

浙江沿岸上升流区的锋面 结构、变化及其原因

潘玉球 徐端蓉 许建平

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

摘 要

本文应用1980—1981年的上升流专题调查资料及有关历史资料讨论了浙江沿岸上升流区的锋面结构特征、混合状况、位置变动的特点及其原因。本文认为, 浙江沿岸锋和上升流锋的位置变动大致可归因于台湾暖流强度和位置的变动, 风也是一个重要因素。浙江沿岸的上升流还受到浙江近海海底地形特征和台湾暖流的影响。Janowitz等提出的地形引起的上升流理论可以应用于浙江近海。

浙江沿岸存在上升流是毋庸置疑的, 前人已多次作了论证^[1-3]。但对它的形成机制目前说法不一, 尚需深入探讨。

浙江近海的夏半年常存在两种性质不同的锋——沿岸锋和上升流锋。这两种锋的位置、强度及其变化的原因水产部门极为关心。从物理海洋学角度看, 这两种锋的形成尽管有本质上的差异, 但它们都受到浙江近海下层水涌升的影响, 因此讨论它们之间的关系对渔业生产有重要意义。本文利用国家海洋局第二海洋研究所在1980—1981年期间获得的多航次上升流专题调查资料和历史资料讨论两种锋的变动规律, 另外探讨地形和台湾暖流对上升流锋层高度分布和变化的影响。具体研究海区见图1。

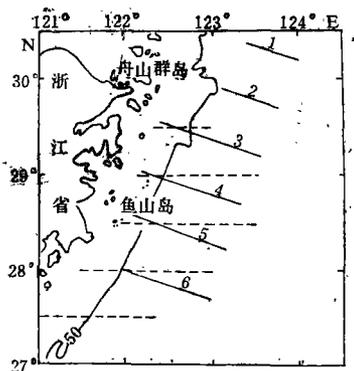


图1 观测断面分布图

——1981年6、8、10月的站位
----1980年7、8月的站位

一、浙江近海的基本水文状况

浙江近海的水团在夏半年有三个,冬半年有两个。在4—10月研究海区可出现浙江沿岸水团(C)、台湾暖流上层水团(M)和台湾暖流深层水团(K)。台湾暖流深层水团4月呈现,7、8月强度较大,10月退缩,11月以后消失^[4]。在11月至翌年3月,浙江近海仅存在浙江沿岸水团和台湾暖流上层水团(见图2、图3)。

三个水团的温盐特征是:浙江沿岸水团主要特征是低盐(盐度低于29),温度四季有别。它主要由江苏、浙江沿海所有入海河流(主要是长江)的冲淡水组成。台湾暖流上层水团的主要特征是高温高盐,其盐度值介于33—34之间。温度有季节变化,但由于它由台湾暖流带入,这一水团的温度年变幅比浙江沿岸水团小。在夏季,台湾暖流上层水团中常有季节性跃层存在。台湾暖流深层水除具高盐特征(盐度略比台湾暖流上层水高)外,还具低温特征,其核心温盐值一般为 $t=17-19^{\circ}\text{C}$, $S=34.5$ 。台湾暖流深层水团可能源自台湾东侧黑潮次表层水^[4],它常与台湾暖流上层水团形成界面跃层。

研究海区有两个支流,一支是台湾暖流,另一支是东海沿岸流。台湾暖流是浙江近海海流的主干,位于东海沿岸流的东侧。台湾暖流终年向北流,流轴位置在夏半年由西南流向东北,冬半年流轴稍靠岸有向东北偏北方向流的趋势。流速夏强冬弱,流幅夏宽冬窄。台湾暖流冬夏的一般流速为 $15-40$ 厘米/秒^[1]。东海沿岸流位于浙江沿岸,流向经常自北向南,平均流速为 10 厘米/秒左右^[6]。

浙江近海的沿岸锋分布位置可从图2和图3看到,它位于近岸,是浙江沿岸水团和台湾暖流上层水团之间的界面,锋面倾斜方向与近岸斜坡方向相反,渔民称它为“流隔”,它的盐度水平梯度极大。上升流锋位于沿岸锋的外下侧,锋面倾斜方向与斜坡倾斜方向一致。此锋是在上层海水辐散,台湾暖流深层水涌升情况下,密度跃层向岸上倾而形成的。上升流锋主要是由台湾暖流上层水和深层水之间的界面构成,以温度锋的形式呈现。它的分布位置见图2。

