

东海北部冷涡海域夏季水文结构 及涡动混合的研究*

蓝淑芳

(中国科学院海洋研究所)

东海北部大陆架上存在着一个较大的冷涡,近十余年来,国内、外的海洋学专家依据多年调查所获得的温、盐度及海流资料对此冷涡进行了分析研究,得出该冷涡终年存在和中心位于 $32^{\circ}00'N, 126^{\circ}00'E$ 附近的结论(毛汉礼等, 1986; 蓝淑芳等, 1984)。

夏季, 该海域自温跃层所在深度至海底为东海北部底层冷水, 苏育嵩等(1989)曾对该水团的形成及其季节变化作了详尽分析。冷水的存在和发展伴随产生反时针的密度环流。另外, 冷水的东侧为西北向流动的黄海暖流, 西侧为流向东南的黄海沿岸流, 两者之间的切变效应以及反时针密度环流的存在是这里形成气旋型冷涡的主要原因。

1980 年 7 月 2—6 日, 中国科学院海洋研究所在东海北部冷涡附近海区布放了浮标阵 (I, II, III, IV 站), 进行了同步测流, 同时在 A, III, IV 站进行了温、盐度连续观测; 随后于 7 月 6—23 日又做了大面水文观测。作者引用上述资料进一步分析研究了该海区

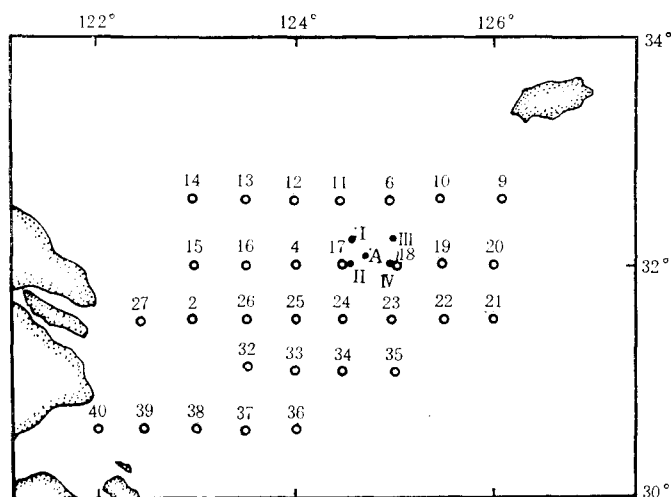


图 1 冷涡及其附近海域调查站位

○水文测站; ●锚定浮标测流站; A, III, IV 站为温、盐度连续观测站

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2499 号。
本课题为国家自然科学基金资助项目, 49176254 号。
收稿日期: 1994 年 11 月 3 日。

温、盐度分布特征及水团、海流结构,并重点讨论了冷涡附近海区的涡动混合问题,这对进一步揭示该典型海区的温、盐度逆转现象具有学术意义。调查站位如图1所示。

一、冷涡及其附近海域的温、盐度分布特征

1. 温度大面分布特征 调查海域按上层温度分布特点可以划分为三个区:(1)本调查海域的东北部,即冷涡所在中心海区,其温度值较稳定(约为 $23-24^{\circ}\text{C}$),该海区属黄海混合水范围。这里是冬季黄海沿岸水、东海混合水以及南黄海中部南侵水共同混合形成,并于春、夏季上层增温的中盐暖水。(2)冷涡以南和西南海域,是长江冲淡水 and 台湾暖流水交汇区。长江口外温度自北向南增高,台湾暖流水温度分布自西南向东北呈舌形伸展,等温线的温度值由高(28°C)逐渐变低(25°C)。台湾暖流自台湾东北部以高盐暖水舌

