

南黄海斜断面的水文状况及其微细结构*

蓝淑芳 顾传成 傅秉照

(中国科学院海洋研究所)

1985年9月,中国科学院海洋研究所对斜贯南黄海的断面(图1)进行了现场观测。该断面呈东南-西北走向,起始测站B6位于济州岛西南,终点测站H12位于青岛外海,全长约329.5 km。断面东南端位于南黄海暖流水附近(蓝淑芳等,1986),中部横截黄海冷水团,西北端位于青岛水团附近,因此对该断面的调查是很有意义的。

本文着重分析研究这一南黄海斜断面的水文状况以及温度和盐度的垂直微细结构。

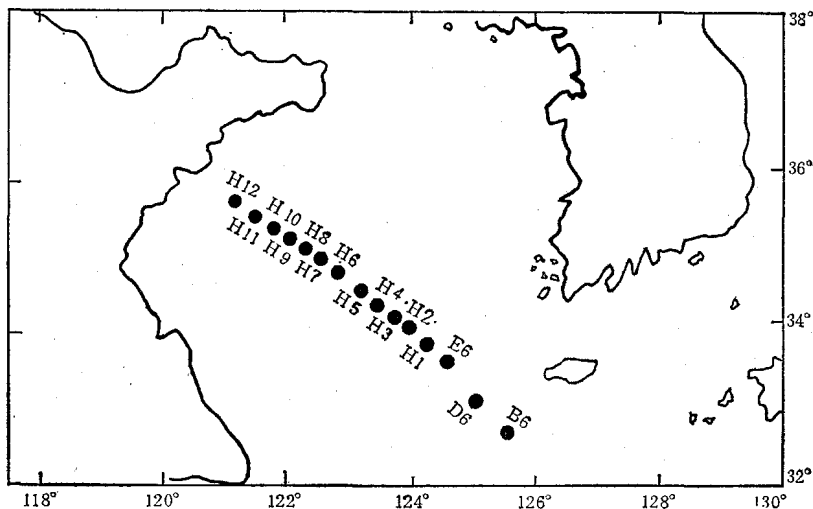


图1 斜断面的位置和站位分布

一、测量仪器和方法

9月25—27日中国科学院海洋研究所“科学1号”调查船使用 Mark-III CTD 探测仪,对断面的15个测站进行了测量。测量参数计有温度、盐度、深度、溶解氧等。观测时,按要求将仪器以1 m/s的速率下放,至接近海底时提起,取自上而下的记录。

使用 Mark-III CTD 探测仪不仅观测简便,并且所得资料具有连续性和准确性的优点,这就为水文要素微细结构的研究提供了条件。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1366号。

收稿日期:1986年9月12日。

二、断面的水文状况

观测期间,各站当场气温在 16.5—18.0℃ 范围内,观测起始测站风力较大,风速为 10m/s,风向南偏东;沿断面向西北风力逐渐减小,风向逐渐向东偏,在断面西北端风速减弱至 1.2 m/s,风向东。

温度分布 图 2 是断面的温度分布,其特点是存在明显的季节性温跃层。此温跃层不在同一水平层次上,所在深度不一:自 H 6 站向西北诸站,温跃层所在深度在水平方向上呈正弦波状分布,H 7 站和 H 10 站适为波峰,上界深度在 20 m 左右;自 H 6 站向东南至 H 3 站,深度基本稳定在 24 m 至 36 m 层次上;从 H 2 站至 E 6 站,深度变浅,在 16 m 至 20 m 层次上,断面东南端的 D 6 和 B 6 站,深度又增加到 19 m 至 21 m 层次上。

季节性温跃层以上是上均匀层,层内温度值自西北向东南递增,断面西北部在 21—22℃ 之间,中部和东南部均高出 2℃ 左右。季节温跃层以下为强大的冷水所盘踞,低于 10℃ 的冷水占据断面中部广大海区(从 H 7 站至 E 6 站),这就是黄海冷水团。黄海冷水团东南一侧,是它与南黄海暖流水交汇海域,其温度在 10—14℃ 范围内;其西北一侧,H 11 站及其附近海域温跃层以下,则为 14.5℃ 左右的孤立冷水,这是通常所说的青岛水团(张存义,1986)。

盐度分布 图 3 是断面的盐度分布,与温度分布相似,也呈现明显的盐跃层。断面东南侧盐跃层尤为显著,表征其上界位置的 31.50 等盐线的分布与表征温跃层位置的 20℃ 等温线的分布相对应;断面西北侧,表征其上界位置的是 31.00 等盐线,亦与 20℃ 等温线的分布对应一致。上均匀层盐度分布均匀。在盐跃层以下,盐度值高于 32.50 的高盐水占据断面中部和东南部广大海区,33.00 等盐线包络了东南半个断面。由于南黄海暖流水的影响,高盐水范围自东南向西北递减。同样,在 H 11 站及其附近的盐跃层以下,有一孤立的盐度值大于 31.50 的高盐水团,即青岛水团,与周围水相比较,它具有低温高盐特征。

密度(σ_t)分布 图 4 是断面的密度分布,与温、盐度分布相对应,也存在明显的密度跃层。在上均匀层中,存在两个 σ_t 值小于 21 的低密度区,分别位于 H 4—H 8 站之间和 H 1—B 6 站之间。密度跃层以下广大海区为 σ_t 值大于 25 的高密度水,其所占范围沿断面自东南向西北递减。同样,在断面西北部,H 11 站附近海域下层有一孤立的 σ_t 值大于 23 的高密度水。

以上所述是观测时断面的海况。以下讨论断面的动力学基本特征。

Brunt-Väisälä 频率分布 图 5 是断面的 Brunt-Väisälä 频率分布(以下简称为 B. V. f.)。如将海水看作不可压缩流体,那么以 N 表示:

$$N = \left(-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

关于 N 的计算方法仿照文献(顾传斌等,1985),只是 ρ_0 的选取不同,本文选取每个测站上的垂直平均密度为 ρ_0 。由计算可知,在季节性跃层以上的水层中,B. V. f. 值几乎均为零值(在个别层次上 N^2 出现负值),这意味着,上层水是非常均匀稳定的;在季节性跃层内,B. V. f. 值较高(如图 5),出现三个高频中心:一个位于断面中部,黄海冷水团之

