

黄海冷水团锋面与潮混合*

赵保仁

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

提要 本文应用 Simpson-Hunter 提出的潮混合形成浅水陆架锋的概念, 讨论了黄海冷水团锋面及其它有关问题。用近最大潮流流速计算了黄海和东海北部的层化参量, 得到划分层化和垂直均匀区的临界层化参量为 1.8。在增温季节, 整个黄海冷水团的边界是由潮混合控制的。夏季东海北部气旋型涡旋的西边界也由潮混合所控制。海面温度资料还表明: 在强潮混合区外缘, 存在着由潮混合引起的浅水海洋锋。

黄海是一个三面环陆的半封闭陆缘海, 等深线走向大体与海岸平行, 中央部分水深较大, 但一般不超过 80m。其最重要的水文现象是: 整个暖半年, 在季节性温跃层下面存在着一个范围广阔的冷水块——黄海冷水团, 它每年冬季更新, 年复一年, 有着相近的边界位置和温盐结构。

对黄海冷水团的温盐性质、形成原因、环流特征和热结构的研究, 我国学者已做了大量工作。赫崇本等^[8]讨论了黄海冷水团的形成过程和基本性质。管秉贤^[7]讨论了黄海冷水团的水温变化和冷水团环流的基本特征。袁业立^[6]根据黄海冷水团水温结构的基本特点, 建立了一个较严格的浅海热生环流模式, 着重讨论了冷水团中心部分的热结构和环流特征, 得到了比较符合实际情况的结果。然而所有这些研究均没有涉及黄海冷水团的温、盐断面图为什么往往具有中间略向下凹陷的台状结构以及究竟是什么动力因素控制着黄海冷水团的边界位置? 本文从潮混合的观点来阐明增温季节黄海冷水团的生成过程, 从而对上述问题做了比较满意的解释。

一、潮混合产生浅水海洋锋的基本概念

关于潮混合可以产生浅水区海洋锋这一问题, 自从 Simpson 和 Hunter^[6]首次提出夏季爱尔兰海中的浅水海洋锋是由潮混合形成的结论以来, 已有不少定性的论述和报道^[9-16]。Simpson 等^[15]进一步指出, 夏季英国周围陆架海区中的浅水海洋锋是由潮混合引起的, 并较详细地研究了锋区的海洋水文性质。Garrett 等^[11]研究了芬地湾和缅因湾中潮生浅水海洋锋。Griffiths 等^[12]指出哈得逊湾等加拿大极地海区的浅水海洋锋也是由潮混合引起的。

潮混合究竟是怎样形成浅水海洋锋的呢? 如图 1a 所示, 如果只考虑风成混合, 那么由太阳辐射产生的季节性温跃层大体将呈水平分布。然而由于海洋中存在着海流与潮

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1241 号。本文承毛汉礼教授鼓励, 方国洪副教授审阅全文并提出宝贵意见, 丁文兰同志提供潮流资料, 白少英同志清绘文中插图, 特此志谢。

收稿日期: 1984 年 5 月 10 日。

流,且由于底摩擦的作用,潮流(或海流)平均运动的动能将转化成湍流而消耗。当海面受太阳辐射而使海水发生层化时,湍流应力将克服海水浮力而作功。水深越小,湍流越强,

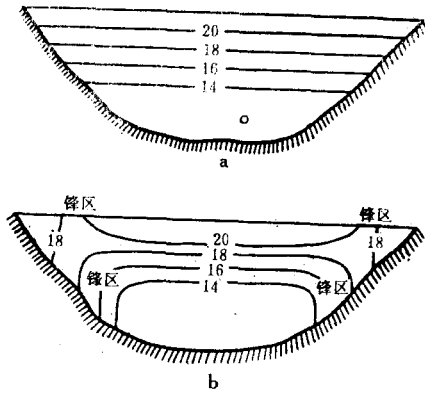


图1 潮混合形成的浅水锋面

a. 不考虑潮混合的温度分布;

b. 考虑潮混合时的温度分布

当湍流增强到一定程度时,便能完全克服因海面增温所产生的浮力,使海水上下层密度趋于一致,破坏了季节性温跃层。由于温跃层的解体,下层冷水同上层暖水混合,使近岸浅水区的水温低于外海层化区上混合层中的水温,而高于层化区的底层水温。这时等温线的走向不再呈水平扩展,而变成图1b所示的台状结构。于是在潮混合发达的近岸浅水区和潮混合较弱的远岸层化区之间,形成了等温线密集的过渡区,这就是由潮混合所产生的浅水海洋锋。