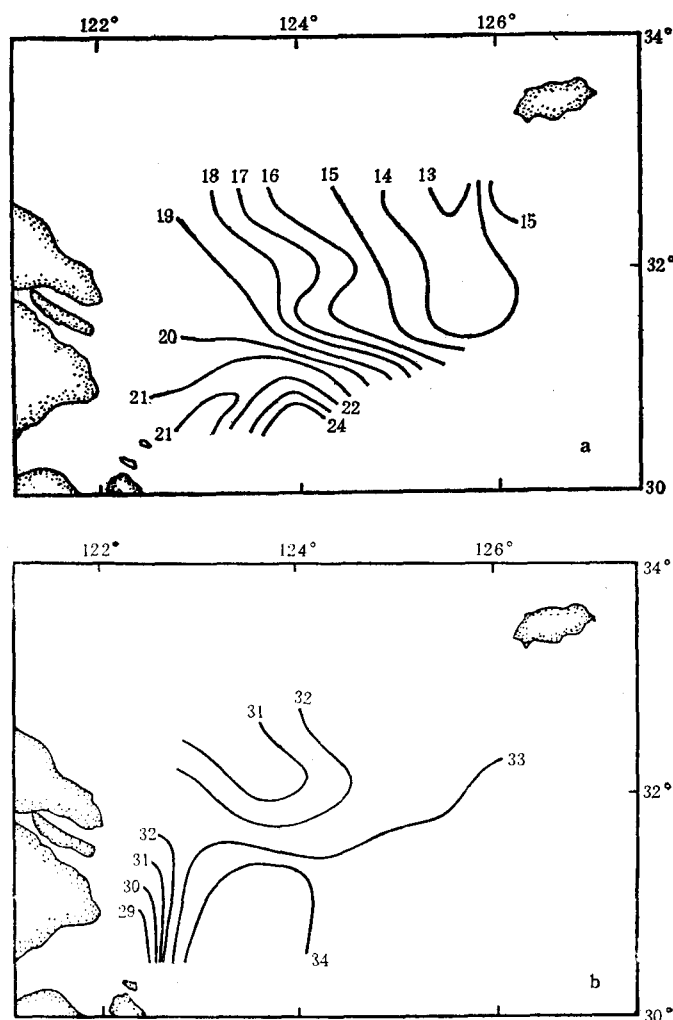


图2 冷涡及其附近海域的温、盐度大面分布(20m层)

a. 温度分布($^{\circ}\text{C}$); b. 盐度分布

态势大体沿 123°E 向北流动, 到达长江口以南海域有一部分水转向东北, 上述的温度舌形分布即代表这一部分海水; 而台湾暖流主支仍继续向北达 31°N 。(3)冷涡西部, 即调查海域西北部, 是以 $21-23^{\circ}\text{C}$ 等温线为中心的相对低温海区, 并且是夏季长江口东北经常出现气旋型涡旋的海域 (Pu Yongxiu, 1982), 黄海沿岸流呈东南方向在该海区流动。在 10m 和 15—20m 深度上, 调查海域北部有一低温水舌自西北向东南方向伸展, 随着深度的增加, 冷水舌的中心位置向东移动, 且低温舌轴逐渐转向南北向, 在 15m 深度上, 冷中心位于 $32^{\circ}-32^{\circ}30'\text{N}, 125^{\circ}\text{E}$; 在 20m 深度上, 冷中心位于 $32^{\circ}-32^{\circ}30'\text{N}, 125^{\circ}30'\text{E}$, 冷水舌周界温度为 14°C , 这是东海北部底层冷水 (图 2)。在 1963—1977 年的 15 年间, 东海北部底层冷水的中心位置 (即冷涡中心位置) 约在 $32^{\circ}-32^{\circ}30'\text{N}, 125^{\circ}30'-126^{\circ}30'\text{E}$ 之间变动 (蓝淑芳等, 1984), 本次调查的冷涡中心位置亦在此范围内。

2. 盐度大面分布特征 调查海域上层的东北部, 即冷涡所在海域上层, 属黄海混合水团, 盐度值为 30—32。盐度值随深度的增加而增加, 20m 层盐度值达 32.4—33, 这是具有中等盐度特征的东海北部底层冷水 (图 2b)。在调查海域南半部, 由于长江、钱塘江强大径流量的人海, 在此形成大范围低盐冲淡水区, 其上层盐度值为 16—28, 使南来的高温、高盐的台湾暖流水受到影响。随着深度的增加, 长江口和杭州湾口外低盐的冲淡水区缩小, 而自西南向东北伸展的台湾暖流高盐水舌增强, 盐度值高达 34 以上。调查海域西北部, 盐度值介于上述两海区之间, 10m 层以下是一个自西北向东南、等盐线为 31—32 的盐水舌, 这是黄海沿岸水沿东南方向向东海输送的相对低盐海水。

