

黄海冷水团的环流结构

苏纪兰 黄大吉

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要 运用定性分析和数值模拟, 对黄海冷水团的环流结构进行了探讨, 结果表明黄海冷水团的垂向环流结构为双环结构: 跃层以上区为中心上升, 边缘下降的弱环流; 跃层以下区为中心下降, 边缘上升的强环流; 在冷水团的中心区域, 流动很弱, 且无穿越温跃层的垂向流动。同时也对以往有关黄海冷水团垂向环流结构的工作进行了讨论。

关键词 黄海 底层冷水团 上升流 下降流

黄海冷水团系指夏季位于黄海深底层的低温水体, 其主要特征是温度低且温差大, 盐差小。它的温度变化范围通常约为 $5-12^{\circ}\text{C}$, 盐度变化范围通常约为 $31.5-32.5$ (赫崇本等, 1959)。一般以 8°C 等温线作为黄海冷水团水平方向和垂直方向的界线。黄海冷水团又分为南北两个, 其中尤以北黄海冷水团较典型。

黄海冷水团是我国陆架浅海上一个重要的海洋现象, 多年来一直为我国海洋学家所关注。赫崇本等 (1959) 对黄海冷水团的形成机制及其性质进行了探讨, 指出黄海冷水团是冬季在黄海本地形成的。管秉贤 (1963) 分析了黄海冷水团的温度变化及其环流结构。从以往诸学者的研究工作中, 可看出对黄海冷水团垂向环流的看法不尽一致, 归纳起来可大致分为三类: 第一类是单环结构环流, 冷水团的中心为上升流, 边缘为下降流, 且垂向流速穿越温跃层, 如管秉贤 (1963), 袁业立 (1979), 缪经榜等 (1991); 第二类是双环结构环流, 在跃层以上区域中心为下降流, 边缘为上升流, 而在跃层以下则反之, 如 Feng 等 (1992); 第三类是仅局限于跃层附近的薄壳环流结构, 中心为上升流, 边缘为下降流, 如李惠卿和袁业立 (1992), 袁业立和李惠卿 (1993)。

本文通过定性分析和数值模拟这二个方面来探讨黄海冷水团的垂向环流结构, 并对以往三类垂向环流结构作些分析和讨论。

1 控制方程

为了对黄海冷水团垂向环流结构有一个定性的了解, 我们从动力方程组入手, 通过量纲分析, 得出最低阶的控制方程, 结合实测的冷水团温度场结构, 便可定性地勾划出夏季黄海冷水团的垂向环流结构。

因黄海冷水团具有一定的对称性, 我们也采用二维的轴对称问题来描述。柱坐标的原点选在冷中心的海底, r 为矢径; θ 为幅角 (气旋式转动为正); z 轴垂直向上; 相应的速

高等学校博士学科点基金项目。苏纪兰, 男, 出生于 1935 年 12 月, 教授。

收稿日期: 1994 年 8 月 30 日, 接受日期: 1994 年 12 月 30 日。

度分量记为 u, v, w 。假定水体为 Boussinesq 流体、垂向静力平衡近似成立、所研究的问题为轴对称, 并忽略盐度变化的影响, 则可得其有关的控制方程为:

$$u_t + uu_r + wu_z - v^2/r - fv = -p_r/\rho_0 + A_H[(ru_r)_r/r - u/r^2] + [A_v u_z]_z \quad (1)$$

$$v_t + uv_r + wv_z + uv/r + fu = A_H[(rv_r)_r/r - v/r^2] + [A_v v_z]_z \quad (2)$$

$$0 = -p_z + g\Delta\rho \quad (3)$$

$$(ru)_r/r + w_z = 0 \quad (4)$$

$$T_t + uT_r + wT_z = K_H(rT_r)_r/r + [K_v T_z]_z \quad (5)$$

$$\rho = \rho_0 - \Delta\rho = \rho_0[1 - \alpha(T - T_0)] = \rho_0(1 - \alpha\Delta T) \quad (6)$$