据 Simpson 和 Hunter^[46] 分析,在增温季节因潮混合引起的浅水海洋锋的位置是由垂向充分混合所增加的势能与潮流动能的消耗率之

比的特定值而确定的。如单位海面的热量输入率为 Q , 水深为 H , 则完成垂直混合所产生的势能增长率

$$B = \frac{1}{2} g\alpha QH/c_p \quad (1)$$

式中 α 为海水的热胀系数; c_p 为比热。关于潮能消耗问题,由于潮汐是由许多分潮组成的,精确计算比较困难,为简便起见,通常只考虑特征潮流速度时的能量消耗率。对振幅为 U 的正弦潮波,其动能消耗率

$$E = (4/3\pi)r\rho U^3 \quad (2)$$

式中 r 为海底摩擦系数; ρ 为海水密度。势能增长率 (B) 和动能消耗率 (E) 的比值为:

$$B/E = (3\pi/8) \cdot (g\alpha QH)/\rho c_p r U^3 \quad (3)$$

对某一特定海区, α , Q , ρ , c_p , r 均可近似地看作常数,则锋面位置由 H/U^3 的特定值(临界值)所确定,而比值 H/U^3 或

$$K = \log_{10}(H/U^3) \quad (4)$$

通常称作层化参量或混合参量。

不同的作者在计算层化参量 H/U^3 时,对 U 的取法有所不同,有的取表层大潮流速作为 $U^{[46]}$, 有的则取大潮垂直平均流速为 $U^{[47]}$, 还有的取 M_2 分潮流的振幅为 $U^{[11,13]}$ 。由于对 U 的取法不同,还由于各海区上混合层的厚度不同^[40],因此决定潮生浅水锋的位置的临界值亦不尽相同,有代表性的临界值是: $H/U^3 = 50-100\text{m}^{-2}\text{s}^3$ 或 $K = 1.7-2.0$ 。我们对黄海提出了另一种特征流速来确定层化参量 (K),用这样得出的 K 值来确定黄海冷水团的锋面位置得到了令人满意的结果。

二、黄海层化参量的计算

Beardsley 等^[9] 在讨论长江冲淡水的层化问题时,曾依据潮流的数值计算结果对黄海

和东海的层化参量 (K) 进行过计算, 但却完全没有考虑到黄海和东海潮生浅水海洋锋的有关问题。在他们的计算中, 取 M_2 分潮流的振幅为 U 。在半月潮海区, 用 M_2 分潮流的振幅作为层化参量中的 U 无疑是有一定代表意义的。但在全日潮和混合潮海区 (如渤海海峡和山东半岛北部的部分海区), 用 M_2 分潮流的振幅作为 U , 将会给 K 值的计算带来很大误差。为此, 我们采用丁文兰^[1,2] 提供的垂直平均近最大流速来计算 K 值。近最大流速是由 6 个主要分潮流 ($O_1, K_1, M_2, S_2, M_4, MS_4$) 的调和常数推算得到的, 能较好地代表本海区的大潮流速。

在本海区, 我们共计算了 221 个点的 K 值。其中 124°E 以西海区共 132 个点, 近最大流速是用实测调和常数推算的。 124°E 以东海区共 89 个点, 近最大流速则是用数值计算结果推算的。整个海区除黄海南北部的中央区域和朝鲜半岛西侧的个别海区外, K 值计算点的分布都比较均匀。因此, 本文的计算结果能较好地反映黄海的潮混合现象。

图 2 给出了层化参量 K 大于 1.4 的分布情况。由图 2 可知, 苏北外海至长江口浅滩一带, 山东半岛的青岛至威海沿岸, 渤海海峡以及朝鲜半岛西岸水域为发达的潮混合区。据此可以预期上述海区的水温将趋垂直均匀状态, 在黄海的中央区域, 潮混合较弱, 将出现显著的层化现象。在发达的潮混合区与层化区之间必然出现一个过渡带, 这便是黄海冷水团的界面。