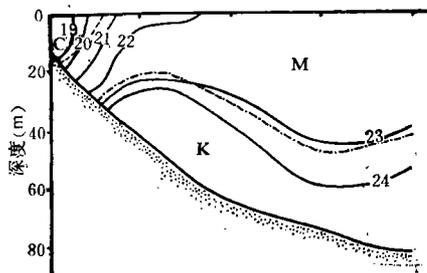


图2 浙江近海夏季水团的断面分布

——等密度线 ——31等盐度线 - - - - 24°C等温度线

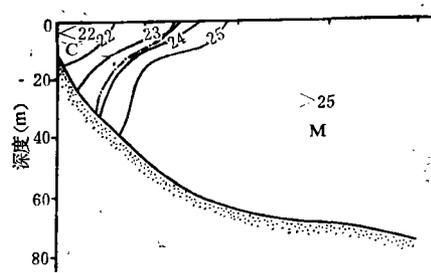


图3 浙江近海冬季水团的断面分布

——等密度线 ——31等盐度线

1) 管秉贤, 陈上及, 中国近海的海流系统, 1964.

二、浙江沿岸上升流锋与沿岸锋的分布特征和变化

从上升流锋层的结构看，研究海区的上升流锋有明显的双锋层构造（见图4），其南北向分布特征是，上锋层（反映季节性跃层）在各断面上抬升高度大致相似，但下锋层（反映水团之间的界面跃层）是自南向北逐渐增高，到北纬 29° 附近达最高且与上锋层合而为一，再向北，下锋层高度稍有下降，且与上锋层稍有分离。下锋层的这种南北向分布特征，我们认为与浙江近海的海底地形特点有关，下面将给予阐明。

上升流锋的水平位置可见图5和图6。由图可见，在1980年7月浙江沿岸20米水层的上升流锋呈条带形沿近岸斜坡展开，在1981年8月，浙江沿岸20米水层的冷中心，即冷水抬升最高处已外移到北纬 29° 、东经 $122^{\circ}45'$ ，锋带围绕它从西南向东北伸展。这两次的观测结果分别是在偏西南风（风速 >6 米/秒）和东北风（风速为 $6-8$ 米/秒）情况下获得的，这一情况表明，浙江沿岸上升流锋的分布受风的影响。

这里不准备列出1981年6月和10月上升流锋的水平分布图，原因是测站稀少。但从图7和图9可知，此期上升流锋可以在25米层以下呈现，走向与图5和图6相似。

上升流锋层高度的月际变动特点是，6月偏低，7—8月最高，10月又降低。其厚度，各航次的调查结果表明变化不大。各月上升流锋层横向分布的总特点是，近岸抬升最高，且随着离岸距离的增加下倾，厚度渐增，一直到70米深度为止（见图7—9）。值得注意的

