

浅水区锋面的流场结构*

黄大吉

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

提要 用一垂向二维的诊断模式,研究了浅水区锋面的流场结构。参照 James 模式并结合杭州湾具体情形来确定垂向涡动粘性系数,得到了与实测结果相一致的浅水区(杭州湾)锋面的流场结构。研究表明,在探讨浅水区锋面流场时必须选取合理的模式;而深水锋面流场结构对所采用的模式依赖性不大;锋面的流场结构不仅与锋面的强度有关,而且与锋面的结构有关。

关键词 锋面流场 杭州湾

环流一直是海洋学家所关心的课题,它决定着水文要素的分布、悬移物质的迁移和长期输运。陆架环流的研究主要集中在余流的三个分量上,即密度流、风生流和潮余流。在海水密度有较大水平梯度的锋面上,密度流常起主导作用;而锋截面上的环流对水体中物质在锋区的富集及锋面两侧水体的交换起着重要作用,可见研究锋面的流场结构,无论在理论上还是实际应用中都有着十分重要的意义。苏纪兰等(1990)指出:杭州湾近湾口存在一条东北—西南向的锋面,它是由长江冲淡水次级锋面及钱塘江冲淡水锋面所共同形成的,当径流量大或潮流速大时,二者几乎构成一个整体;当径流量小且流速也小时,二者东西分离。锋面的垂向结构具有明显的季节、潮相变化,具体可分为三种型态:垂向均匀的直立型、弱层化的缓倾型和强层化的倾斜型。可见杭州湾锋面具有复杂变化的三维结构,但在夏季或潮强时,锋面基本呈东北—西南向,具有准二维性。这里根据国家海洋局第二海洋研究所1987年冬与1988年夏两航次所获得的杭州湾锋面资料,用垂向二维的诊断模式,来研究浅水锋面的流场结构,并探讨了深水锋面的流场结构。

1 模式的建立及求解

假定水体为 Boussinesq 流体,垂向静力平衡近似成立,略去水平扩散项,不计沿锋向变化,则得控制锋面流动的垂向二维诊断模式基本方程(所取坐标系如图1):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \left(A \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

* 国家自然科学基金(4860244)和浙江省自然科学基金(188011)项目。

收稿日期: 1991年10月8日;接受日期: 1992年7月26日。

其中, u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的流速; $\varphi = p/\rho_0$, $p = P + \rho_0 g z$, P 为总压力, ρ_0 为参考密度; A 为垂向涡动粘性系数, 其值与水体的稳定性有关, 如何确定 A 将在后面详细讨论。

若记浮量 $b = g(\rho_0 - \rho)/\rho_0$, 则有:

$$b = \partial\varphi/\partial z \quad (4)$$

解的边界条件为, 在海面(取刚盖且不计风应力),

$$A \frac{\partial u}{\partial z} = A \frac{\partial v}{\partial z} = w = 0, \quad z = H \quad (5)$$

在海底:

$$w = 0, \quad z = 0 \quad (6)$$

$$A \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = c V' (u, v), \quad z = 0 \quad (7)$$

其中, $c (=0.0025)$ 是一常数; V' 是具有潮流量级的流速参数。在侧边界上假定无水体进出, 即:

$$u = v = w = 0, \quad x = 0 \quad (8)$$

$$u = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad x = L' \quad (9)$$

为了对锋面上各量有一个定性的了解, 对方程(1)–(4)无量纲化。令 $x = L\hat{x}$, $z = H\hat{z}$, $b = g'\hat{b}$, $u = U\hat{u}$, $v = V\hat{v}$, $w = \frac{H}{L}U\hat{w}$, $\varphi = g'H\hat{\varphi}$, $A = A_0\hat{A}$, 其中带头标“ $\hat{}$ ”

量为无量纲量, 得无量纲方程(方便起见, 省略头标“ $\hat{}$ ”):

$$R_1 \frac{U}{V} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - v = -\frac{g'H}{fVL} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + E \frac{U}{V} \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (10)$$

$$R_2 \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + u = E \frac{V}{U} \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$b = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (13)$$

其中, $R_1 (= \frac{U}{fL})$; $R_2 (= \frac{V}{fL})$ 分别为 x, y 方向上的罗斯贝数; $E (= A_0/fH^2)$ 为厄克曼数。