为了确定层化参量 K 的临界值, 本文以 1979 年 6 月和 8 月黄海南部和北部底层和表层的 σ_t 值之差 $\Delta\sigma_t$ 为纵坐标, 由内插到相应点上的 $\log_{10}(H/U^3)$ 值为横坐标绘成图 3。

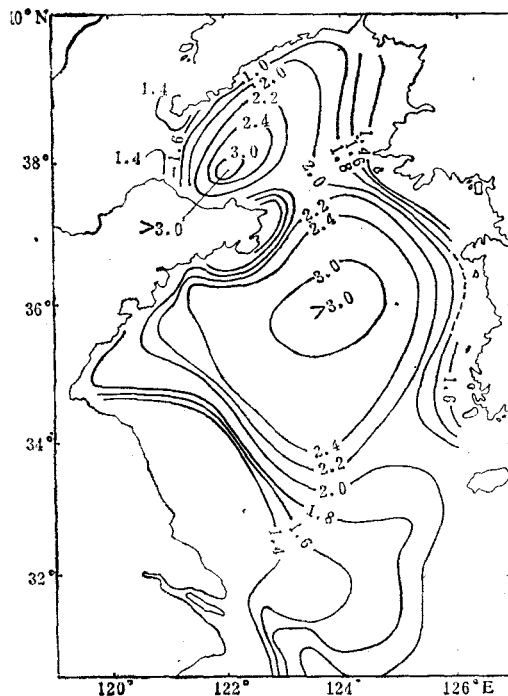


图 2 黄海层化参量 K 值的分布

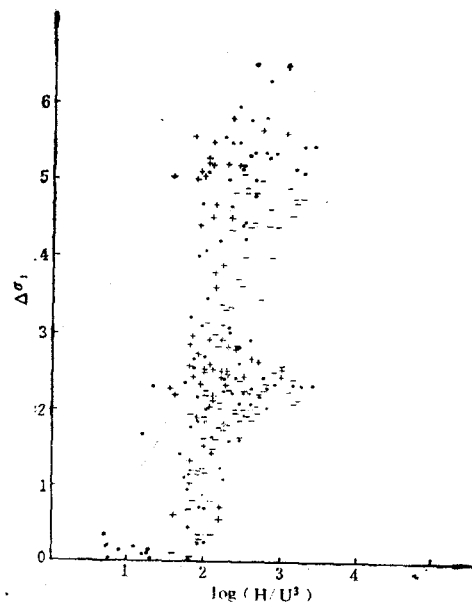
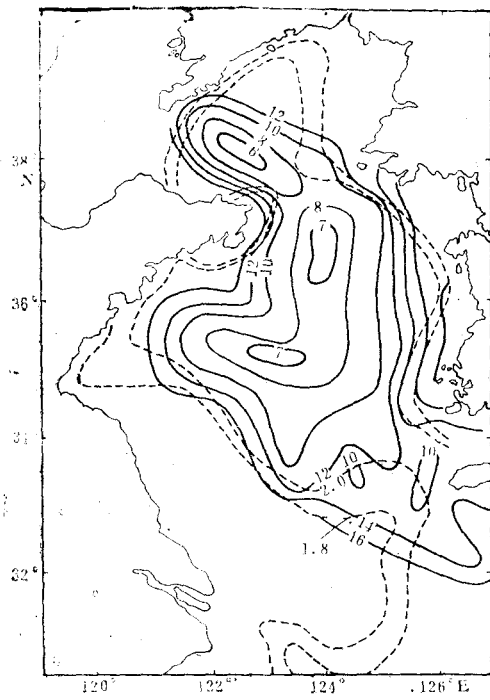
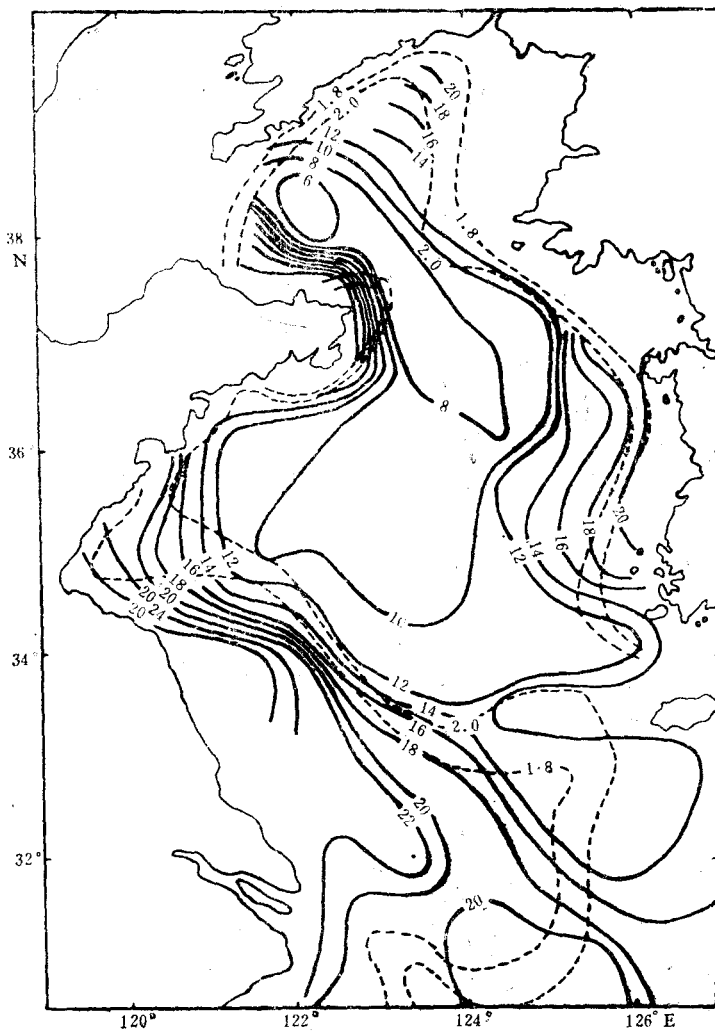


