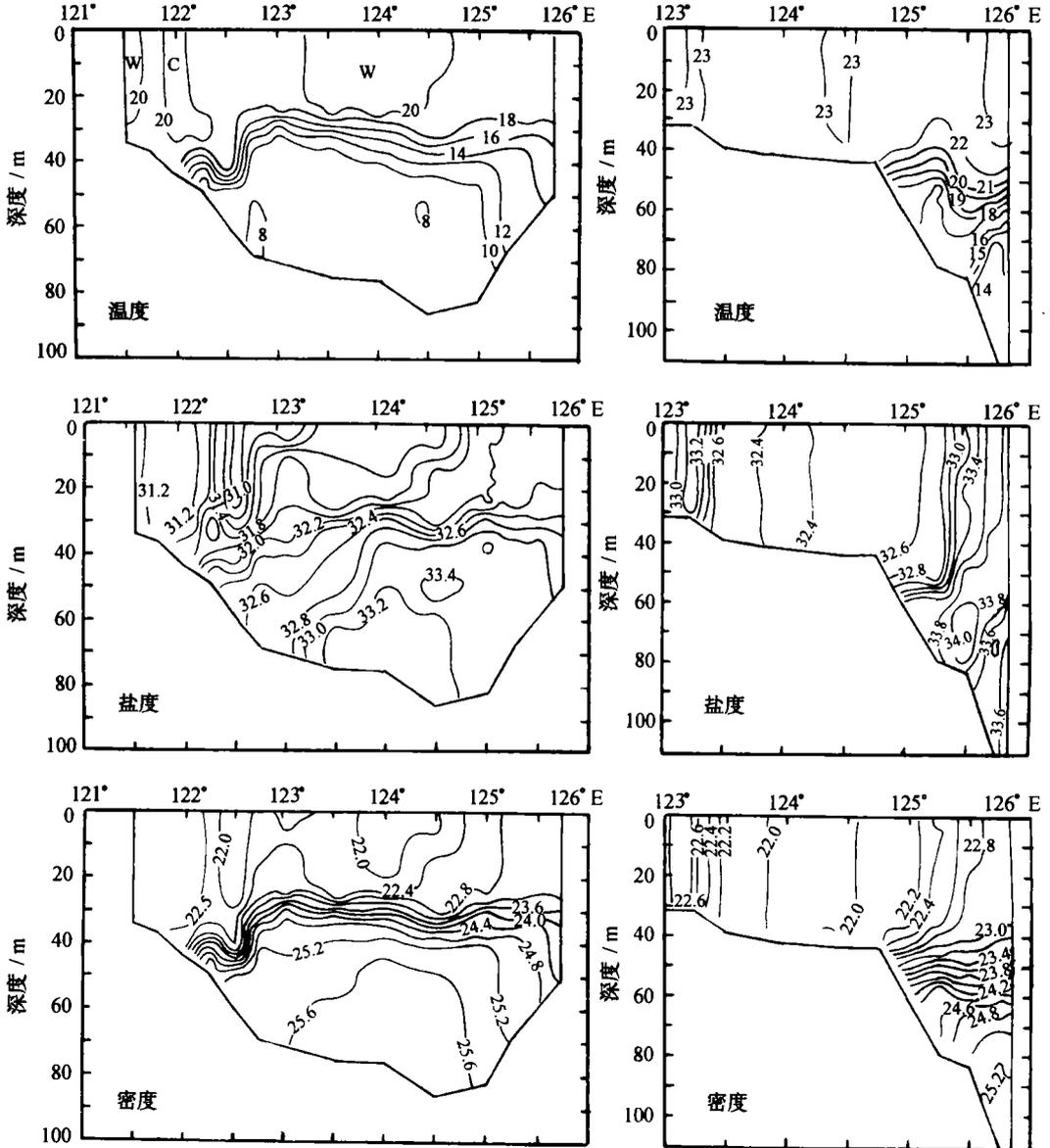


图1 断面B(36°N,左图)和断面F(右图)的温度($^{\circ}\text{C}$)、盐度和密度(kg/m^3)分布

深度逐渐加深,而且冷水团的盐度和密度值由北向南递增.跃层之上为相对均匀的黄海上层混合水,但西半部的盐度和温度略低于东半部.另外值得注意的是,在 36°N 断面上的 $122^{\circ}30'\text{E}$ 附近出现一个盐度小于 31.0 的低盐带,比较图 4a 可以知,这是鲁北沿岸水入侵南黄海所致.