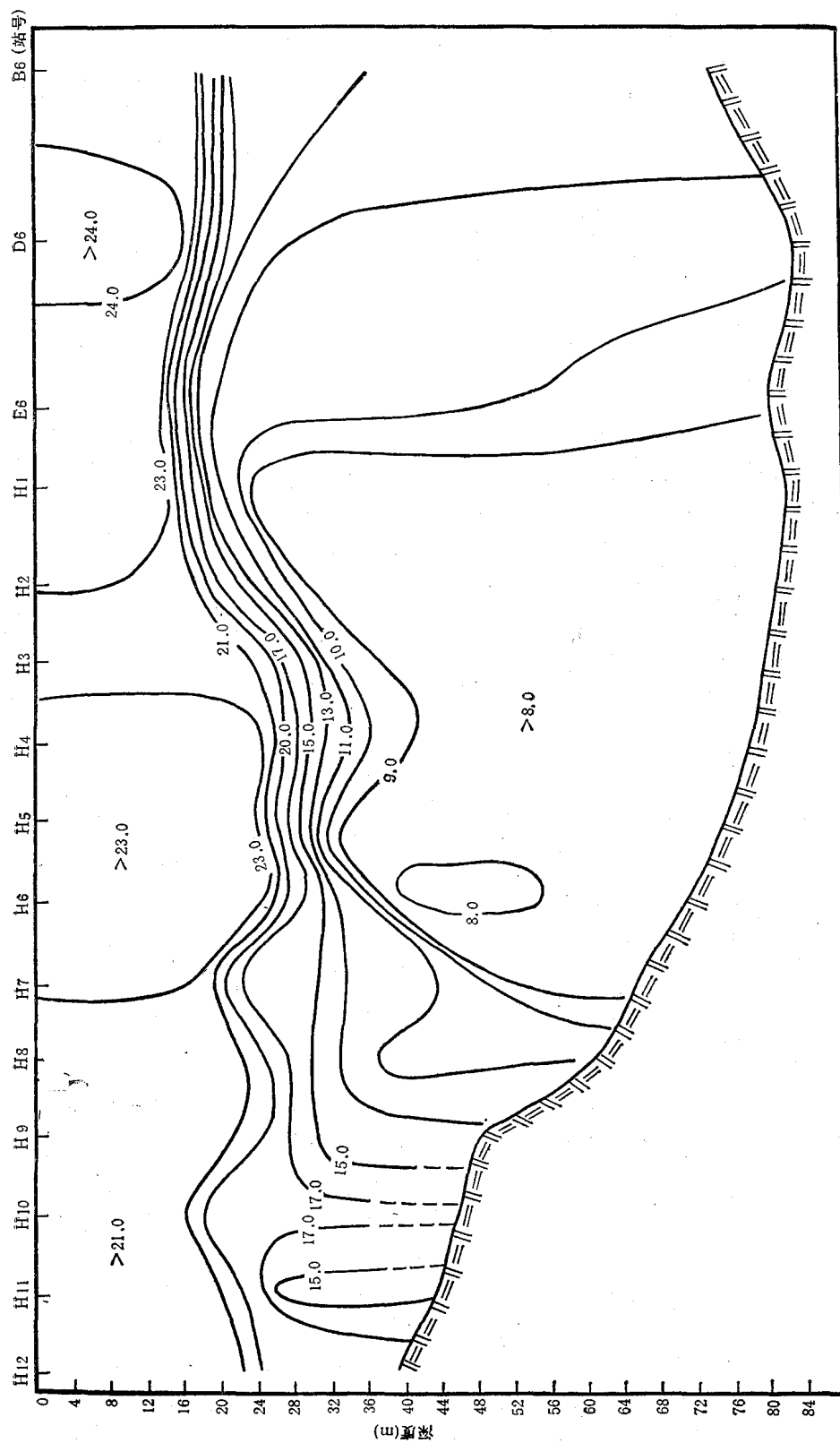


图2 断面温度分布

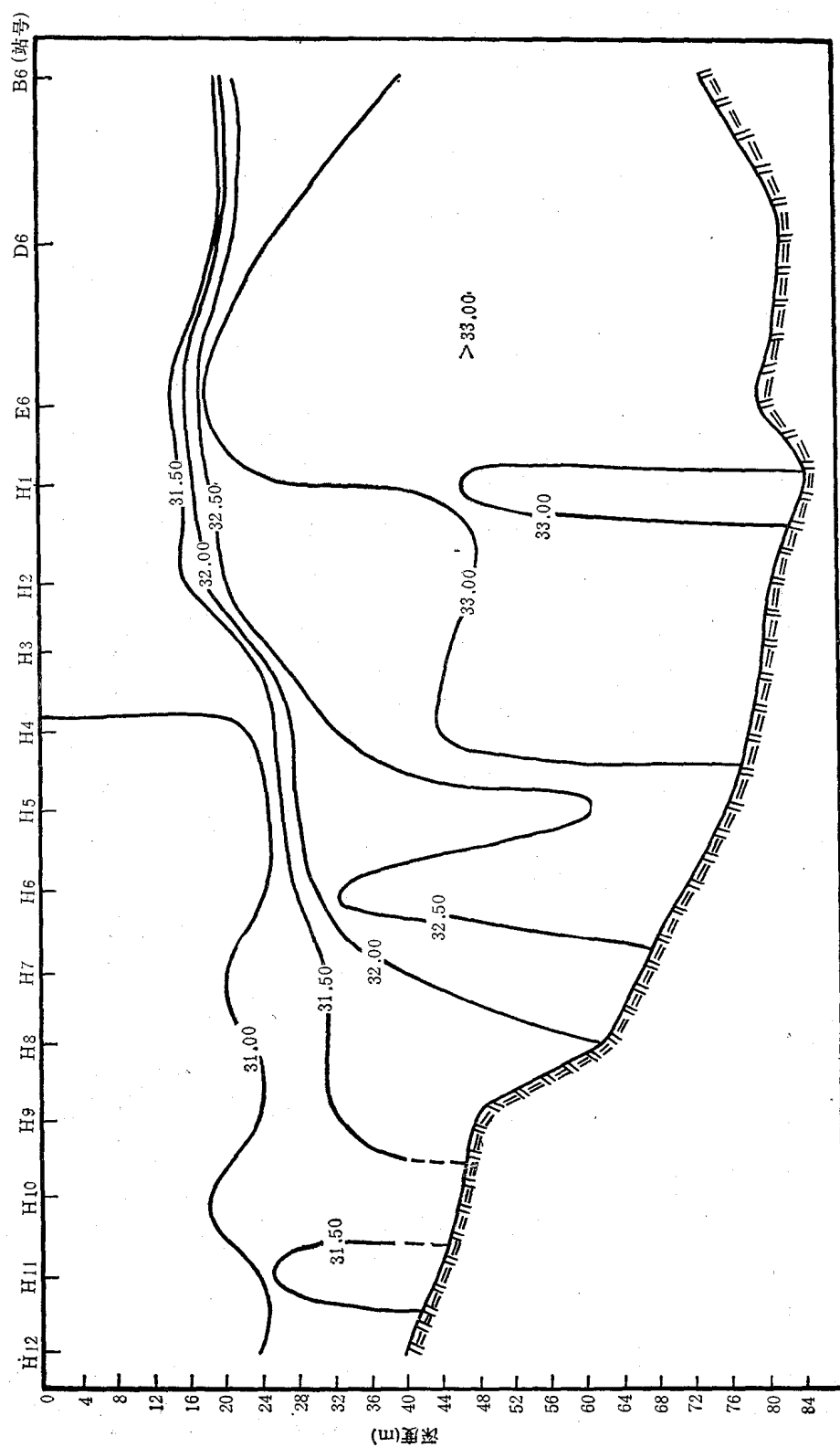


图 3 断面盐度分布

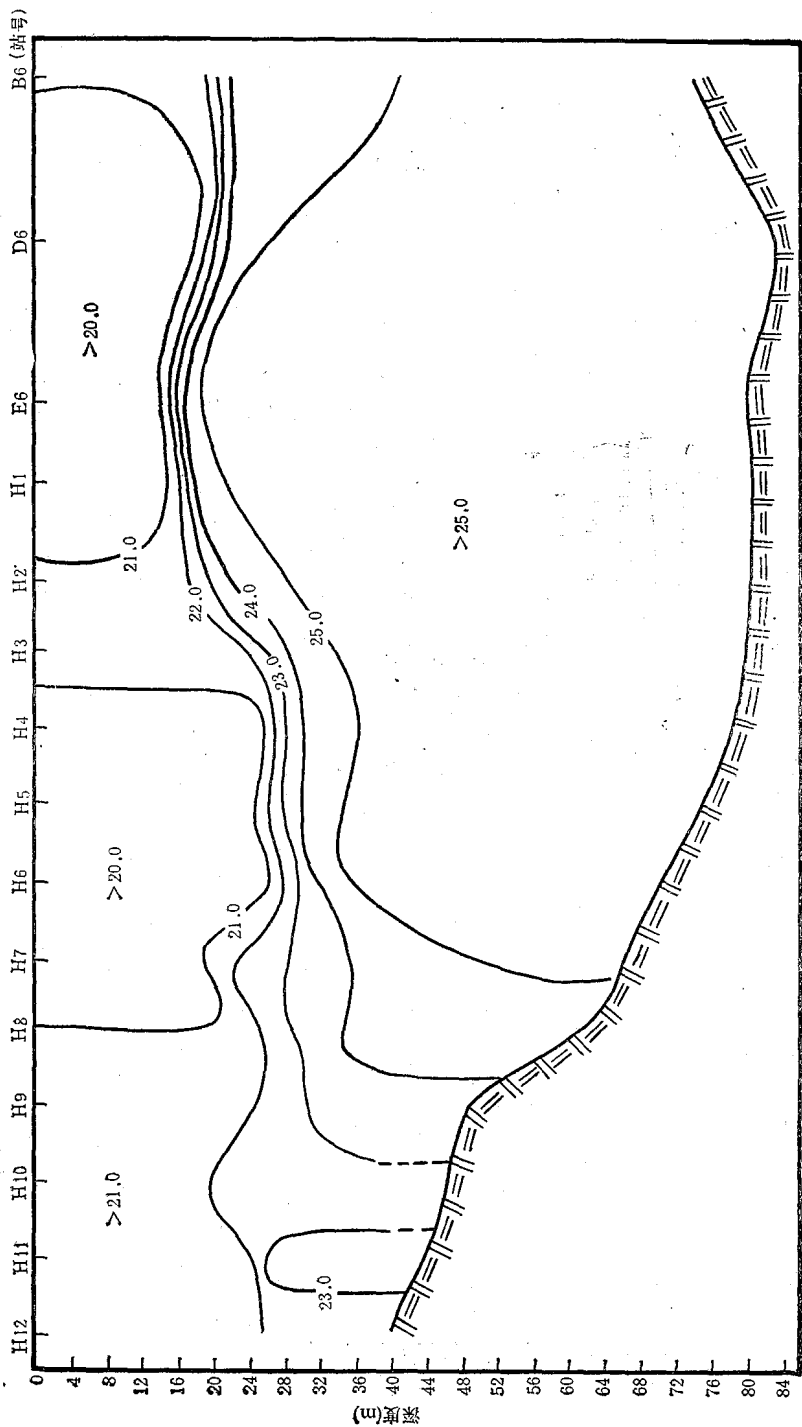


图4 断面密度(σ_t)分布

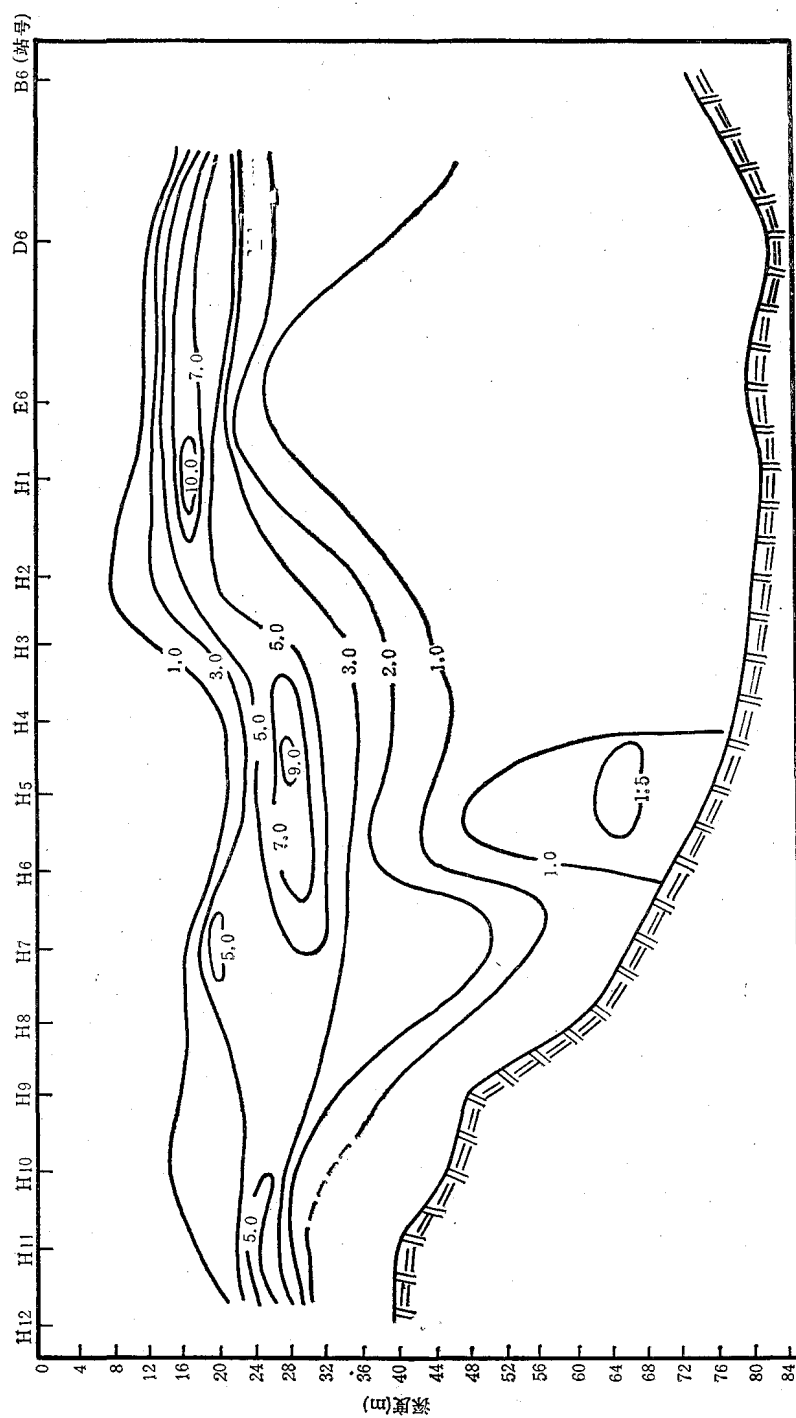


图5 断面 B.V.f. 分布 (B.V.f. 值放大 10 倍)

上,中心等频率线值为 $9.0 \times 10^{-1}/s$; 一个位于断面西北部,青岛水团之上,中心等频率线值为 $5.0 \times 10^{-1}/s$; 另一个位于断面东南部,黄海冷水团和南黄海暖流水交汇水之上,中心等频率线值为 $10.0 \times 10^{-1}/s$ 。高频区意味着该海区海水处于静态不稳定状态。季节性跃层以下为低频区, B. V. f. 值随深度的增加逐渐降低, 接近海底时 B. V. f. 值较小或为零值。所以,在季节跃层以下的均匀层里,下层较之上层可能是相对稳定的。

地转流分布 应用 Helland-Hansen 动力计算方法对断面上的地转流速进行了动力计算(取观测最深层次 76m 作为零面), 图 6 是断面地转流速分布。在断面东南部,地转流速几乎均为正值,这表明与断面正交的地转流速分量的方向是由西南向东北,且上层流速高于下层流速。断面中部广大海区,上层流速分量均为负值,这意味着,与断面正交的地转流速分量的方向是由东北向西南,下层,也就是黄海冷水团盘踞海域,其右侧地转流速分量为正值,左侧为负值,这意味着,与断面正交的地转流速分量的方向在其右侧是由西南向东北,在其左侧是由东北向西南,这构成了黄海冷水团的反时针密度环流。青岛水团两侧与断面正交的地转流速分量的方向也相反,它们构成了青岛水团的反时针密度环流,但流速较大,约为 10 cm/s 。在青岛水团和黄海冷水团交界海域,与断面正交的地转流速分量是由东北流向西南,流速颇大,最大可达 16 cm/s 。