图 3 表、底层 σ_t 之差 $\Delta\sigma_t$ 与 $\log_{10}(H/U^3)$ 的关系
+ 黄海北部; • 黄海南部; - 朝鲜西岸



a



b

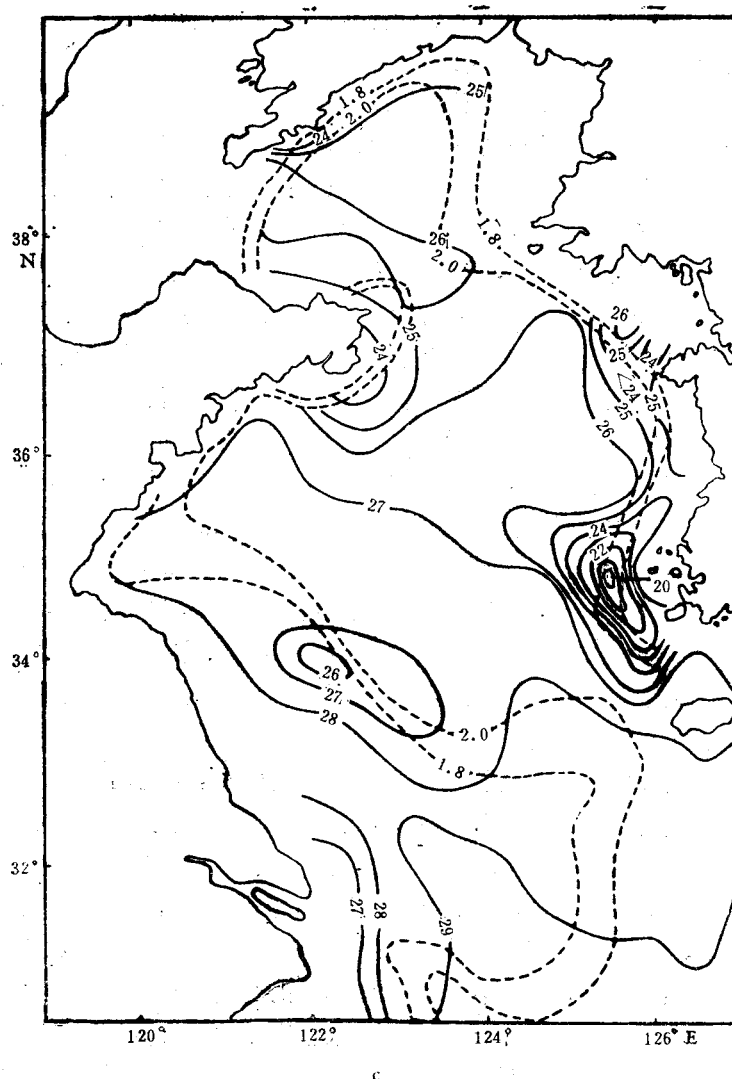


图4 黄海底层和表层的温度分布

(图中虚线为 $K = 1.8$ 和 2.0 的等值线)