在断面 E 的西端为上下充分混合的相对高温、低盐(29.5~29.9)和低密($20\sim 20.5\text{ kg/m}^3$)的苏北沿岸水,而底层黄海冷水团仅占据着 $124^{\circ}\sim 124^{\circ}45'\text{E}$ 以深的较小海域(图略).而最南的断面 F 的温、盐和密度的垂直混合显示绝然不同的类型, $124^{\circ}30'\text{E}$ 以西的浅水区,已形成由表至底的温、盐、密几乎垂直均匀的水团,翁学传等^[2]认为它是由台湾暖流、东海和黄海水相混合的相对高温、中盐和中密的混合水;断面的东侧,济州岛西部外海(F9 和 F10)显示上层的平均温度为 23.3°C ,平均盐度为 33.8 和平均密度为 23.0 kg/m^3 的相对高温、高盐和高密的水,它们被认为是入侵至济州岛西南海域的对马暖流的前缘混合水.

2.2 南黄海的跃层分布特征

研究海区各测站的温、盐和密度跃层所在的位置基本一致.入秋以后由于对流混合的加强,南黄海的西部山东近海、苏北浅滩和长江口附近的沿岸浅水区约 18 个测站逐渐趋于上下均匀一致,即图 2 中以“0”实线所示的以西水域.同时由于对流垂直混合的加强,使上均匀层逐渐增厚,温跃层深度增大.从 1996 年 10 月航次调查结果来看,温跃层上界深度大都大于 20 m,而 10~20 m 之间的测站也仅 12 个,主要位于朝鲜半岛南部外海和长江口东北方;而大于 30 m 的测站则主要位于青岛外海($35^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $121^{\circ}45'\sim 122^{\circ}15'\text{E}$)及济州岛西南部.调查海区约 1/2 测站的温跃层上界平均深度为 26 m.由于鲁北沿岸水绕过成山角南下覆盖于上表层海

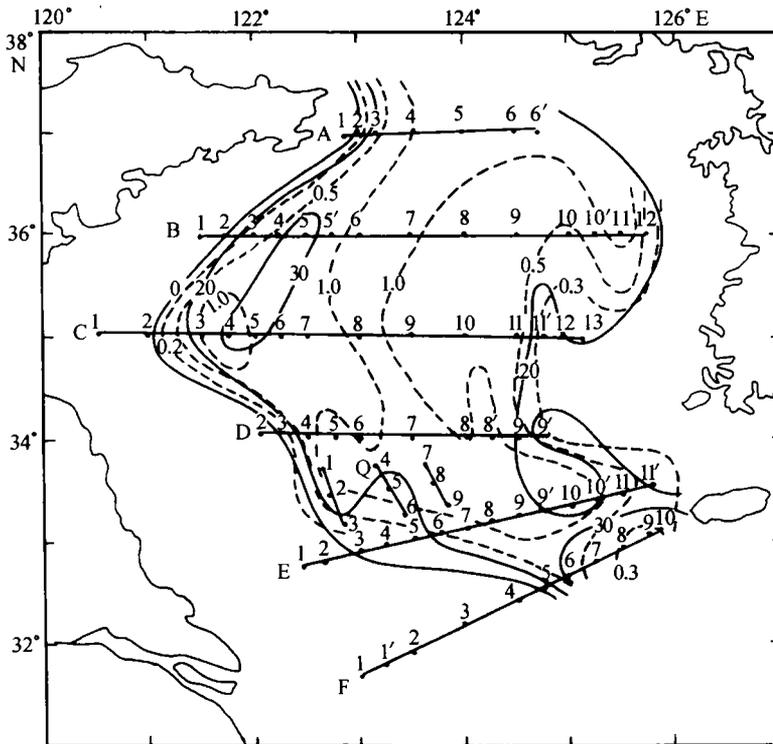


图 2 南黄海秋季温跃层上界深度(m, 实线)和温跃层强度($^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 虚线)的平面分布及站位

域, 36°N 断面(122°15′~122°45′E)出现逆温现象(见图1)。研究海域的温跃层强度均大于0.3℃/m, 尤其值得指出的是黄海冷水团区域温跃层强度均较强, 有24个测站温跃层强度大于或等于1.0℃/m(如图2所示)。