Richardson 数 Richardson 数是一个无量纲数,可作为海洋分层流体稳定性的判据,以 Ri 表示:

$$Ri = \frac{N^2}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

式中的 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 为地转流的垂直剪切。断面 Ri 数的分布如图 7。 Ri 的物理意义十分清晰,它是海洋垂直混合过程中稳定性浮力和非稳定性剪切相对重要性的量度。一般认为当 Ri 数低于 0.25 时,剪切不稳定性在海洋混合过程中处于主导地位,混合发展或加强,海洋湍流生成发展。

但是,从图 7 中很难直接得到产生湍流的信息。由图 7 可知,在季节性跃层内 Ri 值较高,表明其层化非常强,流体稳定。这里有三个高值中心: 一个位于断面东南部,中心 Ri 值为 10; 一个位于断面中部,中心 Ri 值约为 5; 另一个位于黄海冷水团和青岛水团之间,中心 Ri 值为 10; 这些高值中心的位置均在季节性跃层下界附近。此外,在青岛水团的上界,断面东南端的中层(40m 深度上),还出现小范围的次高值中心,中心值约为 3,显然,这主要是流速垂直剪切所造成的。

三、温度、盐度的微细结构

对海洋微细结构的研究发展较晚,原因在于它必须依靠高灵敏度、低惯性的测量仪器进行观测,这类测量仪器直到 70 年代才设计、研制得比较完美。从此,小尺度湍流和内波的研究蓬勃开展。与此同时,在观测记录中发现了海洋水文物理场内部存在着丰富的微细结构。这些现象之间错综复杂的联系引起了世界海洋学家的密切注意和巨大兴趣(周

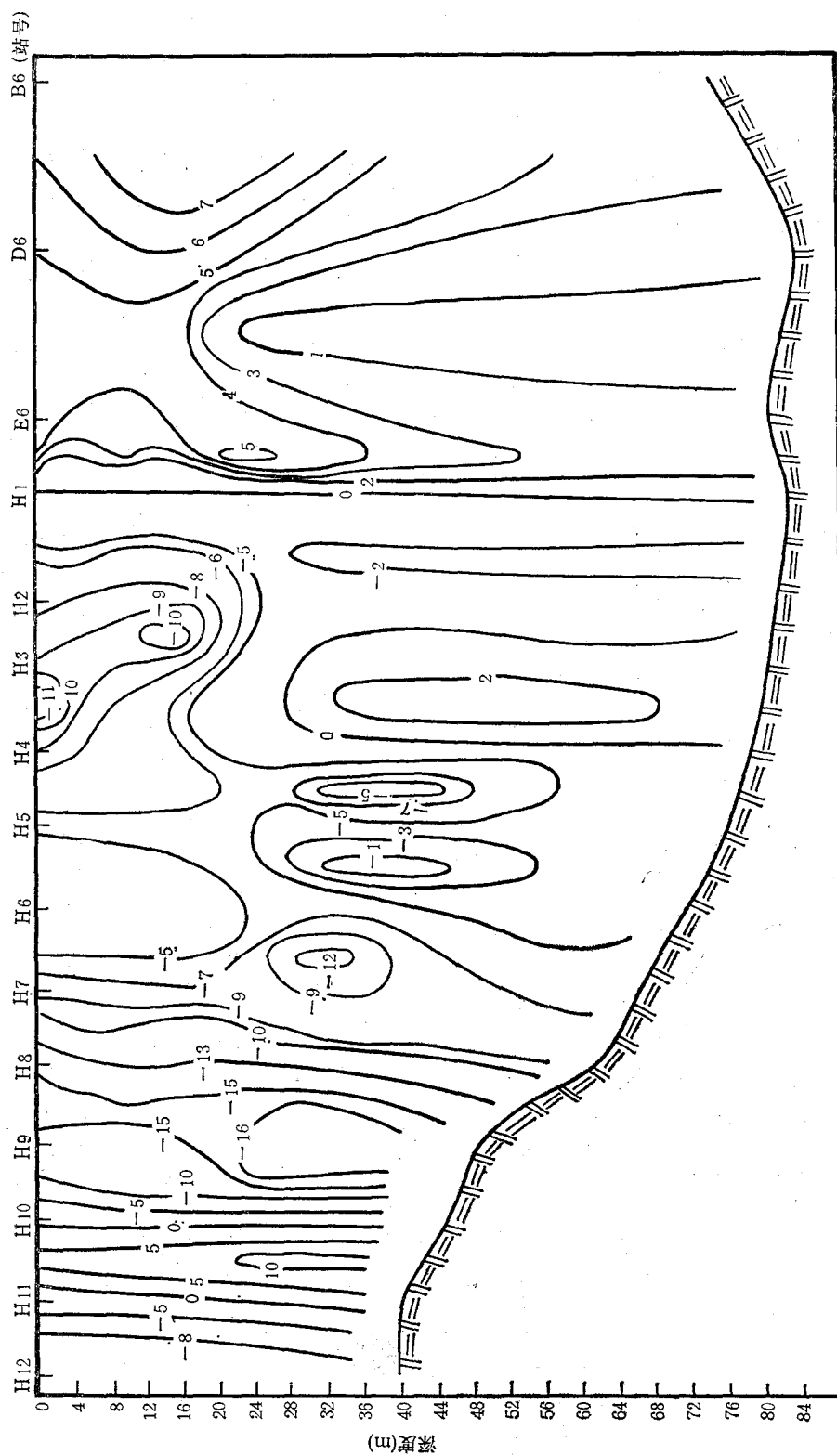


图6 与断面正交的地球流速分量断面分布
(正值表示垂直流入断面, 负值表示垂直流出断面)