a. 8 月底层水温; b. 1979 年 8 月底层水温; c. 1979 年 8 月表层水温

由图可见,绝大部分层化区的点子落在 $K = 1.8$ 的右侧。这表明,在黄海层化参量的临界值是存在的,故可以把等值线 $K = 1.8$ 作为层化区和垂直均匀区的分界线。由于锋面具有一定厚度,上述临界 K 值所在的位置通常应该是黄海冷水团外侧锋面。

三、黄海冷水团边界、浅水海洋锋与潮混合

如前所述,由潮混合产生的浅水海洋锋在表、底层同时存在。由于海底受外界的影响较小,水文条件比较稳定,因此我们先分析黄海冷水团的底层锋面位置与层化参量之间的关系。根据许多学者的研究,不同年份夏季黄海冷水团的边界位置比较固定,人们常把

10°C 或 8°C^[3,7] 等温线包括的区域作为黄海冷水团的范围, 而把 17°C 作为黄海冷水团和周围海水的边界^[4]。图 4a, b 给出表示 1979 年 8 月黄海冷水团范围的底层水温分布图¹⁾。为了与 K 值比较, 图中还以点线绘出了 $K=1.8$ 和 $K=2.0$ 的等值线。由图 4a, b 可见, 黄海底层等温线的分布趋势同图 2 给出的 K 值分布趋势是一致的, 特别在冷水团的边界区域, 等温线的走向与 K 等值线更加吻合。因此我们认为: 底层冷水团的边界是由临界层化参量控制的。从图 4a, b 还可以看出, 苏北浅滩外侧、朝鲜半岛西侧以及渤海海峡和山东半岛的东部沿海, 底层等温线特别密集, 这里也正是发达的潮混合区与层化区的过渡地带(参看图 2)。从而进一步说明潮混合确实是控制黄海冷水团边界的重要原因。

现在再分析黄海表层因潮混合产生的浅水海洋锋。由于海面的水温比较均匀, 且日变化显著, 径流对表面水温和层化现象也有一定影响, 因此在常规的海洋调查资料中, 浅水海洋锋没有底层那样明显和系统。然而在黄海潮混合剧烈的区域, 仍然可以发现它的踪迹。图 4c 给出了 1979 年 8 月黄海表层水温的水平分布。由图 4c 可见, 黄海沿岸区的水温(水深特别浅的地区除外)普遍低于黄海中心区域的水温。其中尤以山东半岛东侧、苏北浅滩外侧和朝鲜半岛西侧最为明显。在近海低温区和外海高温区之间, 明显地存在着温度水平梯度较大的过渡区, 亦即存在着海面的温度锋。与图 2 相比, 海面温度锋的位置大体也是沿 $K=1.8-2.0$ 的等值线(图 4c 中的点线)分布的。差不多所有低温区都在 $K=2.0$ 的等值线的向岸一侧。据此, 我们认为, 黄海表层的浅水海洋锋不仅存在, 而且也是由潮混合层化参量的临界值所控制的。

为了进一步阐明潮混合对黄海浅水海洋锋的控制作用, 绘制了有代表性的温度断面分布图(图 5), 并用箭头标出 $K=1.8$ 和 2.0 的位置。如图所示, 夏季黄海冷水团区域的水温断面分布都具有如图 1b 所示的台状结构, 这表明黄海冷水团边界是由潮混合控制的。图 5a 绘出了 1979 年 6 月 36°N 断面温度分布, 如图所示, 在青岛外海 120°50'E 附近, 水深 15m 以下, 存在一个垂直向下的温度锋面。在 121°05'E 附近, 水温水平梯度较大。上述等温线密集的区域, 都非常接近 $K=2.0$ 的所在位置。在断面东部朝鲜半岛一侧, 125°55'E 附近, 海面和海底都存在一个等温线密集的温度锋, 相应位置的 K 值为 2.0, 而锋区外缘的 K 值为 1.8。由图 5b 可见, 123°E 径向温度断面也具有图 1 所示的台状结构, 并且 K 值等于 1.8 附近(即 37°N, 33°20'N, 31°15'N 附近海域)海面温度偏低, 约 10m 层以下密集的等温线垂直向下。图 5c 为大连—成山角 8 月份多年平均的温度断面(引自文献[6])。从图中标出的 K 值位置可以看出, 就多年平均情况而言, 温度台状结构的边界以及海面的低温区域, 也是由临界参量 K 控制的。