以上 p 为除去静压 ($H - \rho_0 gz$) 后的扰动压力; $\alpha = (1.8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$ 为海水的膨胀系数; T_0 为冷水团最低特征温度, ρ_0 是对应于 T_0 的海水密度; $\Delta\rho = \rho_0 - \rho$, $\Delta T = T - T_0$; A_H 和 A_v 分别为水平和垂向的涡动粘性系数, K_H 和 K_v 分别为水平和垂向的涡动扩散系数。我们假定 A_H 和 K_H 为常数。由于 A_v 和 K_v 与水体的层化有关, 取 A_v 和 K_v 取为 z 的变量。为获得符合实际的温度分布结构, 必须对 A_v 和 K_v 采用较好的参数化公式 (Wang 等, 1990)。

对 (1)–(5) 进行无量纲化, 带 (*) 量为无量纲量:

$$\begin{aligned} \text{令 } t &= t^*/\omega, \quad r = Lr^*, \quad z = Hz^*, \quad u = Uu^*, \quad v = Vv^*, \quad w = UHw^*/L, \quad p = \rho_0 g' H p^*, \\ \Delta\rho &= \Delta\rho_0 \Delta\rho^*, \quad T = T_0 T^*, \quad A_v = A_0 A_v^*, \quad K_v = K_0 K_v^* \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $g' = g\Delta\rho_0/\rho_0 = \alpha g\Delta T_0$, ΔT_0 为冷水团的特征温度差, $\Delta\rho_0$ 是对应于 ΔT_0 的海水密度差。为方便起见, 略去无量纲量的头标 (*), 把 (7) 代入 (1)–(5) 得:

$$(\varepsilon\delta)u_t + \varepsilon R_u[uu_r + wu_z] - R_v v^2/r - v = -(g'H/fVL)p_r + E_H \varepsilon [(ru_r)_r/r - u/r^2] + E_v \varepsilon (A_v u_z)_z \quad (8)$$

$$(\delta/\varepsilon)v_t + R_v[uv_r + wv_z] + R_v uv/r + u = (E_H/\varepsilon)[(rv_r)_r/r - v/r^2] + (E_v/\varepsilon)(A_v v_z)_z \quad (9)$$

$$0 = -p_z + \Delta\rho \quad (10)$$

$$(ru)_r/r + w_z = 0 \quad (11)$$

$$\varepsilon_T T_t + uT_r + wT_z = P_{cH}^{-1}(rT_r)_r/r + P_{cv}^{-1}(K_v T_z)_z \quad (12)$$

其中: $\varepsilon = U/V$, $\varepsilon_T = L\omega/U$, $\delta = \omega/f$, $R_u = U/fL$, $R_v = V/fL$, $E_H = A_H/fL^2$,

$$E_v = A_0/fH^2, \quad P_{cH}^{-1} = K_H/UL, \quad P_{cv}^{-1} = K_0L/UH^2$$

对于黄海冷水团, $\omega = 0(10^{-7} \text{ s}^{-1})$, $f = 0(9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1})$, $L = 0(8 \times 10^4 \text{ m})$, $H = 0(55 \text{ m})$, $\Delta T_0 = 15^\circ\text{C}$ 。所以, $g' = \alpha g\Delta T_0 = 1.8 \times 10^{-4} \times 9.8 \times 15 = 0(2.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s})$ 。参照袁业立 (1979) 和 Wang 等 (1990), 取 $A_0 = 0(2 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s})$, $A_H = 0(2 \times 10 \text{ m}^2/\text{s})$, $K_0 = 0(2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$, $K_H = 0(2 \text{ m}^2/\text{s})$ 。其中 K_0 在浅海中的取法也不尽一致, 一种是延用深海的做法, 取 $K_0 = 0(10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$ (Wang 等, 1990), 另一种取 K_0 与 A_0 同量级 (Csanady, 1982)。但在这里的定性分析中, K_0 的取值仅与温度简化方程有关, 而与本文的结果无关, 因为定性分析中只用到实测温度分布结构, 而没有用到最低阶温度方程。

从卫星跟踪浮标轨迹 (Beardsley 等, 1992) 可得 V 的一个合理的特征量值为 $V = 0(0.1 \text{ m/s})$ 。从而我们可得有关无量纲参量的量阶:

$$\delta \approx 1.1 \times 10^{-3} = O(10^{-3}), E_H \approx 3.5 \times 10^{-5} = O(10^{-5}), E_v \approx 7.3 \times 10^{-2} = O(10^{-1}),$$

$$R_v \approx 1.4 \times 10^{-2} = O(10^{-2}), g'H/fVL \approx 2 = O(1)$$

由(9)可知, θ 动量方程中科氏力项应与垂向涡动项平衡, 即 $\varepsilon = O(E_v) = O(10^{-1})$, 从而

$$U = O(10^{-2} \text{m/s}), R_u = O(10^{-3}), \varepsilon_T \approx 0.8 = O(1),$$

$$P_{\varepsilon H}^{-1} \approx 2.5 \times 10^{-3} = O(10^{-3}), P_{\varepsilon v}^{-1} \approx 5.3 = O(1),$$