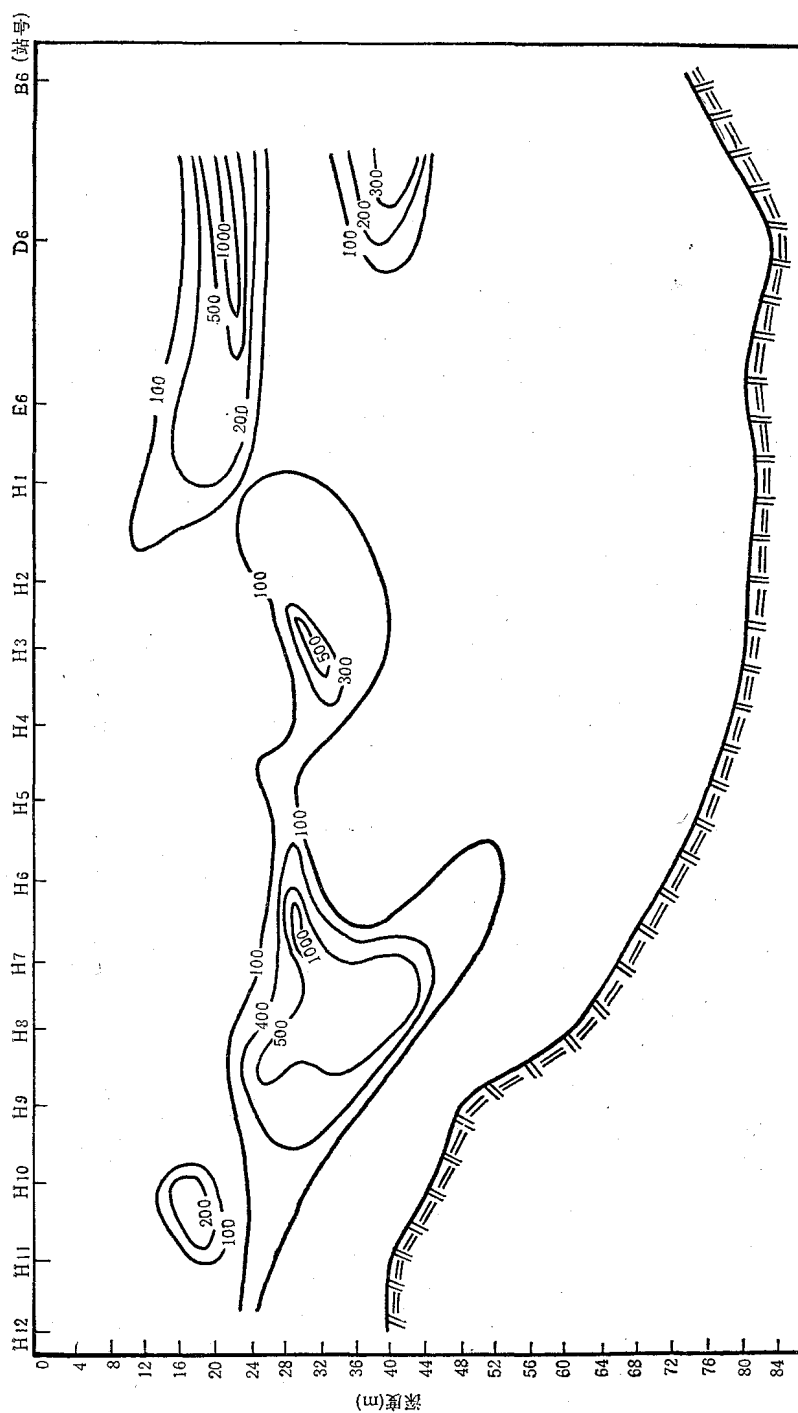


图7 断面 R_1 数分布
(R_1 值放大 100 倍)

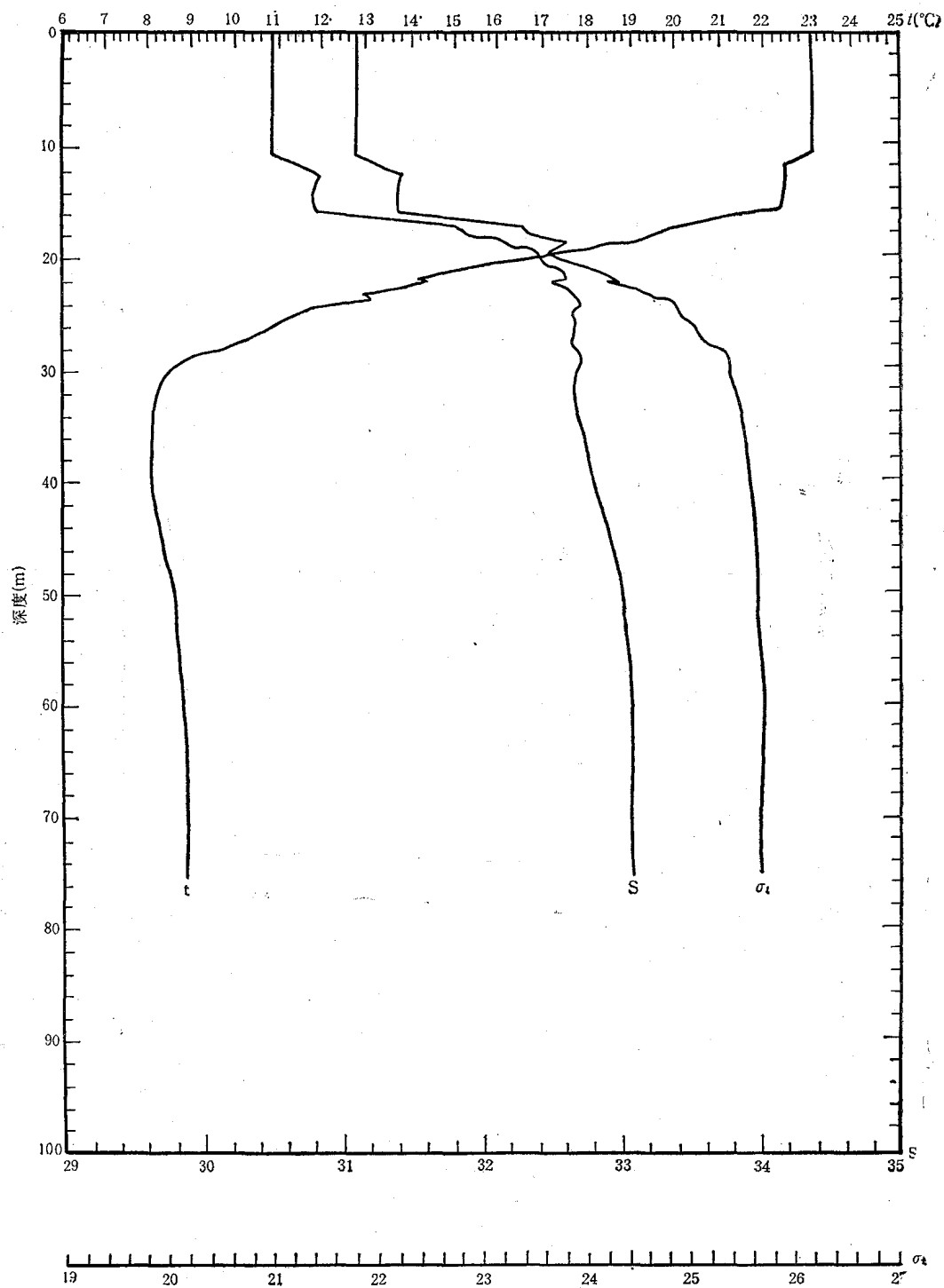


图 8 H2 站温度、盐度、密度垂直分布

东健三等, 1976; Masao Fukasawa 等, 1978; A. S. Monin 等)。我国自 80 年代开始引进 XBT, CTD, STD 等先进海洋调查仪器, 目前国内已初步开展关于海洋水文要素

微细结构的研究。例如乐肯堂(1984)¹⁾引用 CTD 观测资料对长江冲淡水远岸段温、盐度微细结构进行了初步分析；崔茂常等(1986)对盐指对流与阶梯状结构进行了分析探讨；方欣华等(1987)用 CTD 资料分析了东海温、盐、密度垂向细结构。

根据我们观测资料分析,在南黄海斜断面季节性跃层中,水文要素的微细结构是比较明显的,下面分别讨论温、盐度的微细结构及其统计特性。

断面温度微细结构 图 8 是 H 2 站温度垂直分布曲线。它表明,南黄海中存在多重的阶梯结构和微细结构。为了分析这些微细温度梯度层的特征及其统计性质,现将各测站负温度垂直梯度值 $\geq |0.02|^\circ\text{C}/\text{m}$ 的水层划为温度梯度层,其中梯度值 $\geq |0.20|^\circ\text{C}/\text{m}$ 的水层按文献(毛汉礼等,1964)称作温跃层,则断面的温度梯度层分布如图 9。