综上所述, 夏季冷涡所在海区上层海水属黄海混合水, 具有中盐暖水性质; 下层为具有低温、中盐性质的东海北部底层冷水。冷涡以南和西南为台湾暖流水和长江冲淡水交汇区, 上层受长江冲淡水影响, 台湾暖流水势力较弱, 但其随深度增加而增强, 具有高温、高盐特征。调查海域西北部为黄海沿岸水。

二、冷涡及其附近海域的水团

为进一步分析冷涡及其附近海域的水团, 作者计算了冷涡所在海域 3 个连续站的动力学参数——Brunt-Väisälä 频率, 即静态稳定性频率 (顾传晟等, 1985)。连续站的观测时间分别为: A 站为 7 月 2 日 20 时—3 日 4 时, III 站为 7 月 3 日 12—20 时, IV 站为 7 月 4 日 4—14 时, 观测时间间隔为 2 小时左右 (III, IV 两站为浮标阵中测站)。3 个测站各时刻的 Brunt-Väisälä 频率平方值 (以 N^2 表示, 未乘以重力加速度值) 随深度的变化均出现一个极大值, 极值所在深度多在 7.5m, 个别在 12.5m 深度上 (图 3)。

作者用 Brunt-Väisälä 频率平方极大值的个数加 1 判断海水垂向结构的水团个数, 故可以认为, 夏季冷涡及其附近海域的水团应该有两个, 一个是受太阳辐射影响而增温的上层水, 即黄海混合水; 另一个是尚未明显增温的下层固有水, 即东海北部底层冷水, 这两个叠置水团的边界多在 7.5m 层附近, 有时边界深度可达 12.5m。蓝淑芳等 (1984) 认为, 东海北部底层冷水和上界水的交界面深度在 15m 附近, 由此可推断上述 3 个测站所处位置不在东海北部底层冷水中心, 而位于冷涡的西南侧。

从图 3 还可看出, 观测期间 III 站 Brunt-Väisälä 频率平方极大值所在深度具有周日

变化特征,该测站 12—20 时的极大值有逐渐加深的趋势。由于该站位于黄海沿岸流的边缘,上述极大值的变化特征与不同水团的交汇变异有关。

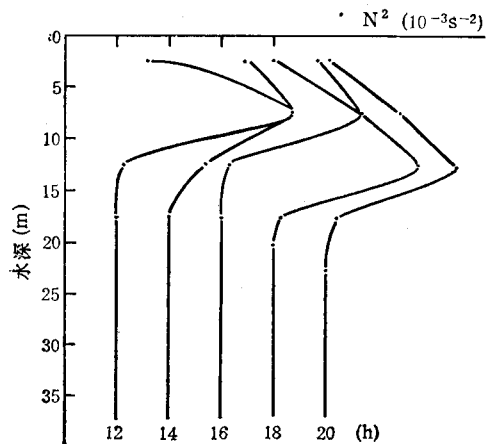


图3 N^2 值垂直分布演变图(III 站)
(横坐标值为 12 时 N^2 值,以后时刻横坐标值依次向右移动一格)

响向东南扩展势力亦减弱,因而各水团间混合大大减弱。此时由于太阳辐射的影响,上层水急剧增温,并形成强温跃层,而下层仍然保持低温中盐性质,这就是东海北部底层冷水。

关于东海北部底层冷水的成因,苏育嵩等(1989)指出,该冷水系冬季黄海沿岸水南下向东海输送低温水,并与外海高盐水混合变性形成的,春、夏季于东海北部区域的中部底层仍然保持低温性质。作者认为,冬季南黄海中部向东南直至东海北部底层冷水所在海域存在着南向的流动(蓝淑芳等,1984),所携带的黄海水也参与了上述两部分海水的混合,致使该海域冬季温、盐度呈垂直均匀分布。当春、夏季来临,黄海暖流势力减弱,而沿东南向流动的黄海沿岸流受长江冲淡水 and 风向变化的影