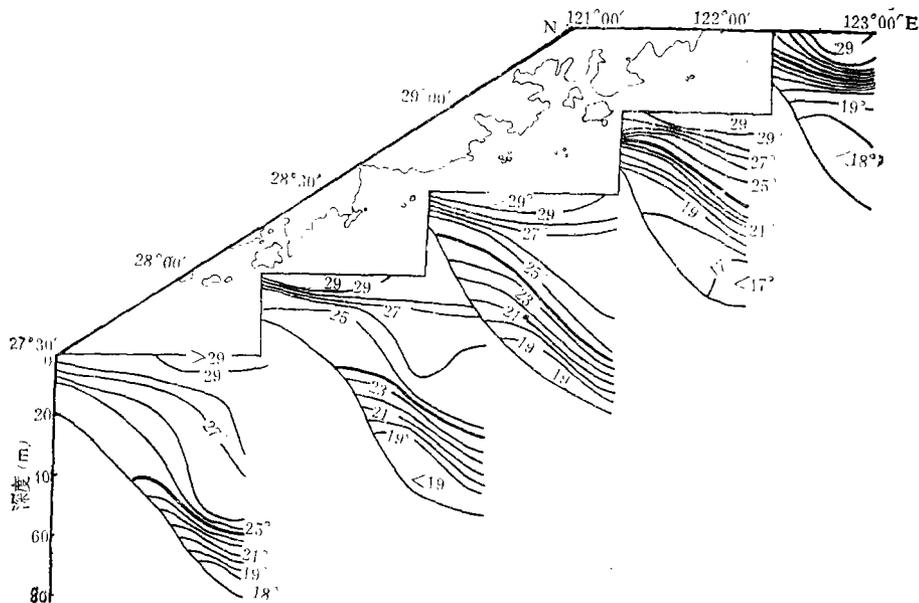


图4 1980年7月22—25日， $27^{\circ}30'$ — $29^{\circ}30'$ N的温度断面分布

粗实线代表 24° 等温线

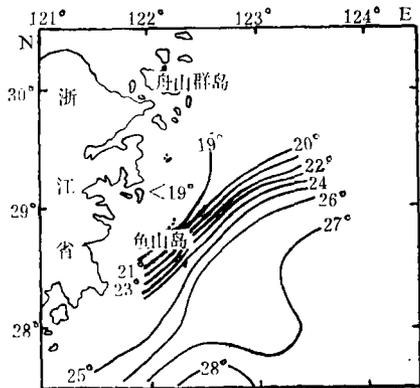


图5 1980年7月22—25日20米层温度分布

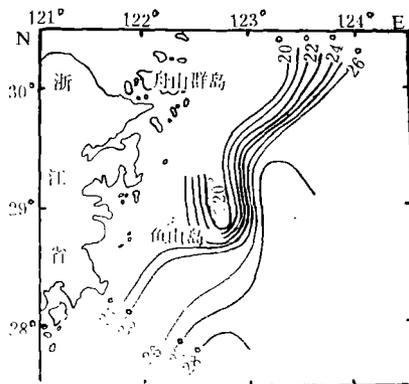
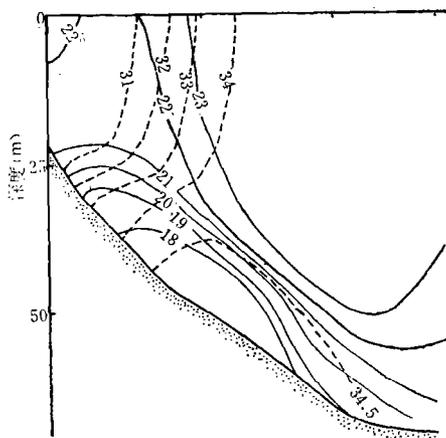
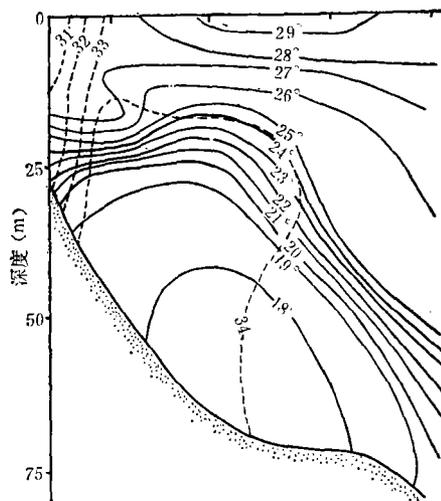


图6 1981年8月5—8日20米层温度分布

是, 研究海区的上升流锋层一般不与海面相交, 这可能是因为沿岸锋在其前部, 层化加强, 使台湾暖流深层水涌升不到海面之故。

沿岸锋的结构从图7—9可以清楚地看到, 此锋位于4号断面的近岸侧, 29—34等盐线非常密集。在横断面上锋面形状大多呈S形, 台湾暖流上层高盐水楔入浙江沿岸水的下部。此锋的位置从图7—9可见, 6月向东扩展较远, 但到7—8月贴岸分布, 到10月离岸距离比6月更大, 强度也比6月大。

关于沿岸锋的平面分布特点, 本文仅以1980年7月和1981年8月的表层盐度分布图说明。由图10可知, 1980年7月研究海区的沿岸锋以高盐舌锋的形式呈现, 舌锋自南向北伸