若假定在锋截面方向上压力梯度力项与科氏力项基本平衡, 则得 V 的一个合理量级估计为: $V = g'H/fL$, 可见沿锋向流速与锋面的强度 (g'/L) 及水深 (H) 成正比, 锋面越强, 水愈深, 沿锋向流速越大。对于杭州湾锋面有: $L = O(2 \times 10^4 \text{m})$, $H = O(10 \text{m})$, $g' = O(5 \times 10^{-2} \text{m/s}^2)$, $A_0 = O(10^{-2} \text{m}^2/\text{s})$, $f = O(10^{-4} \text{s}^{-1})$, 因而有:

$$V = (5 \times 10^{-2} \times 10)/(10^{-4} \times 2 \times 10^4) = 0.25 = O(10^{-1} \text{m/s})$$

$$E = 10^{-2}/(10^{-4} \times 10^2) = O(1)$$

$$R_2 = 0.25 / (10^{-4} \times 2 \times 10^4) = O(10^{-1})$$

由(11)式可知 U 和 V 同量级, 从(10)式可见粘性力项与压力梯度力项是同量级的, 这表明杭州湾水浅流急, 涡动强烈, 粘性耗散对锋面流场有着显著的作用, 具体表现在如何合理确定涡动粘性系数上。

这里采用帕坦卡(1980)提出的 SIMPLE 算法来求解, 所取网格为 $30(x) \times 11(z)$ 的均匀网格。取地转流场为初始场, 以便能较快地得到定态解。

2 涡动粘性系数(A)的确定

迄今为止, 人们尚未认识湍流的本质, 湍流的理论还不成熟, 因而对如何确定涡动粘性系数也未定论。这里分别用 Munk-Anderson 模式和湍流封闭模式来确定垂向涡动粘性系数, 以资比较。涡动粘性系数(A)与表征水体稳定性的 Richardson 数(R_i)有关, 两种模式反映了 A 对 R_i 的不同依赖关系。

2.1 Munk-Anderson 模式(简称 MA) 取垂向涡动粘性系数(A)为:

$$A = A_0 / [1 + n\sigma R_i / (n-1)]^{n-1} \quad (14)$$

$$R_i = \frac{\partial b}{\partial z} / \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (15)$$

其中, A_0 为充分混合状态下的 A 值, n 和 σ 为经验参数, Munk 和 Anderson (1948) 取 $n = 1.5$, $\sigma = 3.3$ 。但如何选取合理的 n 和 σ 值, 至今仍无一致的看法, 且所取值差别很大。由于这里只计算由锋面产生的流动, 没有计算潮流和风生流, 因而无法精确计算 R_i 值。参照 James (1984) 的做法来考虑潮流和风生流的作用, 并取 $n = 1.5$, $\sigma = 0.3$, 得:

$$A = A_0 / (1 + 0.9R_i)^{1/2}, \quad (16)$$

$$R_i = \frac{\partial b}{\partial z} / \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{u_T^*}{\kappa z} \right)^2 + \left(\frac{u_w^*}{\kappa(H-z)} \right)^2 \right\} \quad (17)$$

其中, u_T^* , u_w^* 分别为潮和风的摩擦速度; $\kappa (=0.4)$ 为卡门常数。

2.2 湍流封闭模式(简称 TC) 取垂向涡动粘性系数(A)为:

$$A = qlS_M, \quad q = (2k)^{1/2} \quad (18)$$

其中, k 为湍动能; l 为长度尺度; S_M 为依赖于 R_i (或 R_f) 的经验关系式, 据 Mellor 和 Yamada (1982) 有:

$$S_M = \begin{cases} 2.76 \frac{0.142 - 0.466\Gamma}{0.222 - 0.775\Gamma} (0.222 - 0.941\Gamma), & R_i < 0.19 \\ 0.0, & R_i \geq 0.19 \end{cases} \quad (19)$$

$$\Gamma = R_i / (1 - R_i), \quad (20)$$

$$R_f = 0.658 [R_i + 0.178 - (R_i^2 - 0.322R_i + 0.0317)^{1/2}] \quad (21)$$

从(18)可知, 要确定 A 得先求出 ql , 根据 James (1984) 有

$$q^2 = l^2 B_1 S_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] (1 - R_f) \quad (22)$$