三、冷涡及其附近海域的海流结构

在冷涡附近海域设置的 4 个浮标站的不同层次上悬挂了印刷海流计,进行了 3 昼夜的同步观测(观测时间间隔为 10min),对 7 月 2 日 12 时 30 分至 7 月 5 日 12 时 3 昼夜内

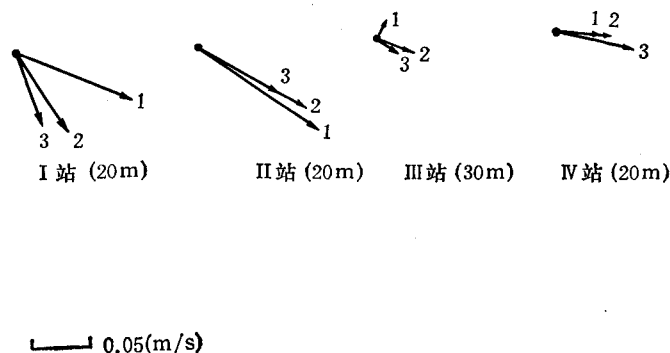


图4 浮标阵测流站流速图
(图中 1,2,3 分别表示第一、二、三昼夜)

每隔半小时的测流记录进行计算,得到各测站几个层次上的余流分布(熊庆成等, 1984),如图 4 所示(I,II,IV 站均为 20m 层观测,III 站用 30m 层的观测代替)。

余流流速以 II 站和 I 站较大,且流速值有逐日减小之趋势。其中 II 站第一昼夜流

速值最大, 达到 0.118m/s , 流向均为东南向; I 站流向逐日呈顺时针方向变化; III 站和 IV 站流速较小。流向除 III 站第一昼夜为东北向外, 其他均为东南向, 说明该 4 测流站没有设在冷涡中心处, 而是位于冷涡中心的西南, 东南向的流动代表着黄海沿岸流的流向, 也代表着冷涡的反时针密度环流的东南方向。I、II 两站的流速较大于 III、IV 两站流速的原因是由于前者更接近黄海沿岸流的主轴处。

四、冷涡及其附近海域的水平涡动混合特征

上述 4 个浮标站 10m 层及其以上层次的余流矢量在空间和时间上的变化都是十分显著的, 流向有呈顺时针方向变化的趋势。测流期间风向多变, 大体亦呈顺时针方向旋转(熊庆成等, 1984)。因此可以认为, 上层海流的风海流性质比较明显, 其涡动混合具有风混合性质; 20m 层及其以深层次受风的影响较小。本文重点讨论该海域 20m 层及其以深的涡动混合问题。

作者计算了冷涡附近海域浮标阵 4 个测站上 20m 层的水平涡动交换系数和涡动混合椭圆(毛汉礼等, 1989; Тимофеев, В. Т. и В. В. Панов, 1962), 结果如表 1 和图 5 所示。

表 1 中 $A_x, A_y, A_{xy}(A_{yx})$ 为水平涡动交换系数, 其中 A_x 和 A_y 分别为 x, y 轴方向上的涡动交换系数。本文取 x 轴方向为南、北向, y 轴方向为东、西向。 $A_{x'}, A_{y'}$ 为经坐标变换(旋转 α 角)得到标准椭圆短半轴 ($a_{x'}$) 和长半轴 ($b_{y'}$) 方向上的涡动交换系数。

计算结果表明, 该海区各层次 3 昼夜的涡动混合具有以下特征:

(1) 涡动混合是各向异性的, 不同方向的涡动混合强度有所不同, 西北-东南向(或北-南向)的涡动混合较强; 东北-西南向(或东-西向)的涡动混合相对较弱; 椭圆短轴多呈西北-东南向(或北-南向), 而长轴多呈东北-西南向(或东-西方向)。