图7 1981年6月17日4号断面温度和盐度分布
虚线是等盐线 实线是等温线图8 1981年8月12日4号断面温度和盐度分布
虚线是等盐线 实线是等温线

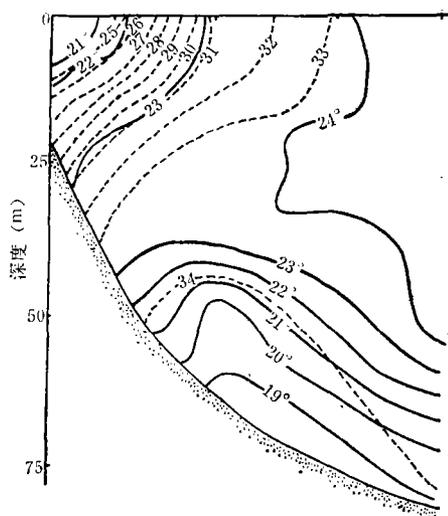


图9 1981年10月17日4号断面温度和盐度分布
虚线是等盐线 实线是等温线

展，舌锋位置处在北纬 $28^{\circ}40'$ — $29^{\circ}40'$ ，东经 122° — 123° 之间，舌锋宽大，位置偏南。在北纬 $28^{\circ}30'$ 以南沿岸锋不出现。在其南部海区全被台湾暖流上层水占据，在其北部被浙江沿岸水占据。

在1981年8月浙江沿岸锋的分布状况就很不相同，由图11可知，此期盐度锋略呈弧形自北纬 $28^{\circ}30'$ ，东经 122° 向北纬 30° ，东经 123° 延伸。南段靠岸，北段离岸较远。这一特征显示出，此期浙江沿岸水团的主体位于杭州湾口，台湾暖流上层水向北伸展较远，且位于沿岸锋的右侧。这一时期沿岸锋的最大特点是高盐舌锋在调查海区没有出现。这两例的风况与图5和图6的风况相同。以上事例表明，不同的风况也影响台湾暖流的流形和高盐舌锋的强度和位置。

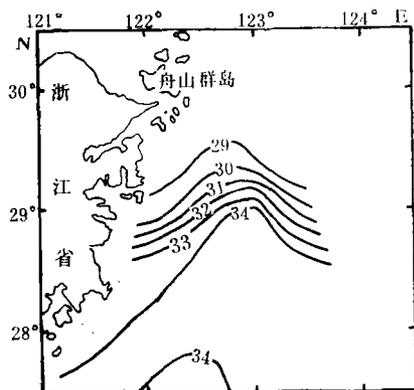


图10 1980年7月22—25日表层盐度平面分布

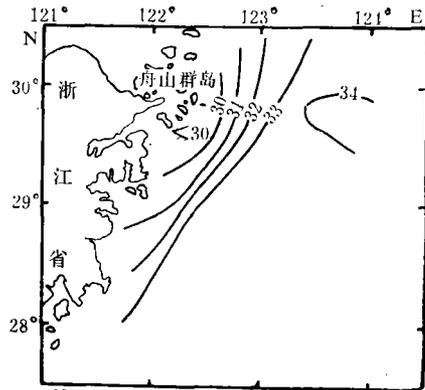


图11 1981年8月5—8日表层盐度平面分布

历史资料表明,浙江沿岸锋在北纬 $29^{\circ}30'$ 以北经常出现高盐舌锋,它是台湾暖流上层水楔入浙江沿岸水团形成的。高盐舌锋的锐度决定于台湾暖流上层水的楔入强度。