其中, $B_1 (=16.6)$ 为经验常数 (Mellor, et al., 1982)。到此还需确定 l , 其原则是使充分混合情形下有合理的 A_0 值。Csanady (1976) 指出:

$$A_0 = \min(u^*H/20, u^{*2}/200f) \quad (23)$$

而 $A_0 = u^*l$, 从而可得:

$$l = \min(H/20, u^*/200f) \quad (24)$$

用 u_T^* , u_w^* 代替(24)中的 u^* 可得潮和风的长度尺度 l_T , l_w 。李身铎等(1985)指出杭州湾由 M_2 分潮产生的底应力为 $0.7-0.9\text{N/m}^2$, 垂向涡动粘性系数为 $4 \times 10^{-3}-8 \times 10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$, 从而有:

$$u_T^* = 0.027\text{m/s}, l_T = 0.3\text{m} \quad (25)$$

参照 James (1984) 方法计及潮和风对 ql 的作用。

当 $R_f \geq 0.19$ 时, S_M 为零, 从而 $A = 0$, 这不太符合实际, 这里取:

$$A = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}, \text{ 当 } R_f \geq 0.19。$$

3 结果与讨论

据两航次的调查结果, 杭州湾锋面的垂向结构可概括为以下三种型态: (I) 垂向均匀的直立型(图 1a), 锋面两侧的水体

上下充分混合, 这种型态出现在大潮期间; (II) 弱层化的缓倾型(图 1b), 锋面两侧的水体上下也充分混合, 该型态出现在冬季小潮期间; (III) 强层化的倾斜型(图 1c), 锋面的低密侧水体上下充分混合, 而另一侧则呈层化状态, 此型态出现在夏季小潮期间, 在计算中取风速(w)为 7m/s 来求 u_w^* , 除特殊说明外, A_0 取为 $10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$, 此值对杭州湾来说是合理的。

3.1 弱层化的缓倾型 对图 1b 所示的弱层化缓倾型锋面, 计算得沿锋向流速及锋截面上的环流结构如图 2a, c。比较 MA 与 TC 模式的结果可知, (TC 模式结果图略) 锋面流场结构的基本形态是一致的, 即沿锋向流动仍局限于锋区内, 其量值从表到底逐渐减小, 底部有一弱的逆沿锋向流。截面上的环流呈单环状, 轻水侧为上升流, 重水侧为下降流, 锋面的表底处各有一辐合、辐散区。但两模式所得流场的强弱相差一个量级, 由 MA 算得的表层流速值为 1cm/s , TC 模式得到的表层流速值达 15cm/s 。

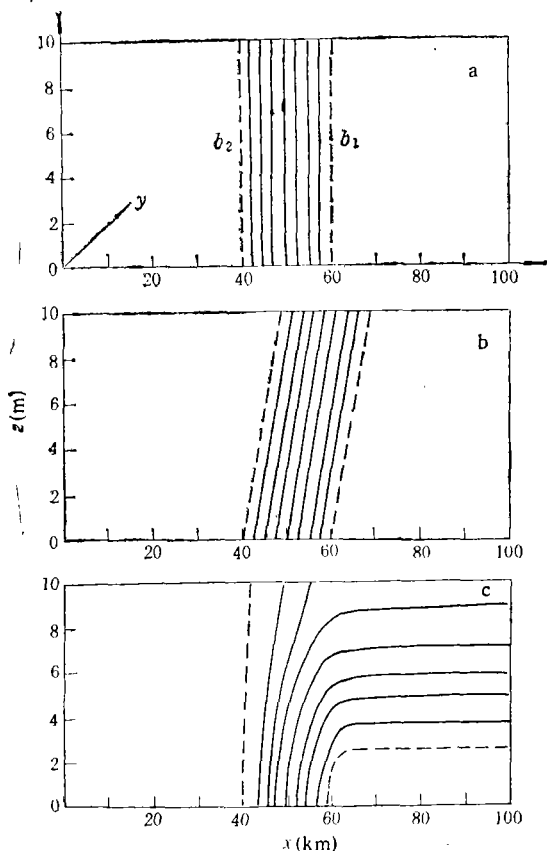


图 1 杭州湾锋面的垂向结构及浮量分布
($b_2 - b_1 = 0.058\text{m/s}^2$)

Fig. 1 Vertical front structure and buoyancy in Hangzhou Bay

后者与锋区浮标跟踪估算得到的由锋面产生的沿锋向流速值相当(苏纪兰等, 1990), 说

明 TC 模式所得的结果比 MA 模式更符合实际。就模式本身来说, 由于 TC 模式计及了湍流的历史效应, 与 MA 相比是高阶模式, 计算得到的结果也更可信。从两模式的 A 与 R_i 关系可知, TC 模式中 A 随 R_i 增大而减小的速率比 MA 模式快, 层化使得 R_i 增大, 所以由 TC 模式得到的锋面流场比 MA 强。