2.3 黄海冷水团区的垂向混合

图3仿照乐肯堂1992年^[3]采用的方法绘出36°N断面(a)和35°N断面(b)上各等密度面上相对盐度的变化曲线, 由图3a可见, 相对盐度(虚线)为零的等值线在36°N断面上分别位于122°45′~123°00′E间的33~54m间及123°30′~124°30′E的49~60m间, 此区域即是黄海冷水团的中心区。

图1和图3比较可见, 在跃层以上的水层中(20m以浅)垂向混合较强烈, 显示了秋季风混合和对流混合的联合作用使上层处于十分均匀的状态, 而且使上均匀层明显加深。在中层情况似乎颇为复杂。位于122°30′~122°45′E之间等相对盐度线与等密度线几乎正交, 显示了那里存在强烈的垂直混合, 然而这似乎是锋面区较强的海水垂直运动所致。122°45′~123°00′E之间及124°E以东的中层垂向混合明显较弱。在下层区即冷水团占据的水层中, 东西两部分完全不同, 在东部30m以深的水层中等相对盐度线与等密度线的分布趋势相一致, 尤其0等相对盐度线与25.8~25.7等密线相平行, 表明那里垂向混合十分微弱, 也就是说在黄海槽潮流小, 潮流混合弱。在西部的冷水团区(122°45′~123°30′E)35m以深的两线几乎正交, 显示那里垂直混合甚强是潮混合所致。35°N断面(图3b)0等相对盐度线位于122°15′~122°30′E的27~49m间的水域。也显示出类似的情况。可见黄海冷水团中心区内垂向混合状态并非一致, 西部海区的上下层均处于强垂直混合状态, 它将比较快地向冬季垂直均匀型转变。