因此得最低阶的方程:

$$v = (g'H/fVL)p, \quad (13)$$

$$u = E_v(A_v v_z)_z / \varepsilon \quad (14)$$

$$0 = -p_z + \Delta \rho \quad (15)$$

$$(ru)_r / r + w_z = 0 \quad (16)$$

$$\varepsilon_T T_r + u T_r + w T_z = P_{\varepsilon v}^{-1} (K_v T_z)_z \quad (17)$$

相应的有量纲方程为:

$$v = p_r / f \rho_0 \quad (18)$$

$$u = A_v v_{zz} / f + (A_v)_z v_z / f \quad (19)$$

$$p_z = g \Delta \rho \quad (20)$$

$$(ru)_r / r + w_z = 0 \quad (21)$$

$$T_r + u T_r + w T_z = (K_v T_z)_z \quad (22)$$

由(6),(18),(19),(20)得到:

$$v_z = p_{rz} / f \rho_0 = \alpha g T_r / f \quad (23)$$

$$u = \alpha g A_v T_{rz} / f^2 + \alpha g (A_v)_z T_r / f^2 \quad (24)$$

因为 $\Delta T = T - T_0$, 以上两个方程中 ΔT 的导数都用 T 的导数来代替, 由上两式可见, 从实测的温度场分布可以定性地得出 u, v 分布的一些性质。事实上袁业立(1979)及 Garrett 等(1981)都给出了与(23)、(24)相类似的关系式。

2 定性分析

黄海冷水团的实测温度结构如图 1, 我们以相邻两个断面之间的温度分布情况来讨论。

2.1 在跃层以下的中、下层, 两个断面之间等温线向外下斜, 靠中央侧温度低, 边缘侧温度高, 即 T_r 为正, 从而由方程(23)得 v_z 为正; 而在近表层, 两个断面之间等温线向外上斜, 靠中央侧温度高, 边缘侧温度低, 即 T_r 为负, 从而 v_z 为负; 在 v_z 从正转化为负的地方, v 必定达到最大值, 即 v_z 为零、 v_{zz} 为负; 由 v 方向的动量方程(19)可知, u 在 v 最大值处必为负, 即从边缘指向海中央。

2.2 再看跃层以上和以下区域 T_r 随水深的变化。因为在上、下混合层中, A_v 受层化影响很小, 可取作常数, 从而(24)式右端的第二项可略去。在下层, T_r 为正并随水深变浅而逐渐增大, 即 T_{rz} 大于零, 从而由方程(24)得 u 为正, 即流向从中央指向边缘; 而 T_r 在上层为负, 而其绝对值则随水深变浅而减小, 即 T_{rz} 也大于零, 从而 u 也为正, 即流向也从中央指向边缘。

不难看出, 若取不同的断面, 以上的分析仍然适合。因此, 结合连续方程可以看出, 在

下层,冷中心处应为下降流,外边缘处则是上升流;而在上层,冷中心处应为上升流,外边缘处则是下降流。

到此我们从零阶近似方程,根据黄海冷水团的温度分布结构,可定性地勾划出冷水团的垂向环流分布示意图(如图2),即垂向环流呈双环状,在温跃层以下冷中心为下降流,边缘为上升流,而在温跃层以上的区域,对称中心为上升流,边缘为下降流。

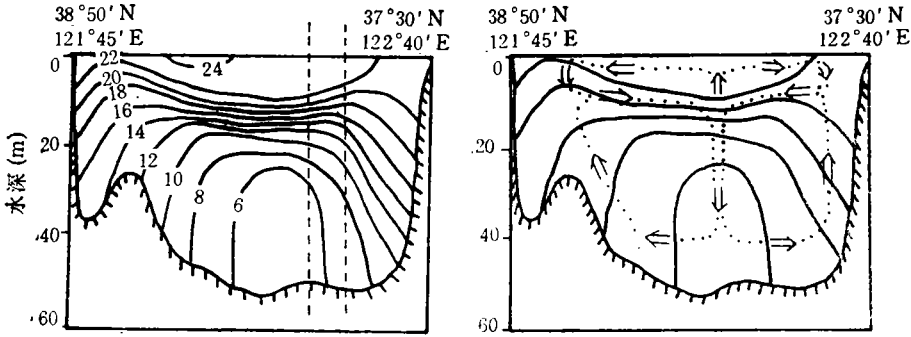


图1 7月份大连一成山角断面水温分布(°C)
(取自全国海洋综合调查图集)