锋面流场的强弱与锋面的倾斜率有关, 图 2b,d 是锋面斜率从原来的 1/500 增加到 1/50 时, 由 MA 计算得到的结果, 锋面斜率增大, 沿锋向流速其量值减小, 锋截面上的环流也减弱。这是因为锋面斜率增大, 锋区的层化作用减弱, 涡动粘性耗散增强, 使得锋面的流场减弱。

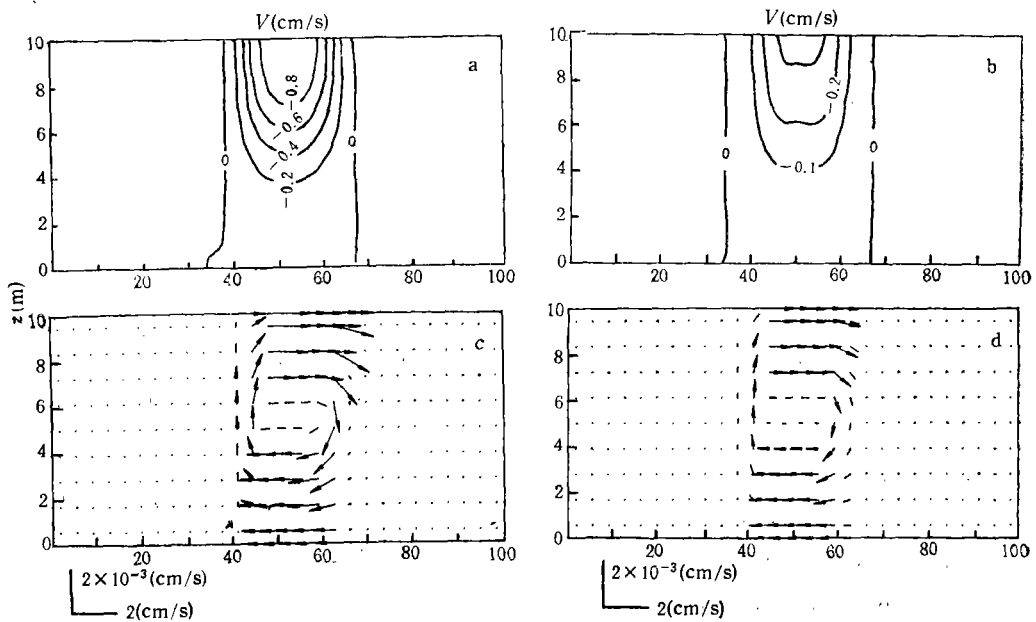


图 2 弱层化缓型锋面的流场结构(MA模式 a,c. $k = 1/500$; b,d. $k = 1/50$)

Fig. 2 Along-front current and cross-frontal circulation for weakly stratified front (MA, $k = 1/500$)

a,b. 沿锋向流速; c,d 锋截面上环流。

3.2 垂向均匀的直立型 计算得沿锋向流速 (V) 及锋截面上的环流结构与缓倾型类似, 只是量值上的差异。表层最大沿锋向流速为 0.2 cm/s (图略), 比缓倾型要小一个量级, 锋截面的单环流动也比缓倾型弱一个量级。因为水体垂向均匀, $\partial b / \partial z = 0$, 从而 $A = A_0$, MA 和 TC 两模式所得的结果完全一致。

锋面流场与 A_0 值有关, 当环境 A_0 值从 $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ 减小到 $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 虽然所得的流场结构与原来类似, 但锋面的流强显著增强, 表层沿锋向流速为 7 cm/s (MA 模式, 图略), 截面上的环流也相应增强, 在近海底处出现与表层流方向相反的沿锋向底部流。 A_0 值的减小表示背景涡动弱, 因而能量耗散也少, 由锋面产生的流动相应增强。

3.3 强层化的倾斜型 对图 1c 所示的倾斜型锋面, 计算得到的锋面流场结构如图 3。两模式所得的沿锋向流速分布结构与缓倾型相类似, 锋区的大流速区偏向于层化侧, 不