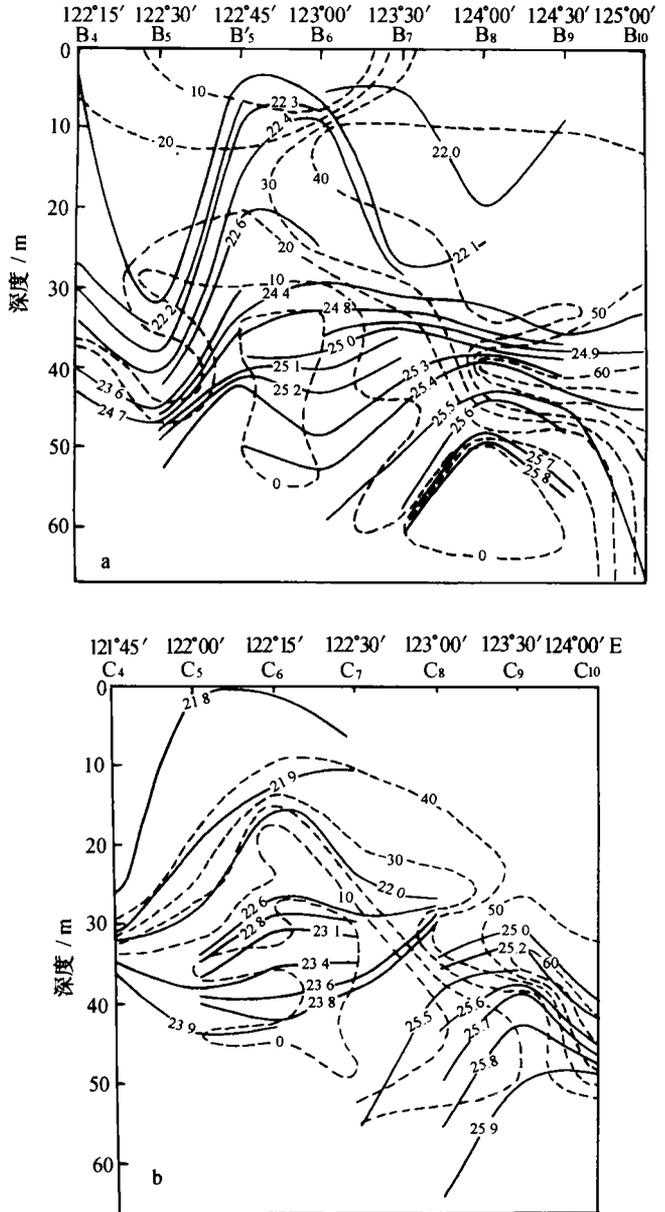


图3 各等密度面(实线)上相对盐度(虚线)在36°N(a)和35°N(b)断面的分布

3 黄海水与沿岸水的混合与交换

初秋南黄海表层温度的范围介于 $18\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 4a), 温度分布由成山角外海低于 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及朝鲜沿岸低于 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 向南逐渐升高. 图 4a 显示鲁北沿岸水绕过山东半岛顶端入侵南黄海, 同时朝鲜沿岸水也已向南移动. 低盐的沿岸水从南黄海两侧南移. 它反衬出一个从南黄海西南部向东北部伸展的暖水舌, 这一水舌前锋可达 36°N 附近, 水舌内部形成多个孤立的水块, 如 22 、 $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 包络的水块. 10 m 层盐度分布状况与温度的分布不完全相似, 盐度由调查区的东北部向西南递减至长江口至济州岛连线的盐度锋, 呈现了南黄海中间区处于低盐状态. 其中 31.0 等盐线包络的水体从苏北浅滩向东北伸展, 在这一水体中苏北浅滩上还存在一个盐度小于 30.0 的水体即苏北沿岸水. 31.0 等盐线包络的这块水体在夏末(9 月)势力较强, 因此其中心位置偏东(韩国海洋研究所 9 月航次结果), 而中韩合作调查的 10 月航次却发现其中心位置已随着沿岸水势力的减弱而向西退. 而中韩合作调查 1997 年 11 月中旬航次等温线的舌状分布已消失, 而盐度舌状分布还留有一点迹象(见图 7). 这一重要现象揭示了黄海水与沿岸水随季节交换的变化过程, 即夏季长江冲淡水 and 苏北沿岸水对南黄海南部有着重大的影响, 入秋后长江冲淡水主流逐渐转向南, 长江口至济州岛连线的锋面形成. 苏北沿岸水向西退缩, 因此上述 31.0 等盐线包络的水体可认为是残留于南黄海的长江冲淡水和苏北沿岸水与黄海水混合后的水体. 随后它逐渐衰退并于深秋后消失.

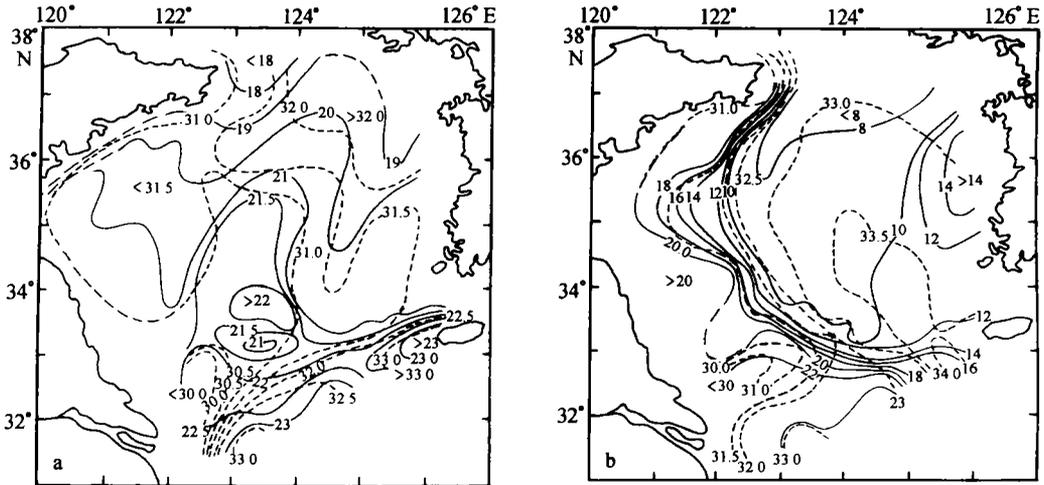


图 4 10 m 层温度($^{\circ}\text{C}$)(实线)和盐度(虚线)(a), 底层温度($^{\circ}\text{C}$)(实线)和盐度(虚线)(b)的平面分布(1996 年 10 月)