Fig. 1 Vertical temperature distribution (°C) across Dalian-Chengshan Cape in July.

(adopted from the Atlas of the Nationwide Comprehensive Oceanographic Survey)

垂直虚线为本文定性讨论的参考断面。

图2 黄海冷水团垂向环流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the vertical circulation induced by the Yellow Sea Cold Water Mass

3 数值模拟

为了检验以上的推断和得到详细的垂向环流结构,用数值模拟的方法来研究黄海冷水团的温度结构及其相应的环流型态。采用的方程为(1)–(6),其相应的边界条件为(在海面采用刚盖条件):

在海面 ($z = H$): $T = T_H(r, t)$, $w = 0$;

在海底 ($z = h(r)$): $v = u = w = 0$, $n \cdot \nabla T = 0$;

初始条件为:

$$T = T_0(r, z), t = 0$$

这时用 SIMPLE 算法来求解,为了得到合理的温度结构,必须对 A_v 和 K_v 采用好的参数化模式,这里参照 James (1984) 和黄大吉 (1993) 的湍流封闭模式做法来确定 A_v 和 K_v 。

模式的初始温度 $T = T_0(r, z)$ 和海表面的边界温度 $T = T_H(r, t)$, 根据管秉贤 (1963) 的调和结果来给定。模式从 3 月 1 日起算到 10 月底结束,较好地模拟了黄海冷水团的形成和消散过程。

3.1 从模拟所得的温度分布可知,整个夏季表层增温快,底层增温慢,温跃层逐渐增强,到 7 月中旬温跃层最强(图 3a),此后,温跃层的深度不断加大,同时层化的范围逐渐向海中心缩小。

3.2 轴向流速 v 在整个断面上的分布为(图 3b): v 的最大值(约为 10cm/s)出现在温跃

层露顶处, 即层化与垂向混合均匀交界处(锋面)的表面附近, 从温跃层的露顶处向海中心, v 最大值的量值减小, 其垂向位置逐渐从海面下降致温跃层附近。

3.3 黄海冷水团的垂向环流呈双环结构(图 3c), 上下二环不仅流动方向相反, 而且强度相差很大, 上环弱而下环强, 并且上环仅处于跃层露顶以内, 而下环则随跃层露顶而向上层扩展; 垂向环流在锋区附近最强, 水体在层化与混合的交界区(锋面)附近上升, w 的最大流速可达 $5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, 在温跃层的露顶处转向沿着等温线向跃层方向流去, 此时流动分叉成下降流和上升流, 下降流强而上升流弱, 从而形成双环的环流结构。在冷水团的中心区域, 流动很弱, 且无穿越温跃层的垂向流动。在跃层露顶以外有另一弱环, 其方向与下环一致, 外缘为上升流, 而在露顶处则为下降流。

模拟所得的温度、水平方向流速及垂向环流分布, 证实了上面定性分析的结果(图 2)。模拟结果表明, 双环中的上下环流因温度结构的上下不对称有着显著的差异, 下环强而上环很弱。

4 对垂向环流结构的几点说明

以往对陆架浅海锋面的环流研究表明(如 Garrett 等, 1981; James, 1984; 黄大吉, 1993), 锋区的垂向环流结构虽然取决于锋面的结构, 但其垂向环流的主要特征为: 水体的高密侧为下降流, 低密侧为上升流, 在海底水体从高密侧流向低密侧, 而在近海表面处水体从低密侧流向高密侧。这与我们所得的结果是一致的。

垂向环流由于其流速的量值很小, 尚无法从实测的海流资料中得到直接的证据。从间接的证据, 如溶解氧的最大值的垂向分布(顾宏堪, 1980)和水化学特征的垂向分布(刁焕祥等, 1985)来看, 黄海冷水团似乎是不应该存在穿越温跃层的垂向流动, 这从一个侧面也说明本文所得的垂向结构是合理的。