关于浙江沿岸上升流区的海流结构由图12—14可以看出,锋面附近的海流与地转流向极为一致。在沿岸锋的两侧,海流存在明显的水平切变,沿岸流有南流的特点,外海台湾暖流有北-东北流的特点。1981年8月沿岸流速较小,10月沿岸流速明显增大,似与浙江沿岸水的向南扩展范围和强度一致;在沿岸锋的外海侧,由图可见,6月研究海区的流动方向为北向(表层为东北向),流速较小,平均流速为9厘米/秒。在8月,上层海流离岸,最大流速达40厘米/秒,下层流速减小,并有向岸爬坡的分量,显现上层海水有离岸辐散的特点,下层海水有向岸补偿的特点。在10月,中层的离岸流有一定强度,下层海流仍有向岸分量。10月的海流平均速度为18厘米/秒,与8月相比已明显减小。所有这些情况表明,浙江沿岸上升流锋的向岸抬升均与上层海水的离岸辐散,下层海水的向上涌升分不开。上层海水的离岸辐散量愈大,上升流锋层的抬升高度愈大;上层海水的离岸辐散量减小,上升流锋层的抬升高度也减小。至于这种上层海水的离岸辐散量强度,根据观测结果可以认为它主要取决于台湾暖流流轴的指向和流速。事实上,从图12—14看,台湾暖流轴左

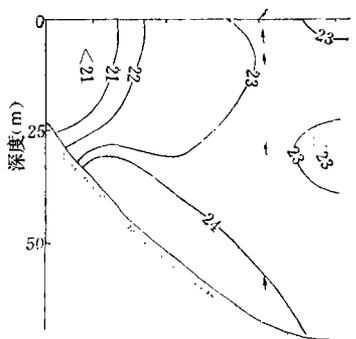


图12 1981年6月4号断面的 σ_t 和水平流矢量的垂直分布

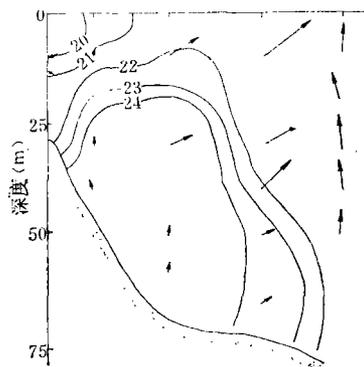


图13 1981年8月4号断面的 σ_t 和水平流矢量的垂直分布

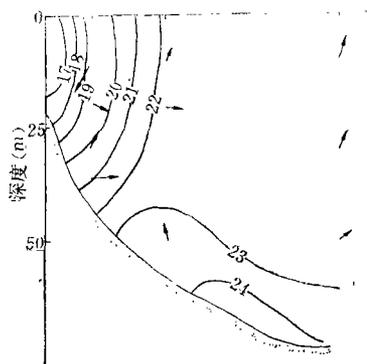


图14 1981年10月4号断面的 σ_t 和水平流矢量的垂直分布

侧流动在6月、8月和10月分别具有北-东北偏北、东北和东北偏北方向的流动特点，流速是6月较小，8月最大，10月又减小，揭示了上层海水离岸辐散量与6月、8月和10月上升流锋层抬升高度的一致性。