为定量分析秋季黄海水体混合状态, 本文还用苏育嵩改进后的逐步聚类分析法^[4]对南黄海各层的温、盐度进行计算, 通过对不同 A 和 G 的试验, 并根据 $t-S$ 点聚图的分布, 我们认为选取 $A=6.0$, $G=0.10$ 较为合适. 所得的结果再根据温、盐度的分布特征, 对表层黄海混合水的边界和底层黄海冷水团的边界作适当的调整后, 用 Bayes 多组判别法^[5]对表、底层温、盐度、溶解氧和 pH 值 4 要素进行的判别分析检验所划分的水团, 回代判别成效高达 96%, 划分结果列于表 1 并表示于图 5. 结果表明, 秋季调查区存在 6 个代表性水团, 其中南黄海上层

混合水是上层的主要水团,它占据着研究海域的90%以上. 尽管入秋以后,鲁北沿岸水开始入侵南黄海,朝鲜沿岸水也向南移动,但它们的势力甚弱,只是对调查区的黄海上层混合水产生影响,并没有改变黄海上层混合水的基本特性(图5). 另外,从 $t-S$ 点聚图还可以看到南黄海区东西两半部的上层混合水存在明显的差别,东半部的盐度比西半部高. 还有存在于 $32^{\circ}30' \sim 35^{\circ}N$ 、 $123^{\circ} \sim 124^{\circ}30'E$ 之间的30 m以浅的水层中为残留的苏北沿岸水、长江冲淡水与黄海水混合后的水体(Yfs),大致相当于图4b中31.0等盐线包络的范围,它将在秋末消失. 苏北沿岸水(SW)占据苏北浅滩的一部分(见图4). 黄海冷水团(Yc),它位于南黄海底层中央黄海槽区,其温度小于 $10^{\circ}C$,盐度介于32.5~33.8之间,这是底层温、盐分布的主要特征^[6],此水团是冬季黄海混合水留下的水体,当春季表层增温后,形成了温跃层,随着夏季表层的剧烈增温,跃层不断增强,由于跃层的屏障作用,下层仍保持着冬季黄海混合水低温、中盐的特征. 入秋后,其范围相应地缩小,但在暖半季它在黄海底层占据着主导地位,制约着黄海底层的水文特征,明显的低温是它最主要的特性. 在黄海冷水团的西侧,沿山东沿岸($t > 18^{\circ}C$, $S <$