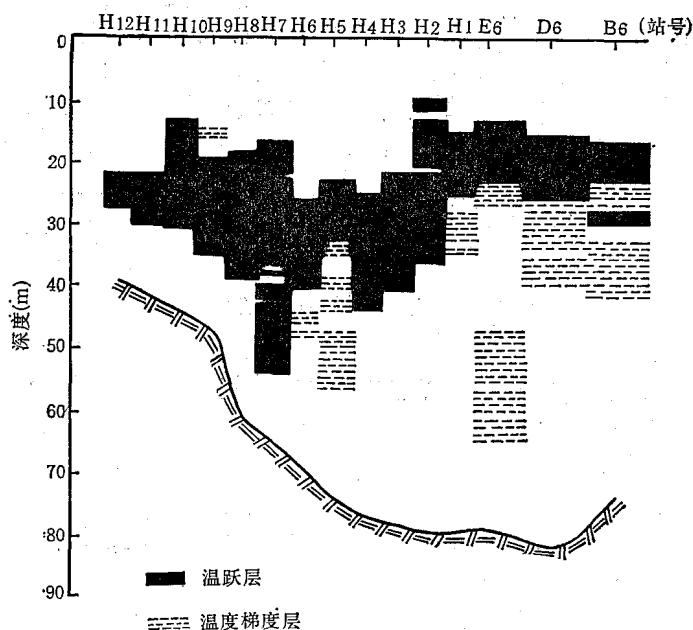


图 9 温度梯度层断面分布

断面上共出现 41 个温度梯度层,其中温跃层占 60%。温度梯度层出现的个数以 H7 站居多,计有 6 个,且均为温跃层。H2 站次之,计有 5 个温跃层。温度梯度值 $\leq 0.05^\circ\text{C}/\text{m}$ 以及在 $0.20-0.50^\circ\text{C}/\text{m}$ 范围的居多数;厚度值在 1—2 m 范围的较多;上界深度在 10—25 m 内者占半数,下界深度在 30—40 m 范围内的较多;如图 10 所示。断面上的近表层和近底层,不出现温度梯度层。

在断面多数测站上还出现温度逆转现象。取温度垂直梯度值 $\geq 0.02^\circ\text{C}/\text{m}$ 的水层为逆温梯度层,其中梯度值 $\geq 0.10^\circ\text{C}/\text{m}$ 的水层为逆温跃层,则逆温梯度层的断面分布如图 11。

断面上共有 32 个逆温梯度层,其中逆温跃层占 25%,H2 和 H5 站上分别出现 7 个和

1) 乐肯堂, 1984. 长江冲淡水远岸段温、盐细结构的初步分析. 中国海洋湖沼学会第四届全国会员代表大会暨学术年会论文摘要汇编。

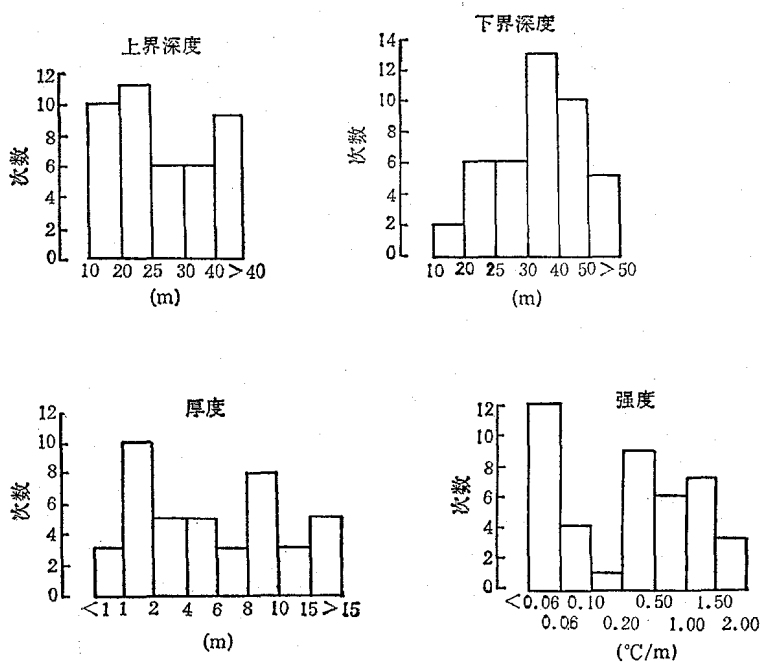


图 10 温度梯度层各特征值直方图

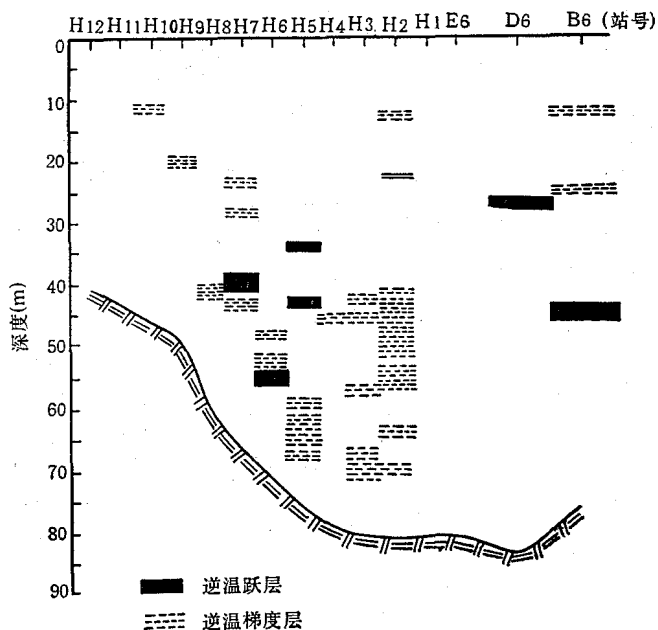


图 11 逆温梯度层断面分布

6个逆温梯度层,其中逆温跃层均为2个。逆温梯度值在 $0.04\text{--}0.09^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 范围者较多;逆温梯度层的厚度值绝大多数 $\leq 2\text{m}$,其中 $\leq 1\text{m}$ 者占半数;逆温梯度层上、下界的深度分布比较分散,上界最小深度为 10.70m ,最大可达 65.45m ,下界最小深度为 11.50m ,最大