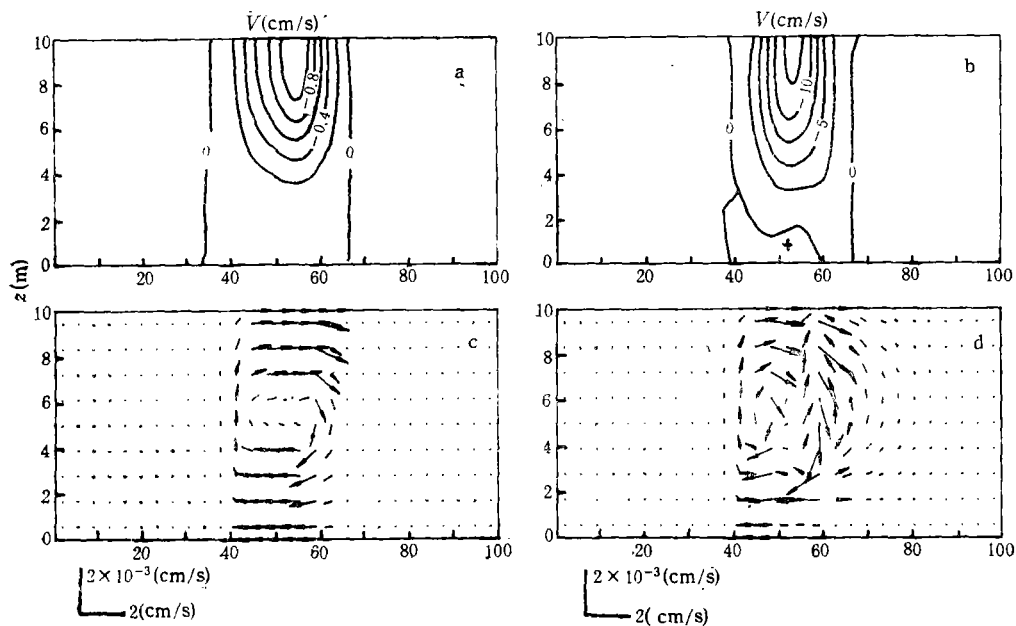


图3 强层化倾斜型锋面的流场结构

Fig. 3 Along-frontal current and cross-frontal circulation for highly stratified front
a. $V(MA)$; b. $V(TC)$; c. $U, W(MA)$; d. $U, W(TC)$.

同的是 MA 得到的表层流速量值 (1.2cm/s) 比 TC 模式得到的量值 (12cm/s) 小一个量级, TC 模式结果在底部出现底部逆锋向流。锋截面上的环流结构有着明显的差异, MA 结果呈单环状, 环流方向与缓倾型相同; TC 结果呈双环状, 其一位于锋面的垂向均匀侧, 另一位于层化侧, 两环流的方向相同。因 TC 模式优于 MA 模式, 故 TC 模式结果较 MA 更可信。

3.4 深水锋面的流场结构 深水锋面有别于浅水锋面, 其所处海域的水深较大, 而其锋面的强度则较浅水锋弱。这里取 $H = 50\text{m}$, $b_2 - b_1 = 0.019\text{m}^2/\text{s}$, 的弱层化缓倾型和强层化的倾斜型来探讨深水区锋面流场结构, 为了同浅水锋进行比较, 其它参量同浅水锋相同。计算结果表明 MA 和 TC 两模式所得的结果一致, 这是深水锋强度弱, 进而层化对 A 的影响较小所致。对缓倾型锋面其流场结构同浅水锋相似, 只是流速较浅水锋强, 锋截面上的环流也如此(图 4a, c)。对强层化倾斜型锋面, 其流场结构与浅水锋(TC)结果相似, 但流速要强些, 锋截面上的环流呈双环状(图 4b, d)。

4 结论

从所有的计算结果可归纳出如下几点结论。

4.1 浅水区水浅流急, 涡动耗散强, 在研究浅水区锋面流场结构时, 必须选取合理的模式以确定涡动粘性系数。本文结果表明湍流封闭模式较合理。

4.2 无论是直立型、缓倾型、还是倾斜型锋面, 其流场结构基本类似; 沿锋向流局限于锋区内, 自表到底其量值逐渐减小, 底部有一弱的底部逆流; 直立型和缓倾型锋截面上环流呈单环流状, 而倾斜型呈双环结构, 锋截面上有两个辐合区和两个辐散区。