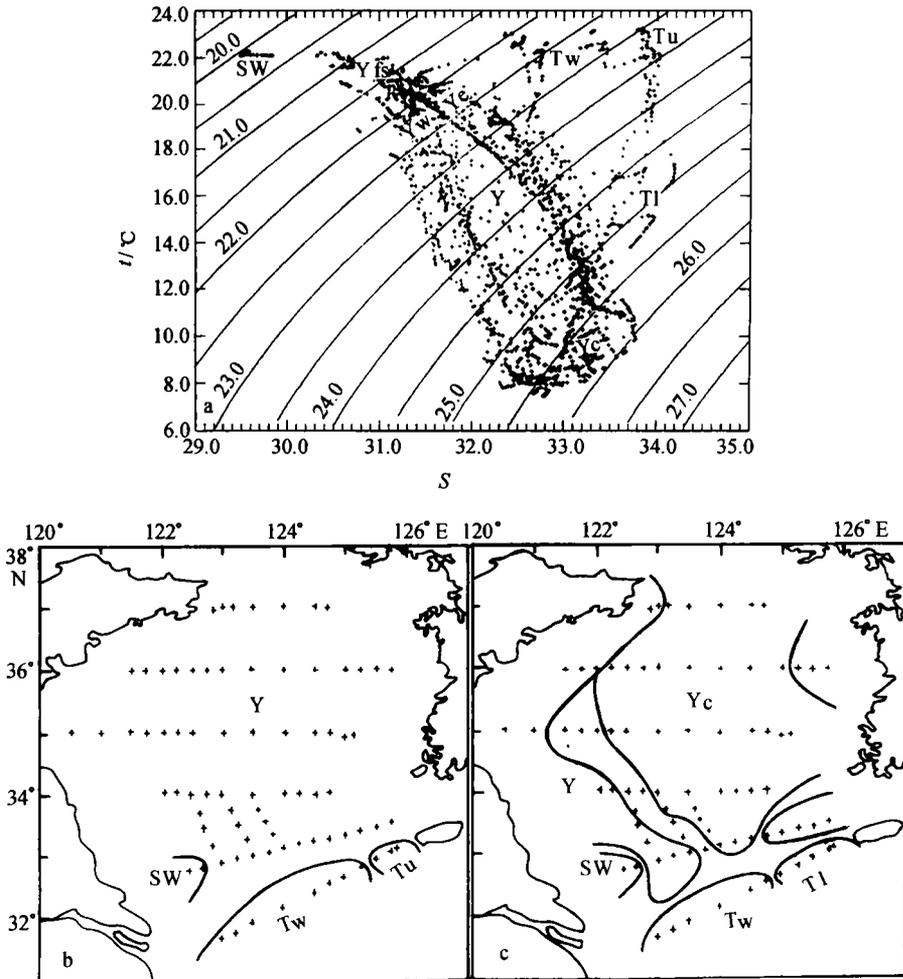


图5 $t-S$ 图解(a)及表层(b)和底层(c)水团的分布(1996年10月)

31.0)、苏北浅滩沿岸($t > 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S = 29.6$)形成很强的温、盐锋面(见图 4b);东部较弱. 由图 4b 显示南黄海冷水团的西部边界基本与 32.5 等盐线走向相吻合^[6]. 西部沿岸的低密区位于苏北浅滩的低密水舌($\sigma_t = 20.0\text{ kg/m}^3$)海域,而中央黄海槽的黄海冷水团占领海域则为密度高于 25.5 kg/m^3 的相对高密区. 当黄海冷水团形成后,在黄海冷水团和黄海混合水之间即形成温、盐和密度的强锋区. 此混合带往往成为良好的渔场,而且实践证明,暖半年渔场往往偏向于黄海冷水团的一侧.

表 1 各水团的平均温、盐度、溶解氧和 pH 特征值

水 团	温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐 度	溶解氧/ $\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$	pH
黄海上层混合水(Y)	20.4	31.2	460	8.3
苏北沿岸水(SW)	22.2	29.6	412	8.2
对马暖流前缘上层混合水(Tu)	23.2	33.8	404	8.1
台湾暖流前缘混合水(Tw)	22.8	32.7	399	8.2
黄海冷水团(Yc)	9.0	33.1	428	8.1
对马暖流前缘下层混合水(Tl)	15.1	33.8	264	8.1

4 黄海水与东海水的混合与交换

如图 4a 所示,在长江口至济州岛断面上呈现一条强的锋面(这里称为长江口北-济州岛锋). 在锋面南侧为相对高温($t > 22.5$)和高盐($S > 32.2$)水体,其中济州岛西侧水域出现盐度大于 33.6 的水块,如同郭炳火等^[7]指出,它应是部分对马暖流水向西北伸展至该区域的水体,同时在长江口北岸外海还存在一处高盐水($S > 32.6$),它如同苏育嵩^[8]指出的在夏季台湾暖流北上的前缘混合水有从底层横穿长江冲淡水抵达长江口北岸附近海域的迹象. 显然这两支东海暖流水的水体均被阻挡在长江口北-济州岛锋面以南.

在底层(见图 4b)显示了在长江口至济州岛一线的海域,其西半部为盐度锋,东半部为温度锋(50 m 层状态类似,文中未给出图),密度锋与盐度锋一致,存在于长江口北至济州岛一线海域的东半部. 尽管底层的盐度分布呈现高盐水舌从济州岛西侧海域向西北伸展至黄海中部,但并不意味有一支有高盐水流入黄海中部,因为强温度锋和密度锋的存在,否定了这种可能性. 另外,重力势图(见图 6)表明那里的流一致朝向济州岛,并无进入黄海的分量,韩国投放的卫星跟踪浮标的路径也同样表明这一事实(另文将给出观测结果). 进一步地从水团分析结果(见表 1 和图 5)可见,位于长江口北-济州岛锋面南北两侧的水团性质差异明显,锋面北侧的黄海混合水为中温、低盐、高溶解氧水体,黄海冷水团为低温、相对高盐、高溶解氧水体,而锋面南侧为高温、高盐、低溶解氧的对马暖流前缘上层混合水(Tu)和中温、高盐、低溶解氧的对马暖流前缘下层混合水(Tl),以及高温、相对高盐、中溶解氧的台湾暖流前缘混合水(Tw). 以上事实表明,在 10 月黄海水与东海水的水交换十分弱.