(2) 在同步观测的 3 昼夜内, 各站诸层次的涡动混合强度均呈逐日减弱的趋势, 即长轴和短轴的量值逐日增加。

(3) 通过坐标变换所得标准椭圆长(短)轴的旋转角度结果表明, 椭圆轴呈逐日顺时针方向转动, 但逐日变化不大。

(4) 对浮标阵 4 个测站诸层次水平涡动交换系数的计算结果表明, I 站 20m 层第一

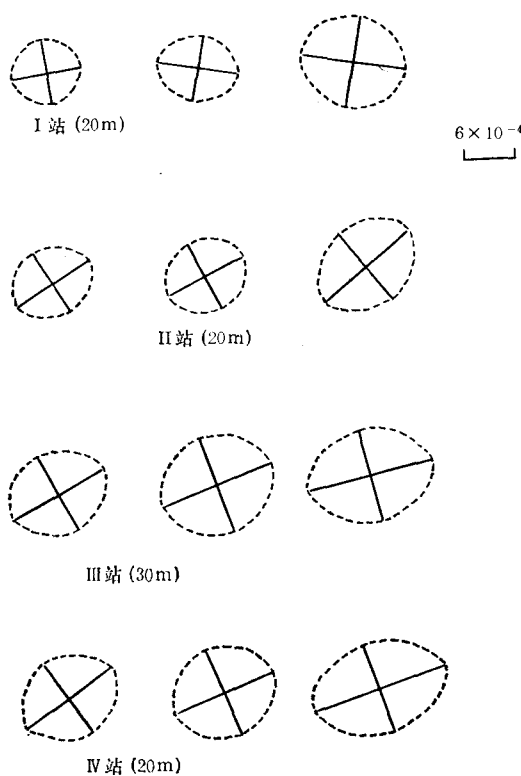


图 5 浮标阵 4 测站的涡动混合椭圆

表 1 涡动交换系数及涡动混合椭圆要素值

站号 层次	时 间	涡动交换系数 ($10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)					椭圆半轴 (10^{-4})		旋转角 α
		A_x	A_y	$A_{xy}=A_{yx}$	$A_{x'}$	$A_{y'}$	$a_{x'}$	$b_{y'}$	
I 20m	7.2.12:30 3.12:00	5.97	4.23	-0.04	5.97	4.23	4.09	4.86	358°36'
	7.3.12:30 4.12:00	5.57	3.93	0.25	5.46	4.04	4.24	5.04	8°29'
	7.4.12:30 5.12:00	3.73	2.20	0.27	3.54	2.30	5.18	6.74	9°45'
II 20m	7.2.12:30 3.12:00	4.51	4.14	-0.39	4.75	3.89	4.71	4.91	327°45'
	7.3.12:30 4.12:00	4.44	3.51	-0.55	4.70	3.26	4.75	5.34	335°10'
	7.4.12:30 5.12:00	3.20	2.77	-0.76	3.78	2.19	5.59	6.01	322°58'
III 30m	7.2.12:30 3.12:00	3.08	2.67	-0.25	3.20	2.55	5.70	6.12	334°39'
	7.3.12:30 4.12:00	2.84	2.24	-0.18	2.89	2.19	5.93	6.68	344°17'
	7.4.12:30 5.12:00	3.23	1.70	-0.30	3.28	1.65	5.56	7.67	349°10'
IV 20m	7.2.12:30 3.12:00	3.55	3.12	-0.47	3.85	2.82	5.31	5.66	327°4'
	7.3.12:30 4.12:00	3.06	2.61	-0.25	3.06	2.60	5.72	6.19	335°52'
	7.4.12:30 5.12:00	3.20	1.51	-0.55	3.36	1.35	5.59	8.14	343°27'

昼夜标准椭圆长、短轴方向上的涡动混合系数最大, 分别为 $4.23 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.97 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 即涡动混合最强; 短轴为南-北方向, 长轴为东-西方向。诸站中涡动混合最弱的是 III 站底层(44m), 其长、短轴方向上的涡动混合系数分别为 $1.15 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.36 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