此外，台湾暖流有沿等深线流动的特点，6月、8月和10月的上层海流平面分布揭示了这一现象，从而也证实了文献〔5〕提出的见解。

三、三个水团交接区的混合状况

这里所说的三个水团交接区实际上指的是沿岸锋和上升流锋的邻接区。分析将主要依据温-盐点聚图，静力和动力稳定度。研究断面选位于北纬 29° 附近的4号断面。

(一) t - S 点聚图

图15—17是1981年6月、8月和10月三个航次所获得的结果。这三幅图所反映的浙江近

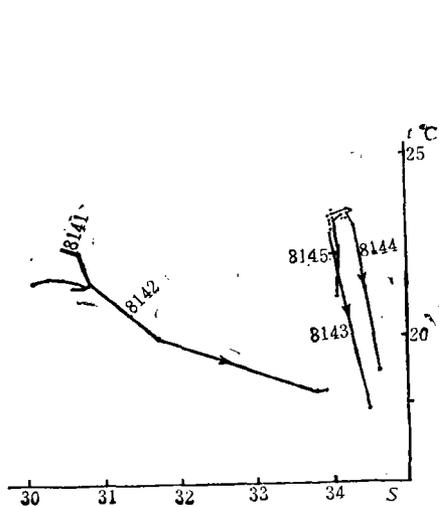


图15 1981年6月17日4号断面的 t - S 点聚图

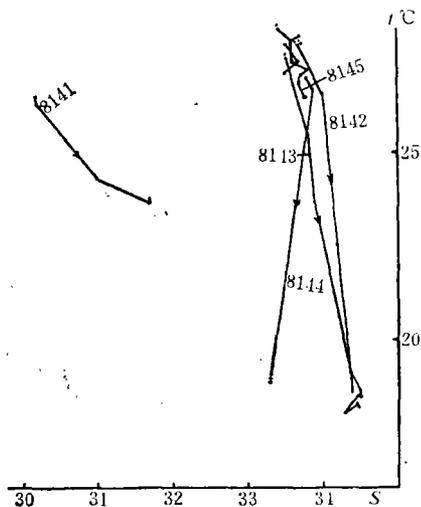


图16 1981年8月7日4号断面的 t - S 点聚图

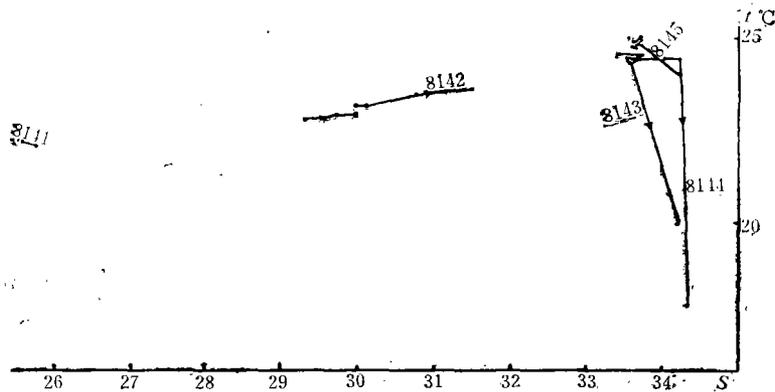


图17 1981年10月11日4号断面的 t - S 的点聚图

海三个水团之间混合的基本特点是：在浙江沿岸水团和台湾暖流上层水团之间界面上的混合以侧向混合为主，而在台湾暖流上层水和深层水团之间，此区域的混合以垂直混合为主。在6月和8月的近岸段，该区的侧向混合比较明显，在10月侧向混合显著。就垂直混合而言，在6月垂直混合仅出现在远岸段，到8月这一现象扩展到近岸段，10月又退到远岸段，揭示出研究断面的垂直混合随着上升流的向岸推进而扩展的特点；侧向混合随着深层水涌升强度的衰退而逐渐向外海扩展。

(二) 垂直稳定度

我们计算了研究海区的垂直稳定度。结果表明，研究海区的垂直稳定度月变化特点是：冬季为零，春季渐增，夏季最大，秋季又复减小。

垂直稳定度在横断面上的分布特点从图12—14看，上升流锋层上的垂直稳定度一般要大于沿岸锋上的垂直稳定度。就上升流锋层上的垂直稳定度分布而言，沿岸锋外侧附近的上升流锋层垂直稳定度（条件密度等值线水平分布段）总是比其两侧大，这一现象似乎表明，该区的上升流锋层可能会构成一个上下层水体交换的屏障，另外它可能要加强沿岸锋区中侧向混合的发展²⁾。关于此区稳定度偏大的原因，分析所得的认识是由于此区深层水的涌升速度比斜坡外侧海区的大^[2]。

(三) Richardson数 (R_i) 的估算结果

Richardson数的计算公式²⁾是

$$R_i = g \frac{\partial \rho}{\partial z} / \rho \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2$$