5 结果与讨论

5.1 秋季南黄海的温、盐和密度的分布特征反映夏季向冬季的特征转换,跃层上界深度除朝

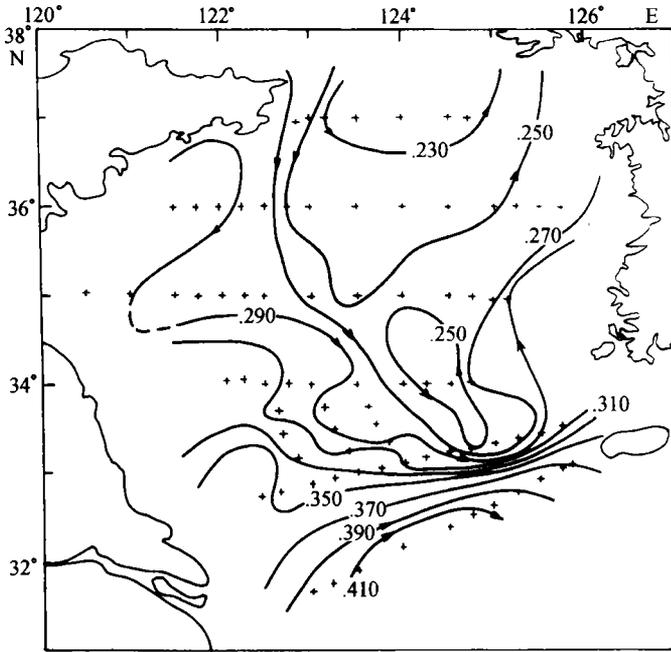


图6 10 m层重力势(m^2/s^2)的分布(1996年10月)

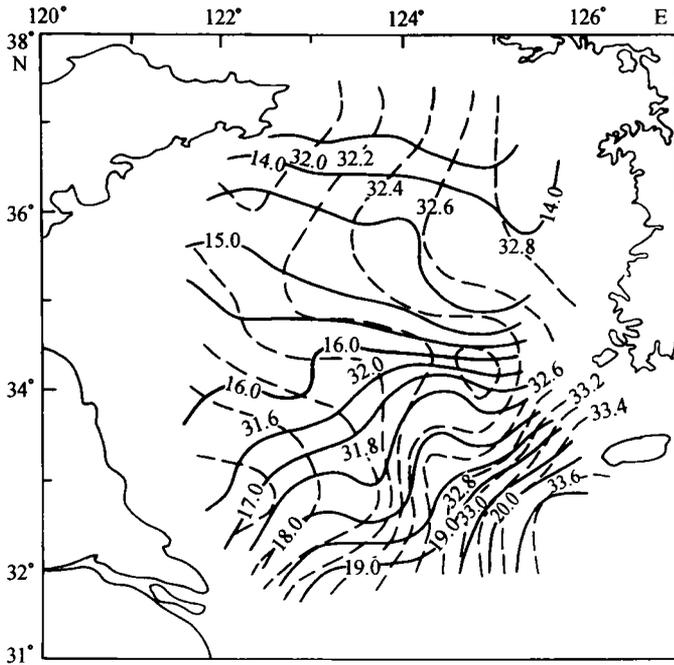


图7 10 m层温度($^{\circ}C$)(实线)和盐度(虚线)的平面分布(1997年11月)

鲜半岛西南部外海和长江口东北部小于、等于 20 m, 及济州岛西南部, 青岛外海大于 30 m 以外, 平均上界深度为 26 m. 30 m 以浅的平面分布特征显示出黄海混合水与沿岸水的混合和交

换的基本特征,即具有低温特征的鲁北沿岸水已绕过山东半岛顶端入侵南黄海,影响了山东半岛以南海域;朝鲜沿岸水也同时向南移动,一般相对高温、低盐和低密的残留苏北浅滩沿岸水和长江冲淡水与黄海水的混合水体从南黄海西南向东北方向伸展,暖舌前锋可达 36°N 附近。秋初至秋末由苏北沿岸西退,得不到低盐水的补充,以后它与周边的底层的中盐、低温的黄海水混合而减弱,并由东向西退缩。底层温、盐和密度的主要分布特征显示出黄海水与沿岸水的混合和交换状况,位于中央黄海槽区的低温、相对高盐和高密的黄海冷水团,其西侧与鲁北、苏北浅滩的沿岸水和长江冲淡水及研究海区南部的高温水形成明显的混合带。

5.2 从各等密度面上的相对盐度的分布特征显示,南黄海西侧 30 m 以深的黄海冷水团内垂向混合较强烈;而位于东侧 30 m 水深的黄海冷水团海域几乎没有垂向混合。这说明南黄海东、西两侧黄海冷水团垂向混合是不一致的。