总之, 黄海表、底层的水温分布和有代表性的温度断面分布说明了黄海冷水团的底层温度分布和海面的低温区是受潮混合控制的。层化参量 K 等于 1.8 和 2.0 的等值线, 大体上是沿黄海冷水团的边界位置分布的。这一结果同 Simpson, Garrett 等在研究英国周围的陆架海区和北美的芬地湾等陆架海区的海洋锋时得到的结论是一致的。

1) 图 4a 是我国学者据三十至四十年代资料绘制的(引自文献[8]), 图 4b, c 是作者据 1979 年 8 月中国和南朝鲜资料绘制的。

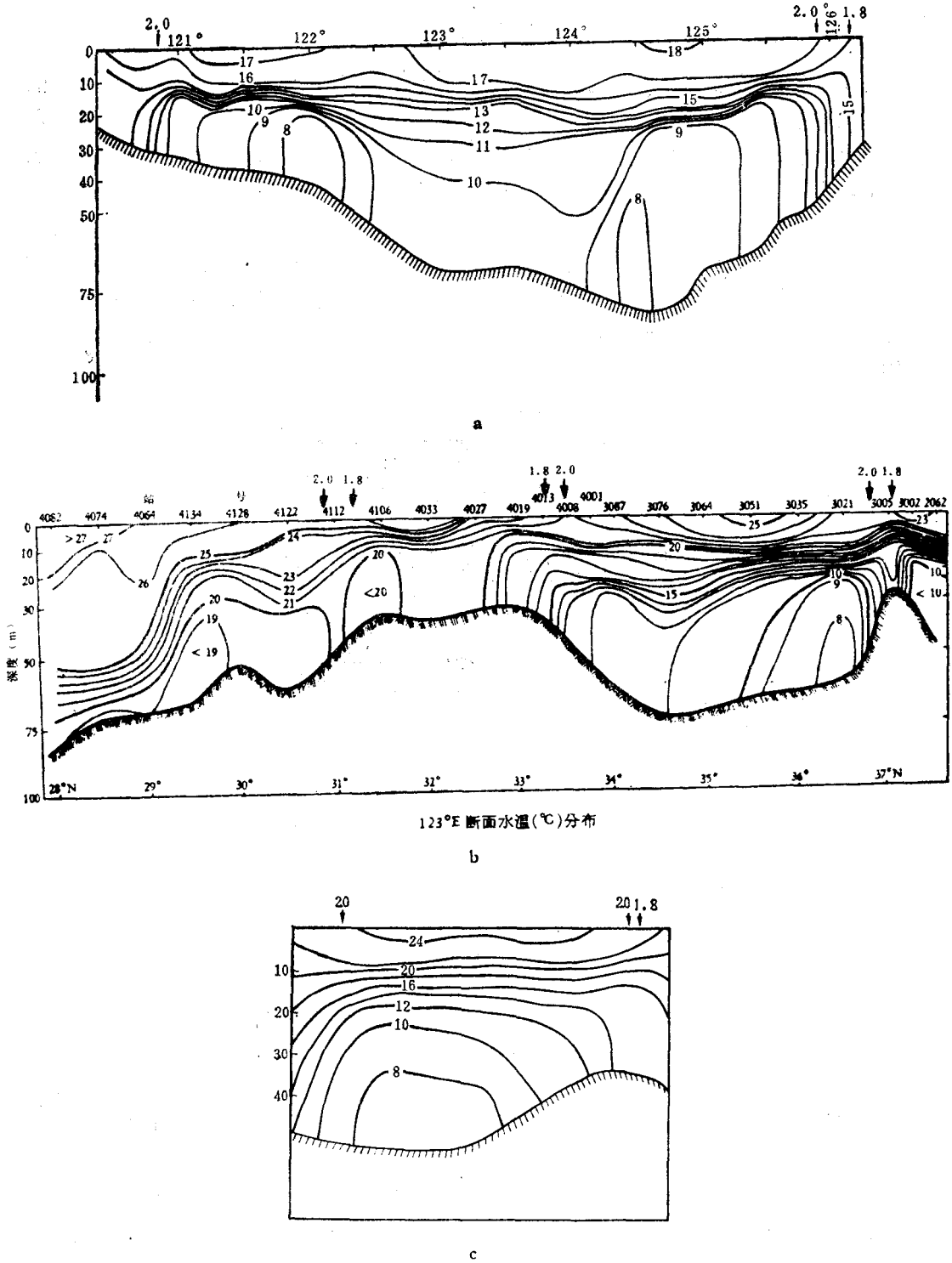


图5 冷水团区夏季温度断面分布图

a. 1979年6月36°N断面; b. 1959年7月123°E断面(引自毛汉礼等)^[4];

c. 8月大连一成山角多年平均温度断面(引自袁业立)^[6]

四、潮混合对东海北部气旋型涡旋边界的影响

研究表明,东海北部气旋型涡旋的位置比较稳定,其西边界不超过 $124^{\circ}30'E$ 以西位置。并且每年夏季均有类似的热结构^[5]。既然黄海冷水团的边界是由潮混合控制的,那么同黄海冷水团有联系的东海北部气旋型涡旋的边界是否也与潮混合现象有关呢?从图 2 可知,临界 K 值正好通过该气旋型涡旋的西边界,因此作者认为该涡旋的西边界在很大程度上也是由潮混合控制的。为进一步说明这一问题,我们引用了胡敦欣等^[5]的温度断面图(图 6),由图可见,该断面西侧的温度结构同本文图 5 中的温度断面分布极为相似。