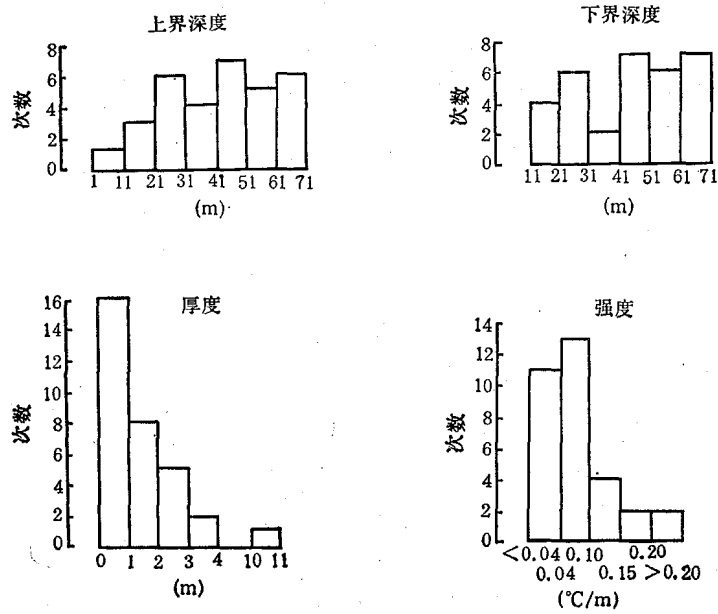


图 12 逆温梯度层各特征值直方图

为 70.75 m。如图 12。所以,同样可以认为,在该断面的近表层和近底层不出现温度逆转现象。

断面盐度微细结构 一般地说,盐度的大尺度变化远小于温度的变化,但盐度结构

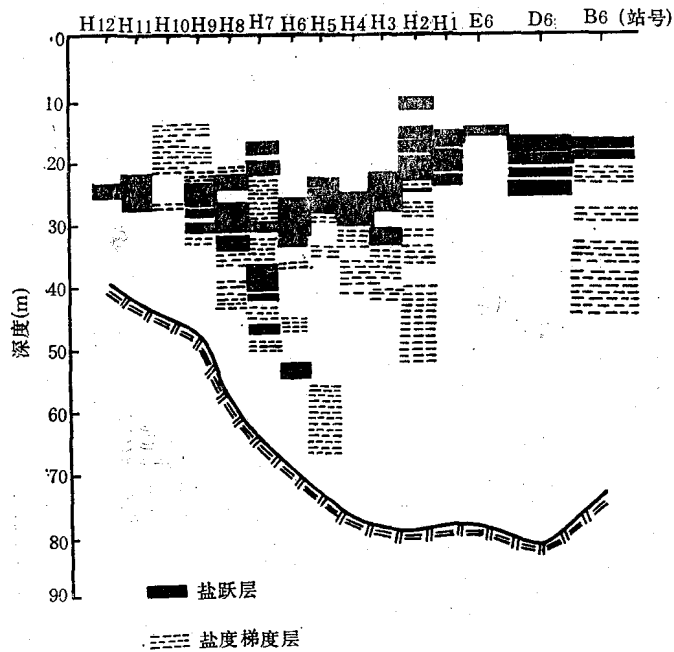


图 13 盐度梯度层断面分布

经常与温度结构相对应。盐度场的微细结构与温度场的微细结构也有所对应,但并不总是相符合。

图 13 是断面上盐度梯度层的分布。取盐度垂直梯度值 $\geq 0.02/\text{m}$ 的水层为盐度梯度层,其中梯度值 $\geq 0.10/\text{m}$ 的水层为盐跃层。

断面上共出现 76 个盐度梯度层,其中盐跃层为 45 个,约占 60%。盐度梯度层出现的个数仍以 H7 站最多,计有 12 个,其中盐跃层占半数;H2 站则出现 11 个,其中盐跃层 7 个。盐度梯度值在 $0.20/\text{m}$ 以下者占大多数;厚度值在 $0.5\text{--}1.0\text{ m}$ 范围的居多数;上界深度大都在 $20\text{--}30\text{ m}$ 范围以内,下界深度的分布则较分散。如图 14 所示。在近表层和近底层没有出现盐度梯度层。

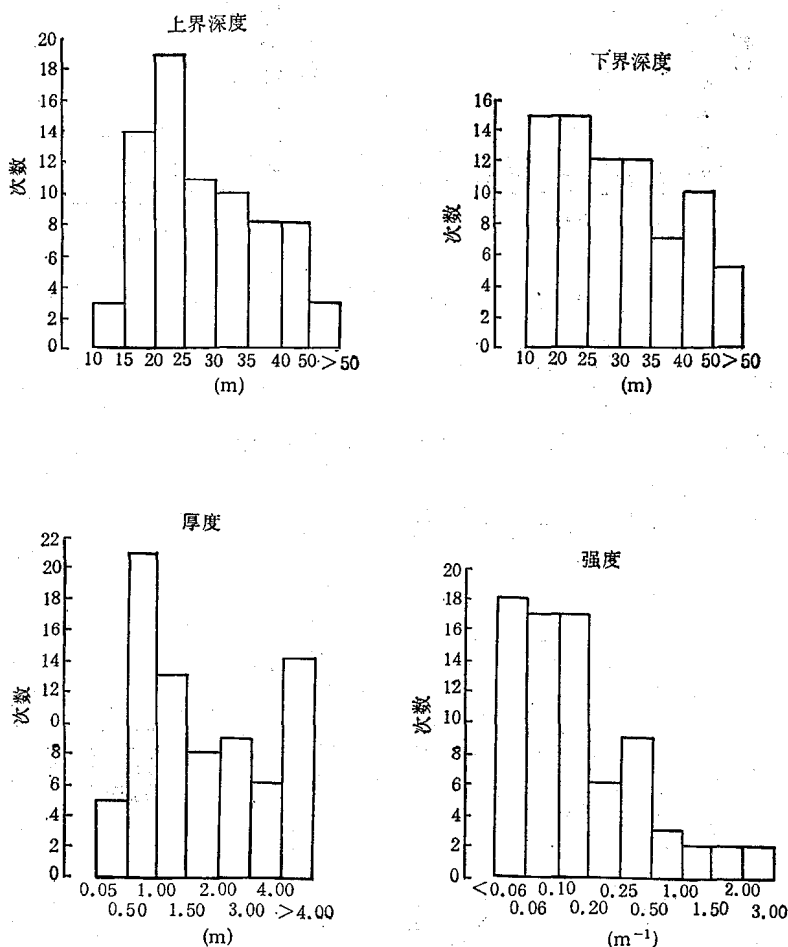


图 14 盐度梯度层各特征值直方图

盐度逆转现象也在断面多数测站上出现,图 15 是断面上逆盐梯度层的分布。负盐度梯度的取值标准与正盐度梯度相同。

断面上共出现 41 个逆盐梯度层,其中逆盐跃层为 24 个。与逆温梯度层的分布相对应,逆盐梯度层出现个数也以 H2 站最多,计有 8 个,其中逆盐跃层为 5 个;H7 站则出现

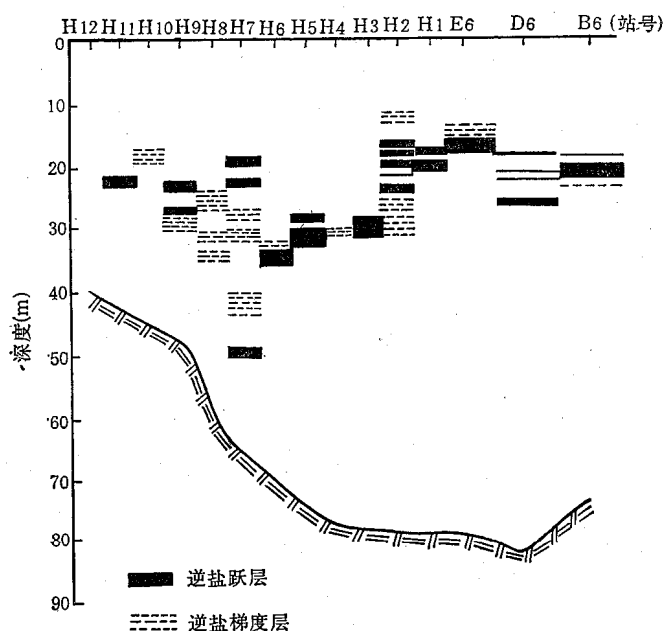


图 15 逆盐梯度层断面分布

7 个逆盐层, 其中逆盐跃层 3 个。逆盐梯度层强度值在 $0.10\text{--}0.20/\text{m}$ 范围者较多; 厚度值在 $0.5\text{--}1.0\text{ m}$ 范围的占半数; 逆盐梯度层上界深度多数在 $13\text{--}15\text{ m}$ 范围以内, 最小深度值为 12.45 m , 最大可达 50.15 m ; 下界深度值在 $20\text{--}25\text{ m}$ 范围者较多, 最小深度值为 13.80 m , 最大为 51.05 m 。如图 16 所示。断面上的近表层和近底层同样没有出现盐度逆转现象。

统计性质 表 1—8 所列是南黄海斜断面微细结构中温、盐度梯度层和逆温、盐梯度层强度、厚度和上、下界深度分布的统计学参数。它们是按下列程序进行统计学处理的 (Monin and Ozmidov, 1985), 对于 N 个数据的离散序列, 平均值 $\bar{X}$ 、均方偏差 σ 、偏斜度 S 和峭度 K 定义如下:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$S = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (5)$$

$$K = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 \quad (6)$$

其中 r 阶中心矩 $m_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^r$, $r = 2, 3, 4$ 。由表 1 可知, 温、盐度和逆温、盐度梯度层强度的平均值较大。这说明, 南黄海在 9 月下旬, 当季节性跃层处于消衰期的开始阶段时, 其温、盐度的微细结构还是比较明显的。从表 1 还可看出, 各梯度层强度分布