以下我们对以往的三种环流类型的动力模式进行分析, 为了便于与前人原文对照, 以下所用公式中的符号与前人的原文相同。

4.1 管秉贤(1963)在讨论垂向环流结构时, 假定内摩擦力为体积力, 由径向的动量方程得到: $v_r = -kv_\theta/f$, 这样 v_r 可由内摩擦力 kv_θ 大小和方向来直接确定。再运用连续

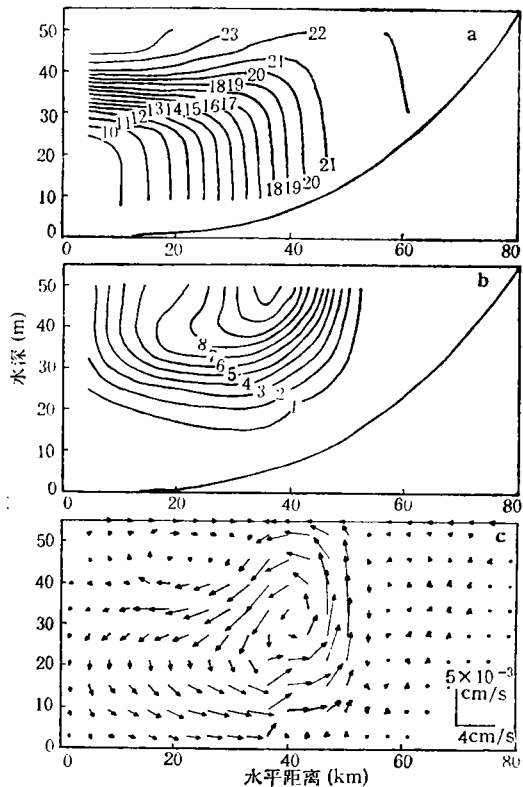


图 3 模拟得到的 7 月中旬黄海冷水团温度 (a)、水平环流 (b) 和垂向环流结构 (c)

Fig. 3 Numerical modelling results along the (r, z) -plane for the Yellow Sea Cold Water Mass in middle July: (a) vertical temperature distribution ($^{\circ}\text{C}$), (b) circumferential (alongfront) velocity distribution (10^{-2}m/s) and (c) velocity distribution

方程,并结合温度分布,得到他的垂向环流结构。这里值得指出的一点是流体的内摩擦力是面力而非体积力。在速度梯度没有大变化时,把内摩擦力当作体积力来处理,不失为一个有效的方法,但在速度梯度变化大的锋面区域,这样做可能不太合适。

4.2 袁业立(1979)、李惠卿和袁业立(1992)和袁业立和李惠卿(1993)等用一个浅海热生环流的流体动力学简化模式,通过坐标变换,得到简化的温度方程。在新坐标系里,他们认为在冷水团中心部分的主要温度结构区中,等温线是十分平坦的,从而可略去含有 T_x 的项。从黄海冷水团的温度分布可知,在新的坐标系下, T_x 在冷中心部分是很小的。而在冷水团边缘的广阔区域上, T_x 并非小量, uT_x 的值与 wT_z 相当,因而含有 T_x 的项是不能忽略的。他们得到的简化方程若仅应用于冷水团的中心部分是合理的,但是应用于包含锋面在内的整个冷水团区域,则是不合适的。

4.3 Feng 等(1992)在研究黄海冷水团环流结构时,所用的方程是研究大洋温跃层的方程。在大洋温跃层中,背景密度的水平梯度很小,是可以忽略的小量。而在黄海冷水团区域,密度的水平梯度并非小量,密度方程中,密度的水平平流项与垂向平流项是同一量级的,不能略去其中的任何一项。可见用描述大洋温跃层的方程来研究黄海冷水团环流结构是不合适的。

4.4 缪经榜等(1990,1991)从三维密度环流方程出发,用边界层理论和摄动分析法研究了黄海冷水团的温度和环流结构。他们先用摄动分析法,得到关于热 Rossby 数的零阶和一阶方程组,再根据边界层理论分析,把求解区域分成内区和上下边界层区来求解,得到的零阶方程是一个垂向扩散方程。由于他们文章中许多步骤都略去,较难看出问题的关键。一个可能的原因是作者采用大洋的小参数展开方法,在浅海不适用。例如,在黄海 $E_v = 0(10^{-1})$, 因此上、下艾克曼层较厚,它们可能上下重叠,这样对 E_v 数展开是不太合适的。