5.3 以 $t-S$ 点聚图为依据,利用改进后的逐步聚类分析法能较好地对秋季水团进行分类。水团划分的结果显示秋季南黄海表层主要由黄海上层混合水、苏北沿岸水、台湾暖流前缘混合水和马暖流前缘上层混合水组成。黄海上层混合水为主要水团,其占据着研究海域的 90%。底层由黄海冷水团、马暖流前缘下层混合水组成(如图 5 所示)。黄海冷水团是主要水团,制约着南黄海底层的主要水文特征。

5.4 夏季长江径流冲出长江口时,先向东南与外海水混合形成冲淡水,由于偏南风的作用及台湾暖流的顶托,冲淡水转向东北直指济州岛。而较高盐的台湾暖流水可从下层穿过长江冲淡水流抵长江口北岸外海,图 4b 再次揭示这一现象。9 月以后在偏北风作用下,长江冲淡水逐渐向南转向。长江口与济州岛连线海域被以台湾暖流为主体的东海混合水所取代,它与黄海混合水形成一条甚强的锋面(见图 4),切断了黄海水与东海水的交换,此时,并无暖流进入南黄海形成所谓的黄海暖流,可以说这是秋季出现在这一海域的令人注目的水文现象。在这一过程中它可能把夏季进入南黄海的部分长江冲淡水切割留在南黄海,随后与南黄海水混合于 11 月消失。秋末随着偏北风的加强,苏北沿岸水越过长江口与济州岛连线的西侧海域入侵东海,苏北沿岸水南侵使南黄海海水的减少,势必造成长江口与济州岛连线以东较高盐的东海水进入黄海以补偿。由图 7 似乎可看到这一变化。进入黄海补偿的东海水,看来就是人们所称的黄海暖流。秋季出现的长江口至济州岛连线呈现的强锋面以及锋区甚强的向东流(见图 6),可能是转换季节中较短时间内存在的现象。然而它使我们找到黄海水与东海水交换的关键动力过程。

参考文献

- 1 Chen Changsheng, Beardsley R C, Richardson P L *et al.* Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow and East China Seas and adjacent Kuroshio during 1986. *Continental Shelf Research*, 1994, 14(7/8): 909~929
- 2 翁学传,王从敏. 关于台湾暖流的研究. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(1): 159~168
- 3 乐肯堂. 冬季黄海暖流的起源. 海洋学报, 1992, 14(2): 9~19
- 4 苏育嵩,喻祖祥,李凤岐等. 聚类分析法在浅海水团分析中的应用及黄、东海变性水团的分析. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(1): 71~85
- 5 李凤岐. 黄、东海域春季水团的划分、判别与分析. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(1): 22~23
- 6 Lie Heung-Jae. Summertime hydrographic features in the south-eastern Huanghai Sea. *Prog. Oceanog.*, 1986, 17, 229~242
- 7 郭炳火,李兴宰,李载学. 夏季对马暖流区黑潮水与陆架水的相互作用——兼论对马暖流的起源. 海洋学报, 1998, 20(5): 1~12
- 8 苏育嵩. 黄、东海地理环境与环流系统分析. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(1): 145~158

The hydrographic features and mixture and exchange of sea water in the southern Huanghai Sea in autumn

Zou Emei,¹ Guo Binghuo,¹ Tang Yuxiang,¹ Lee Jae-Hak,² Xiong Xuejun,¹ Zeng Xianmo¹

1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266003*

2. *Korea Ocean Research & Development Institute, Seoul*

Abstract——Based on the CTD data obtained from China-Korea Joint Investigation in October 1996, the characteristics of thermocline and vertical mixture in the southern Huanghai Sea in autumn are analysed, and the vertical mixture in the Huanghai Sea Cold Water Mass area is preliminarily discussed. The cluster analysis and Bayes multistage discrimination methods are used to classify the surface and bottom water masses and define the average characteristic values of temperature, salinity, dissolved oxygen and pH for different water masses. The discussions are focused on the mixture and exchange of the Huanghai Sea water with the coastal water and the East China Sea water according to the distributions of temperature and salinity, and the characteristics of different water masses.

Key words Southern Huanghai Sea water, mixture and exchange, cluster analysis, discrimination analysis