并且海面的低温区和海底等温线密集的锋区位置都由临界 K 值所控制。 $31^{\circ}N$ 断面也有着类似温度分布。以上事实表明,气旋型涡旋西边界在很大程度上是由潮混合控制的。

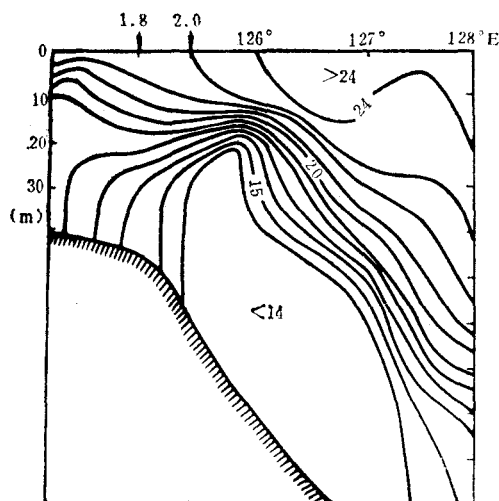


图 6 $32^{\circ}N$ 断面 1972 年 7—8 月温度分布
(引自胡敦欣等^[5])

五、结 语

本文用近最大潮流流速计算了表示黄海和东海北部潮混合强弱的 Simpson-hunter 层化参量 $K = \log_{10}(H/U^3)$ 。结果表明,苏北浅滩和长江大沙堆区,山东半岛东部沿海、渤海海峡以及整个朝鲜半岛西部沿海为强潮混合区。计算层化参量 K 时,用近最大潮流流速作为特征流速明显优于用 M_2 分潮流的振幅作为特征流速。根据 1979 年 6 月和 8 月的密度资料,得到本海区层化参量的临界值为 1.8。由底层水温的平面分布和几个有代表性断面的水文分布可知,黄海冷水团区域的水温分布与潮混合的强弱有关,底层黄海冷水团的边界即锋面是由临界层化参量控制的。 $K = 1.8-2.0$ 层化参量等值线走向同整个底层黄海冷水团的边界基本一致,从而表明海面增温和沿岸区域的强潮混合作用是黄海冷水团形成的基本热力-动力因素。计算还表明,夏季东海北部的气旋型涡旋西边界也是由潮混合所控制的。由表层水温的平面分布和断面水温分布可知,在上述强潮混合区,海面