冷涡附近水平涡动混合的上述特征基本上反映了该海域水平方向上的潮混合特点, 并与余流的变化有关, 这可以用东海潮流的分布变化特征予以说明。整个东海以半日潮流为主, 且大部海区属正规半日潮流, 潮波进入东海后沿西北方向传播, 所以 M_2 分潮潮流椭圆长轴在 124°E 以东呈西北-东南方向; 在 124°E 以西, 逐渐接近北-南方向, 即潮流在该方向上最强, M_2 分潮潮流椭圆率的变化规律是在东海大部分海区为右旋, 其中 32°N 、 $124^\circ30'\text{E}$ 附近有一强的右旋潮流区(丁文兰, 1984)。浮标阵位置刚好位于 $32^\circ-32^\circ15'\text{N}$ 、 $124^\circ34'-124^\circ55'\text{E}$ 范围内, 即处于上述右旋潮流区, 所以在潮流椭圆长轴方向上(即西北-东南方向)涡动混合较强; 而在短轴方向上涡动混合则较弱, 并且通过坐标变换所得标准椭圆的旋转亦呈顺时针(右旋)转动。由于所用浮标阵同步观测资料的日期为 7 月 2—5 日, 对应于阴历日期为 6 月 20—23 日, 即由望逐渐接近下弦期间, 所以潮流在该期间内

逐日减小,这就是上述涡动混合逐日减小的原因。

参 考 文 献

- 丁文兰,1984,东海潮汐和潮流特征的研究,海洋科学集刊,21:135—148。
- 毛汉礼、甘子钧、沈鸿书、蓝淑芳,1989,杭州湾潮混合的初步研究 II 下湾区,海洋科学集刊,30:19—32。
- 毛汉礼、胡敦欣、赵保仁、丁宗信,1986,东海北部的一个气旋型涡旋,海洋科学集刊,27:23—31。
- 苏育嵩、李凤岐、马鹤来、钱清瑛,1989,东海北部区域底层冷水团的形成及其季节变化,青岛海洋大学学报,19(1):1—14。
- 顾传成、蓝淑芳、傅秉照,1985,东海陆架区 Brunt-Väisälä 频率空-时变化分析,海洋科学集刊,25:1—10。
- 蓝淑芳、顾传成、傅秉照,1984,东海北部陆架区底层冷水的初步分析,海洋科学集刊,21:75—86。
- 熊庆成、赵保仁,1984,东海北部冷涡区温、盐度和海流观测的分析,海洋科学,2:1—7。
- Pu Yongxiu (浦泳修), 1982, The upwelling and eddy phenomena in the north part of the East China Sea. In Proceedings of the Japan-China Ocean Study Symposium. Institute of Oceanic Research, Tokai University, 79—94.
- Тимофеев, В. Т. и В. В. Панов, 1962, Косвенные методы выделения и анализа водных масс. Гидрометеониздат Издательство, Ленинград. стр. 1—351.

STUDY ON THE HYDROLOGICAL STRUCTURE AND THE TURBULENT MIXING NEAR THE COLD EDDY SEA AREA IN THE NORTHERN EAST CHINA SEA IN SUMMER*

Lan Shufang

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

Data from July 2—6, 1980 synchronous current observations (with plunging buoy arrays at 4 stations near the northern East China Sea Cold Eddy area) and from large-scale hydrological observations by the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, were used to analyze the temperature and salinity distribution characteristics, the structures of water masses and currents, and especially the turbulent mixing near the Cold Eddy in the study area.

In light of Ertel's tensor theory for turbulent exchange, the turbulent exchange coefficient and the turbulent mixing ellipse can be obtained according to the method for calculating the turbulent mixing ellipse. The results indicate that.

1. The turbulent mixings are anisotropic, being stronger in the directions of northwest-southeast, or north-south than northeast-southwest or east-west.
2. During the synchronous observation for three days and nights, the turbulent mixings had the weakening tendency day by day.
3. The rotary angles of the standard ellipse obtained by coordinates transformation rotate clockwise with time.

In light of the variation characteristics of tidal current distribution in the East China Sea, the above mentioned horizontal turbulent mixings primarily reflect the property of tidal mixings.

* Contribution No. 2499 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.