最后,我们指出一个需要注意的问题。“气旋式的水平环流必然在环流的中心产生上升流”这个在气象和大洋中普遍成立的结论,在浅海是不成立的。理由很简单,因为在浅海中不存在一个水平的等压面(无流面)。

5 结语

黄海冷水团的水平环流呈气旋状;垂向环流呈双环结构,上下二环不仅流动方向相反,而且强度相差很大,上环弱而下环强。在冷水团的中心区域,流动很弱,且无穿越温跃层的垂向流动。锋面处梯度变化大,方程简化时要特别谨慎。

参 考 文 献

- 刁焕祥、沈志良,1985,黄海冷水域水化学要素的垂直分布特征,海洋科学集刊,25: 41—51。
 李惠卿、袁业立,1992,黄海冷水团热结构及其环流解析研究,海洋与湖沼,23(1): 7—13。
 袁业立,1979,黄海冷水团环流, I. 冷水中心部分的热结构和环流特征,海洋与湖沼,10(3): 187—199。
 袁业立、李惠卿,1993,黄海冷水团环流结构及生成机制研究, I. 0 阶解及冷水团的环流结构,中国科学 B,23(1): 93—103。
 顾宏堪,1980,黄海溶解氧垂直分布的最大值,海洋学报,2(2): 70—80。
 黄大吉,1993,浅水区锋面的流场结构,海洋与湖沼,24(4): 385—392。
 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。
 赫崇本、汪园祥、雷宗友等,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。
 缪经榜、刘兴泉、薛亚,1990,北黄海冷水团形成机制的初步探讨, I. 模式解,中国科学 B,20(12):131—132。

- 缪经榜、刘兴泉、薛亚, 1991, 北黄海冷水团形成机制的初步探讨, II. 模式解的讨论, 中国科学 B, 21(1):74—81.
- Beardsley, R. C. Limeburner, R., Kim K. et al., 1992, Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas, *La Mer*, 30:297—314.
- Csanady, G. T., 1982, Circulation in the coastal ocean, D. Reidel Publishing Company, (Boston, USA), pp. 279.
- Feng M., D. Hu and Y. Li, 1992, A Theoretical solution for the thermohaline circulation in the Southern Yellow Sea, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 10:289—300.
- Garrett, C. J. R. and Loder, J. W., 1981, Dynamical aspects of shallow fronts, *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, A302:563—581.
- James, I. D., 1984, A three-dimensional numerical shelf-sea front model with variable viscosity and diffusivity, *Continental Shelf Res.*, 3:69—98.
- Wang D. P., Chen D. and Sherwin T. J., 1990, Coupling between mixing and advection in a shallow sea front, *Continental Shelf Res.*, 10:123—136.

ON THE CURRENT FIELD ASSOCIATED WITH THE YELLOW SEA COLD WATER MASS

Su Jilan, Huang Daji

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012)

ABSTRACT

An idealized axi-symmetric model is used to study the current field associated with the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM), a bottom pool of remnant Yellow Sea Winter Water resulting from summer stratification. Two approaches are employed to obtain the results: one is a qualitative analysis based on an observed vertical temperature distribution in summer (Fig. 1) and a set of simplified equations derived from scaling; the other is a numerical integration of the full equations with specified time-dependent surface heat flux and a vertically homogeneous initial state.

Both methods yield similar results. Besides the characteristic alongfront cyclonic circumferential circulation (Fig. 3b), the vertical circulation in the (r, z) -plane has a distinct double-gyre structure (Figs. 2, Fig. 3c). Within the thermocline the current flows from the outer boundary of YSCWM towards its center. The upper layer gyre is smaller and weaker, with upwelling in the center and downwelling within the surface frontal zone. The lower layer gyre is larger and more intense, with strong upwelling reaching the surface over the edge of the bottom front and downwelling elsewhere. Outside the frontal zone there is a very weak gyre spanning the whole depth with the same sense of circulation as that of the bottom layer gyre.

Finally, we discussed possible reasons why previous works resulted in different patterns, basically three types, for the YSCWM-induced vertical circulation.

Key words Yellow Sea Bottom cold water pool Upwelling Downwelling