的浅水海洋温度锋是明显存在的, 用卫星照片精确确定海面温度锋的位置及在锋面区域布设密集的海洋水文测站详细了解锋区的水文结构将是非常有意义的。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 丁文兰. 渤海和黄海潮汐潮流分布的基本特征. 海洋科学集刊第 25 集(在排印中).
- [3] 毛汉礼、任允武、万国铭, 1964. 应用 $T-S$ 关系定量地分析浅海水团的初步研究. 海洋与湖沼 **6**(1): 1—22.
- [4] 毛汉礼、任允武、孙国栋, 1964. 南黄海和东海北部 (28° — 37° 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.
- [5] 胡敦欣、丁宗信、熊庆成, 1984. 东海北部一个夏季气旋型涡旋的初步分析. 海洋科学集刊 **21**: 87—100.
- [6] 袁业立, 1979. 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.
- [7] 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.
- [8] 赫崇本、汪圆祥、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.
- [9] Beardsley, R. C., R. Limeburner, Hu Dunxin et al., 1983. Structure of the Changjiang River plume in the East China Sea during June 1980. Proceedings of international symposium on sedimentation on the continental shelf, with special reference to the East China Sea. China Ocean Press, pp. 265—284.
- [10] Fearnhead, P. G., 1975. On the formation of fronds by tidal mixing around the British Islands. *Deep-Sea Res.* **22**(5): 311—322.
- [11] Garrett, C. J. R., J. R. Keeley and D. A. Greenberg, 1978. Tidal mixing versus thermal stratification in Bay of Fundy and Gulf of Maine. *Atmosphere-Ocean* **16**(4): 403—423.
- [12] Griffiths, D. K., R. D. Pingree and M. Sinclair, 1981. Summer tidal fronts in the near-arctic regions of Foxe Basin and Hudson Bay. *Deep-Sea Res.* **28**(8): 865—873.
- [13] Pingree, R. D., and D. K. Griffiths, 1978. Tidal fronts on the shelf seas around the British Islands. *J. Geophys. Res. (Oceans and Atmospheres)*. **83**(C9): 4615—4622.
- [14] Simpson, J. H., 1976. A boundary front in the summer region of the Celtic Sea. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* **4**(1): 71—81.
- [15] Simpson, J. H., C. M. Allen and C. G. Morris. 1978. Fronts on the continental shelf. *J. Geophys. Res. (Oceans and Atmospheres)* **83**(C9): 4607—4614.
- [16] Simpson, J. H. and J. R. Hunter, 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature* **250**: 404—406.
- [17] Simpson, J. H., D. G. Hughes and N. C. G. Morris, 1977. The relation of seasonal stratification to tidal mixing on the continental shelf. In: A Voyage of Discovery (ed. M. Angel), Suppl. to *Deep-Sea Res.* pp. 327—340.

THE FRONTS OF THE HUANGHAI SEA COLD WATER MASS INDUCED BY TIDAL MIXING*

Zhao Baoren

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

Since Simpson and Hunter proposed the idea that shallow water fronts were induced by tidal mixing in 1974, many authors have investigated the tidal induced shallow water fronts in various areas. It was generally assumed that a critical value of the stratified parameter $K = \log_{10}(H/U^3)$ may be used to identify the location of these fronts. Here, H means the depth of sea water, U denotes the characteristic velocity of tidal current, and the critical value of K is generally taken as 1.8—2.0.

In this paper, Simpson-Hunter's stratified parameter K was calculated by using quasi-maximum current velocity (which consists of the six main tidal constituents, i.e. M_2 , S_2 , O_1 , K_1 , M_4 and MS_4) in Huanghai Sea (Yellow Sea) and in the northern East China Sea as well. Calculated results show that the areas of the Subei (the northern part of Jiangsu) Shoal, off the mouth area of Changjiang River, along the coast of Shandong Peninsula and along the western coast of Korea, the tidal mixing is strong. Calculations also show that along the whole boundary of HCWM and also along the western boundary of the cyclonic eddy in northern East China Sea, i.e. along the fronts, the value of K is found to be very close to the critical value 1.8. It is also to be noted that at these locations, the temperature of surface water is very low. These clearly show that shallow water fronts in Huanghai Sea and in the northern East China Sea as well, are induced by tidal mixing.

*Contribution No. 1241 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.