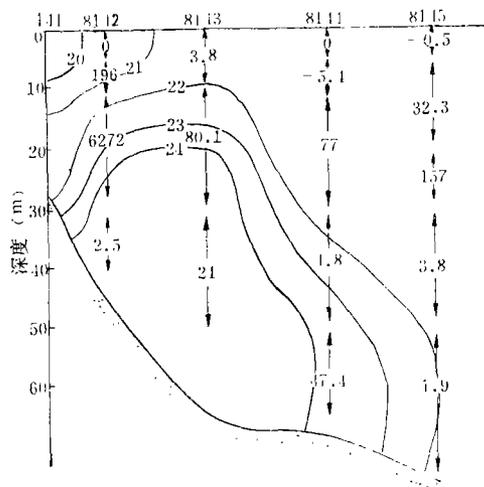


图18 1981年8月4号断面 R_i 分布

实线是等条件密度线，箭尾间的数值表示观测层间的 R_i 值

2) 中尾彻著，王元培、邹娥梅译，贵东海洋环境变化与渔业的关系。

式中, g 为重力加速度, ρ 为平均密度, U 为水平流速度, z 轴垂直向下. 图18是计算结果. 由图18可以看出, 8142—8143站之间的 R_i 值极大, 8143—8145站之间 R_i 值骤然减小, 这一情况表明, 在8142—8143站之间的上升流锋层是高度动力稳定的, 而在8143—8145站, 这一区域的动力稳定度不大. 联系到上述的静力稳定度分布, 由上计算结果似乎可以得到, 上升流锋以下的水体尽管有较大的涌升速度, 但一般难以穿过上升流锋层进入沿岸锋区. 因为在8142—8143站之间, 这一水层不仅有较大的静力稳定度, 而且还具有极大的动力稳定度. 这一结论可由低温、高盐、高磷和低氧的台湾暖流深层水没有渗入沿岸锋区的观测结果得到证实.

四、浙江沿岸上升流区锋面发生变动的的原因

根据历史资料分析, 沿岸锋(包括它的舌锋部分)发生变动的的原因主要依赖于台湾暖流轴和风. 一般来说, 台湾暖流轴窄小且靠岸时沿岸锋强度增大, 鱼群集中; 暖流轴宽大且自南向北逐渐离岸时, 沿岸锋强度减小, 鱼群分散. 长时间的东-东北风可以促使浙江沿岸水沿岸向南延伸, 暖流轴宽度变小且稍向岸靠近, 沿岸锋强度增大; 长时间的西-西南风可导致浙江沿岸水向北退缩, 暖流轴宽度增大并离岸, 沿岸锋强度减小. 至于高盐舌锋的形成和进退则取决于台湾暖流的势力和流轴的强度: 台湾暖流强度大, 北进较远; 反之, 则南退. 风的作用一般都会促进高盐舌锋作横向移动, 尤其是北纬 $29^{\circ}30'$ 以北, 由于此区海底较为平坦, 舌锋横向变动大.

浙江沿岸上升流锋层高度发生变动的的原因需从该区上升流的形成说起, 因为上升流锋层向岸上倾归根结底归因于台湾暖流深层水的涌升. 但对台湾暖流深层水的涌升机制来说目前说法不一致, 有的认为风是主要的, 有的认为黑潮北上余脉沿东海陆架海底爬升是主要的. 本文根据历史的和国家海洋局第二海洋研究所上升流调查的实际观测结果认为, 台湾暖流和浙中近海的海底等深线发散也是一个重要因子. 因为在不利风(东-东北风)条件下此区台湾暖流深层水仍有涌升的迹象)见图13和图14以及北纬 29° 断面的1977年6月、1978年6月国家海洋局断面观测资料); 另外是冬季的海流观测资料(1982年底)表明, 即使是盛行东北风的条件下, 该区的底层流仍有向岸爬坡的分量.

本文提出这一观点的理论依据是Janowitz等提出的地形上升流理论⁽⁶⁾. 这一理论认为, 沿等深线的具有弱切变流性质的边界海流在斜度变化的陆坡上流动时(罗斯贝数 $R_0 = \frac{V_m}{fL} \ll 1$, 其中 V_m 为特征速度, f 为科氏参数, L 为水平长度尺度), 产生的上升流可用下式表示

$$W_1(x, y, -h) = -\frac{h}{f} \left(\frac{V_m}{a} \right)^2 \left| \nabla h \right| \frac{\partial}{\partial S} \nabla^2 h,$$

其中

$$\frac{\partial}{\partial S} \nabla^2 h = \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial n^2} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial h}{\partial n} \frac{\partial r}{\partial S} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial S} \frac{\partial h}{\partial n}.$$

当等深线的曲率半径很大时(浙中近海是属此情况)

$$\frac{\partial}{\partial S} \nabla^2 h = \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial n^2} \right).$$

式中, W_1 是垂直向上速度, V_u 、 α 为边界海流的上游速度和等深线的斜度, $|\nabla h|$ 为下游等深线斜度的绝对值, r 为曲率半径.