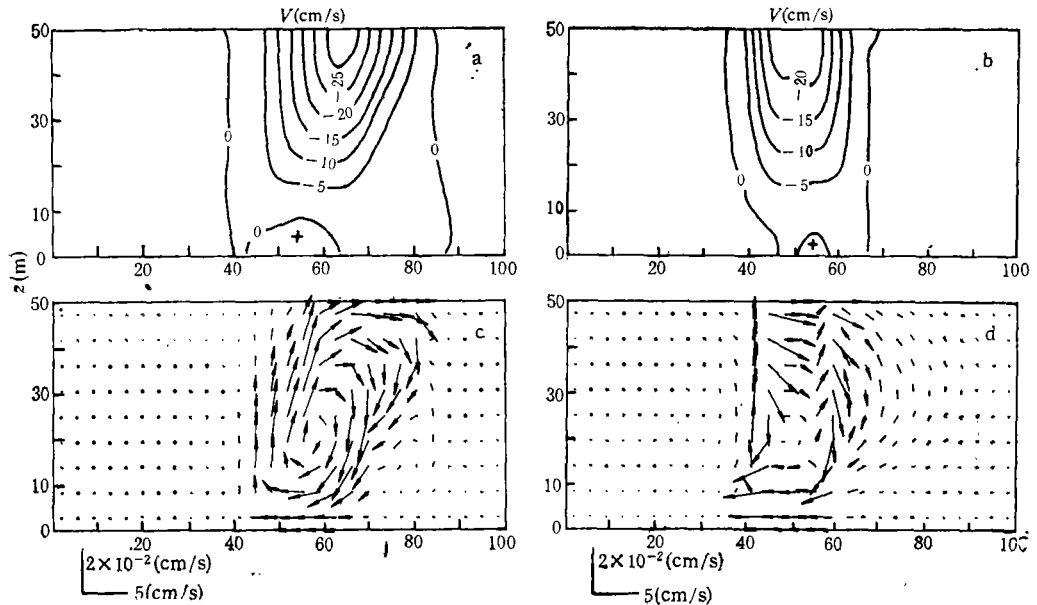


图 4 深水锋面的流场结构

Fig. 4 Frontal-induced current structure for deep water fronts

a, b. 沿锋向流速; c, d. 锋截面上环流。

4.3 锋区的流场不仅与锋面强度有关, 而且与锋面的结构有关, 层化制约涡动发展, 锋面越倾斜(斜率越小), 其流场也愈强, 缓倾型和倾斜型的流速比直立型大一个量级。锋区流场强弱还取决于环境涡动的强弱。

4.4 深水区锋面其流场结构类似于浅水锋面。与浅水锋面不同, 深水锋面流场对不同模式的依赖性不大, 两种模式所得结果一致。

参 考 文 献

- 李身锋、曹德明、方国洪, 1985, 杭州湾潮应力和涡动粘性的估算, *海洋学报*, **7**(4): 412—422。
 苏纪兰、王康璋、李炎, 1990, 杭州湾锋面及其物质输送, *杭州湾锋面论文集*, 1—14。
 帕坦卡, 1980, 传热与流体流动的数值方法, (郭宽良译), 安徽科学技术出版社(合肥), 132—137。
 Csanady, G. T., 1976, Mean circulation in shallow seas, *J. Geophysical Res.*, **81**: 5 389—5 399。
 James, I. D., 1984, A three-dimensional numerical shelf-sea front model with variable eddy viscosity and diffusivity, *Continental Shelf Res.*, **3**(3): 69—98。
 Mellor, G. and Yamada, P., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophysics and Space Physics*, **20** (4): 851—875。
 Munk, W. H. and Anderson, E. R., 1948, Notes on a theory of thermocline, *J. Marine Res.*, **7**: 276—295。

ON THE FRONT-INDUCED CURRENT STRUCTURE IN SHALLOW SEA

Huang Daji

(*Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012*)

ABSTRACT

The front-induced current in shallow sea (Hangzhou Bay) is studied by using a vertical two-dimensional diagnostic model. In determining the model's parameter, a version of James's model was used as reference to derive the value of the eddy viscosity coefficient in our model according to the actual conditions in Hangzhou Bay. The agreement between calculated and observed results is reasonably good. The results indicate that the front-induced current is related to the frontal strength as well as frontal structure. The turbulence closure scheme (TC) is more reasonable than the Munk-Anderson scheme (MA) with regard to shallow water fronts. For deep water fronts, both TC and MA show the same results. The front induced currents are trapped in the frontal zone. Along-frontal current decreases from surface to bottom, where a counter-current exists near the sea bed. Crossfrontal circulation shows one-cell structure for vertically well mixed front and weakly stratified front, and two-cell structure for highly stratified front.

Key words Front-induced current Hangzhou Bay