的 S 和 K , 差异较大, K 更为明显。温度和逆温梯度层强度分布为低峰态, 而盐度和逆盐梯度层则为高峰态。

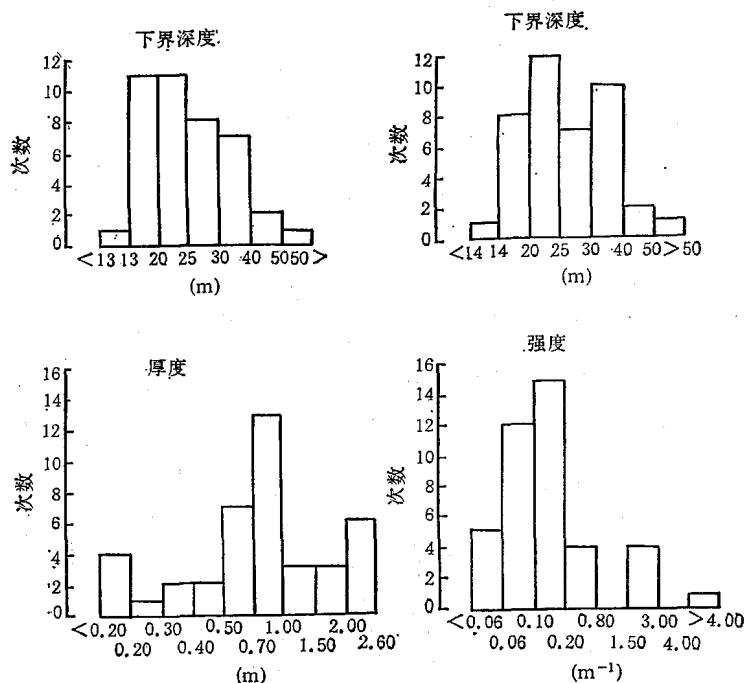


图 16 逆盐梯度层各特征值直方图
(左上角图为“上界深度”)

表 1 温、盐度梯度层和逆温、盐度梯度层强度分布统计量

统计量	$\bar{X}$	σ	S	K
温度梯度层	0.53°C/m	0.56°C/m	0.85	-0.67
逆温梯度层	0.32°C/m	1.40°C/m	-5.12	-2.72
盐度梯度层	0.29/m	0.54/m	3.44	12.05
逆盐梯度层	0.45/m	0.90/m	3.06	9.19

表 2 温、盐度梯度层和逆温、盐度梯度层厚度分布统计量

统计量	$\bar{X}$ (m)	σ (m)	S	K
温度梯度层	6.36	5.50	1.10	0.17
逆温梯度层	1.69	1.88	3.49	13.75
盐度梯度层	2.25	2.02	2.02	5.36
逆盐梯度层	1.01	0.74	0.93	-0.26

由表 2 可知, 与其他梯度层相比, 温度梯度层的平均厚度值较大, 均方偏差也较大, 其厚度分布的峰态接近于正态分布的峰值。逆温梯度层厚度分布的峰态特别尖锐, 而逆盐梯度层则为低峰态。

由表 3 可知,当季节性温跃层开始消衰时,南黄海各梯度层上、下界深度的分布特征相类似。另外,逆温梯度层上、下界平均深度均大于温度梯度层上、下界平均深度,亦即逆温梯度层平均位置在温度梯度层以深。与此相反,逆盐梯度层平均位置则在盐度梯度层以浅。

表 3 温、盐度梯度层和逆温、盐梯度层上、下界深度统计量

统计量 梯度层	$\bar{X}$ (m)	σ (m)	S	K
温度梯度层	29.30 (35.98)	12.47 (12.00)	0.77 (0.78)	-0.13 (-0.11)
逆温梯度层	41.83 (43.52)	17.77 (18.23)	-0.16 (0.35)	-1.10 (-1.14)
盐度梯度层	28.52 (30.77)	10.85 (11.45)	1.04 (1.07)	1.04 (0.82)
逆盐梯度层	25.56 (26.59)	7.79 (7.96)	1.30 (0.95)	1.27 (0.89)

注：括号内数字为下界深度统计量。

海洋中温、盐度微细结构产生的原因十分复杂,偶然的小尺度逆转现象可能起因于内波的活动,垂直混合过程和热盐对流也会产生微细结构,不同水团的相互入侵和流速的垂直剪切是形成阶梯状结构的条件。本文讨论的斜断面,在季节性跃层之下是几个不同水团盘踞、入侵和交汇的海域,流速的垂直剪切较强,所以温、盐度的微细结构较为发达。但是,海洋中,特别是陆架浅海海域,水文物理场中微细结构生成的原因还待进一步研究。

参 考 文 献

- 毛汉礼、邱道立,1964。中国近海温、盐、密度的跃层现象。全国海洋综合调查报告,第三册,第四章,1—116 页。国家科委海洋组办公室编。
- 方欣华、尤钰柱,1987。用 CTD 资料分析东海温、盐、密度垂向细结构的初步尝试。海洋学报 9(5): 537—543。
- 张存义,1986。青岛冷水团强度的划分及其多年变化的分析。海洋科学 10(3):48—51。
- 顾传宸、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。
- 崔茂常、胡敦欣,1986。盐指对流与阶梯状结构。海洋与湖沼论文集 (Supplement)。科学出版社,55—64 页。
- 蓝淑芳、顾传宸、傅秉照,1986。南黄海暖流水的温、盐度分布特征。海洋科学集刊27: 45—53。
- 周東健三、大西郷、南秀人,1976。熊野灘沖黑潮主流域の水温微細構造及び表面の水温、塩分、流速の分布。神戸海洋気象台彙報 192: 24—41 页。
- Dasaro, E. A., 1985. Upper ocean temperature structure, inertial currents, and Richardson numbers observed during strong meteorological forcing. *J. Phys. Oceanogr.* 15(7): 943—961.
- Masao Fukasawa and Yutaka Nagata, 1978. Detailed oceanic structure in the vicinity of the Shoal Kokusho-sone. *Journal of the Oceanographical Society of Japan* 34(2): 41—49.
- Monin, A. S. and R. V. Ozmidov (translation edited by H. Tennekes, 1985). *Turbulence in the Ocean*. D. Reidel Publishing Co., Holland, 247pp.
- Solomon, H., 1974. Observations of thermal microstructure in the Kuroshio off of Southern Honshu and Shikoku. *Journal of the Oceanographical Society of Japan* 30(3): 108—120.

HYDROLOGICAL CONDITION AND MICROSTRUCTURE ALONG AN OBLIQUE SECTION IN THE SOUTH YELLOW SEA*

Lan Shufang, Gu Chancheng and Fu Bingzhao

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

Observations of the temperature and salinity microstructures with Mark-III CTD micro-profiler were carried out by Institute of Oceanology, Academia Sinica in September 1985, along an oblique section through the Huanghai Cold Water Mass, the Qingdao Water Mass, and near by the Southern Huanghai Warm Current Water in the South Yellow Sea.

In this paper, hydrological conditions along the section, including temperature T , Salinity S , conditional density σ_t , Brunt-Väisälä frequency N , geostrophic current V , Richardson number Ri and so on are separately analysed according to the data obtained with Mark-III CTD.

Microstructures of temperature and salinity along the oblique section are apparent and rich. Statistic characteristics of the temperature and salinity gradient layers, including the intension, thickness, and depth of upper and lower boundary of the gradient layers are represented in histogram and discussed. In addition, statistical parameters of the gradient layers such as the mean value, the mean-square deviation, the skewness S , and the kurtosis K are also calculated and analysed.

* Contribution No. 1366 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.