此式指出, 地形引起的上升流速度与边界海流的速度和上、下游的地形斜度变化有关.

根据上面的公式及台湾暖流的最大流速和最小可能流速以及研究海区的等深线分布特征 (计算海区见图19), 我们计算了研究海区台湾暖流深层水的涌升速度, 得到的值是, 在台湾暖流速度为40厘米/秒时, 深层水涌升的速度为 6×10^{-3} 厘米/秒; 在台湾暖流速度为10厘米/秒时, 深层水涌升的速度为 4×10^{-4} 厘米/秒 (见表1).

这一结果指出, 在浙江沿岸海域由台湾暖流和海底等深线发散引起的深层水涌升速度有较大的量级. 本文也估算了风生升降流的速度值, 发现它们量级相当, 其值为 5×10^{-3}

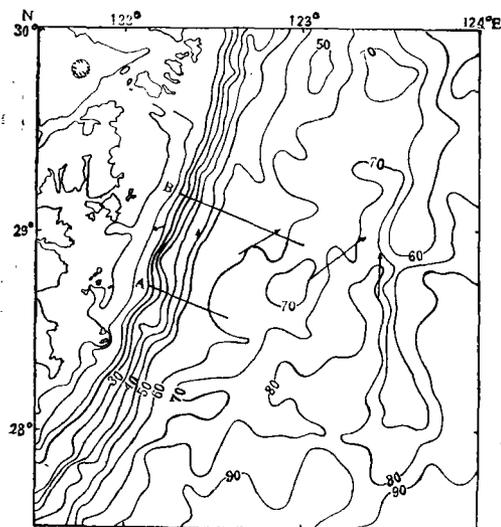


图19 浙江近海海底地形和台湾暖流的流动特征

表1 北纬 $28^{\circ}40'$ — $29^{\circ}10'$, 60米等深线以西的垂直速度

α	V_u (cm/s)	f (1/s)	h (cm)	$ \nabla h $	$\frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial n^2} \right) = \frac{\left(\frac{\partial^2 h}{\partial n^2} \right)_B - \left(\frac{\partial^2 h}{\partial n^2} \right)_A}{\Delta S}$ (1/cm ²)	w_{-h} (cm/s)
1×10^{-3}	40	7×10^{-5}	45×10^2	6×10^{-4}	-1×10^{-16}	6×10^{-3}
	10					4×10^{-4}

$R_0 = 0.05$ 其中 $V_M = 40$ cm/s, $f = 7 \times 10^{-5}$ /s, $L = 100$ km

-4×10^{-1} 厘米/秒。因此据上结果我们认为，地形和风对浙江近海的沿岸上升流有几乎相同量级的贡献，所以除了风力以外，必须重视地形和台湾暖流的作用。至于上面所述的观测现象可被认为，在一定的组合条件下，如地形和流处于主导地位时，它可以使深层水在不利风条件下涌升。而前述的下锋层抬升高度的分布特征则可归于北纬 29° 附近的等深线(40—60米)有明显的发散，在北部又稍有收敛(见图19)。

本文承蒙苏纪兰教授审阅并提出宝贵意见，深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 胡敦欣等，关于浙江沿岸上升流的研究，科学通报，1980，3：131—133。
- [2] 潘玉球等，浙江沿岸上升流锋区特征及其成因的初步探讨，海洋湖沼通报，1980，3：1—7。
- [3] 丁宗信，风对浙江沿岸海域夏季温盐垂直结构和上升流的影响，海洋与湖沼，14(1983)，1：14—21。
- [4] 翁学传等，台湾暖流深层水变化特征的分析，海洋与湖沼，14(1983)，4：357—366。
- [5] Guan Bingxian and Mao Hanli, A note on circulation of the East China Sea, *C.J. of Oceanology and Limnology*, 1 (1982), 1: 5—16.
- [6] Janowitz, G.S. and Pietrafesa, L.J., The effects of alongshore variation in bottom topography on a boundary current (topographically induced upwelling), *Continental Shelf Research*, 1 (1982), 2: 123—141.