

# 黄海冬季环流的数值模拟\*

刘 兴 泉

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

**提要** 在北黄海和渤海冬季环流数值研究的基础上, 利用其进一步改进的数值差分格式, 对整个黄海的冬季环流进行数值模拟。数模结果表明, 改进的差分格式完全保持了计算海区的总能量和总质量守恒。就环流的总趋势而论, 数值模拟结果与由观测资料所分析的结果几乎完全相同。黄海的环流系统主要由以下环流构成: 沿黄海槽北上的黄海暖流及其余脉, 分别沿东西两岸南下的西朝鲜沿岸流和黄海沿岸流, 黄海暖流及其余脉分别与东西沿岸流之间形成的反气旋和气旋环流。

**关键词** 黄海 环流 能量和质量守恒 气旋和反气旋环流

缪经榜等(1988, 1989)利用曾庆存等(1981)设计的差分格式, 对北黄海和渤海的冬季环流进行了数值模拟及动力学方面的研究, 并获得了令人满意的结果。为从动力学方面揭示整个黄海的环流系统及其结构, 本文在 Miao Jingbang 等(1988)的基础上, 结合海洋的实际, 对其差分格式作了进一步改进。为了能以较高的分辨率反映出整个黄海的环流分布特征, 并为了液边界处理上的方便, 将原来研究海区的北黄海保留, 往南加入了南黄海, 以期达到研究整个黄海冬季环流的目的。

1 研究海区地形特征

黄海属于最大水深只有 100m 左右的浅海。海底地形特征如图 1 所示, 其等深线普遍与海岸线呈平行趋势。就其水深的变化程度而言, 除了山东半岛北部和东端沿岸, 辽东半岛南部沿岸, 朝鲜半岛西部沿岸和东经 122°, 北纬 34° 附近海区的水深

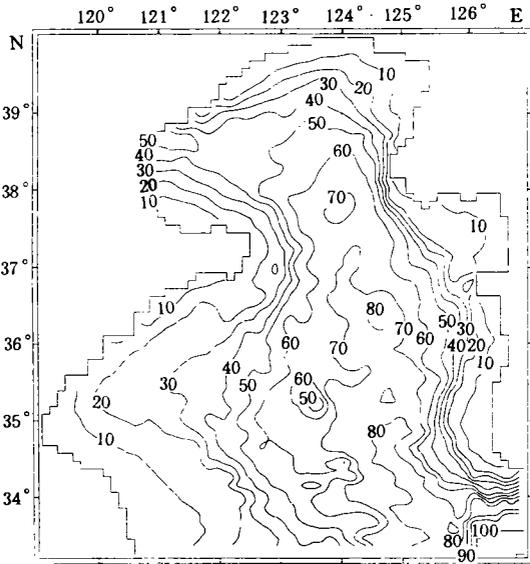


图 1 黄海的水深(m)分布

Fig. 1 Bathymetry of the Yellow Sea

\* 国家自然科学基金资助项目, 870129号。刘兴泉, 男, 出生于 1948 年 12 月, 助理研究员。

管秉贤教授曾给本研究以热情帮助和大力支持, 并审阅全文, 特此志谢。

收稿日期: 1995 年 6 月 20 日, 接受日期: 1995 年 10 月 24 日。

变化较显著外, 其余海区的水深变化均较缓慢。

黄海槽从黄海的中部偏东自南向北延伸, 在南黄海和北黄海的交界处, 由于东西岸界地形的突出, 使黄海槽在此变窄, 黄海槽延伸到北黄海洼地, 由洼地向西延伸, 与渤海海峡北部的老铁山水道衔接。黄海槽顺其自南向北的走向, 水深逐渐由深变浅。黄海的<sub>最大</sub>水深只有在南黄海济州海峡的局部海区达到 100m。而黄海槽自南向北逐渐由 90m 过渡到 50m, 渤海海峡北部的老铁山水道的水深约为 60m。除了大部分沿岸海区的水深较浅外, 北黄海的西朝鲜湾和南黄海的海州湾水深较浅, 水深一般为 20—30m。而在海州湾以南的江苏沿岸以东海域, 有一个水深大约为 15m 左右的浅滩。其它海区的水深一般为 40m。

## 2 数学模型

黄海属于水深变化较缓慢的浅海。冬季, 在来自北方冷空气的影响下, 使海水的温度和盐度自表层至底层大致均匀。因此, 运动方程和连续方程采用如下随深度平均的浅水方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_H \Delta u - \frac{1}{H+\zeta} \tau_x + \frac{gu(u^2+v^2)^{\frac{1}{2}}}{c^2(H+\zeta)} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_H \Delta v - \frac{1}{H+\zeta} \tau_y + \frac{gv(u^2+v^2)^{\frac{1}{2}}}{c^2(H+\zeta)} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [u(H+\zeta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(H+\zeta)]}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

方程中  $H$  为静止水深;  $\zeta$  为静止水面上的自由扰动;  $u, v$  为随深度平均流速的东分量和北分量;  $\tau_x, \tau_y$  为海面风应力的东分量和北分量;  $c$  为海底糙度系数;  $c = \frac{1}{n} H^{1/6}$ ,  $n$  为 Manning 系数;  $A_H$  是水平扰动扩散系数;  $\Delta$  是二维拉普拉斯算子; 公式中的其余变量符号均为通用。

## 3 差分格式

为了进一步提高差分格式在计算中的稳定性和准确性, 将 Miao Jingbang 等 (1988) 中的变量  $\varphi = g(H+\zeta+h_s)$  改为  $\varphi = g\zeta$ , 而  $\phi = (\varphi - gh_s)^{1/2}$  变为  $\phi = (gh + \varphi)^{1/2}$ , 并将该文献中的整点差分格式全部改为半点差分格式。

引入新变量:  $U = \phi u, V = \phi v, \varphi = g\zeta, \phi = (gh + \varphi)^{1/2}$  (4)

由关系式(4), 方程(1)—(3)变成:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( u \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial [uU]}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left( v \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial [vU]}{\partial y} \right) - fV + \phi \frac{\partial \varphi}{\partial x} - A_H \phi \Delta \left( \frac{U}{\phi} \right) - \frac{g}{\phi} \tau_x + \frac{g^2 U (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{c^2 \phi^3} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( u \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial [uV]}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left( v \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial [vV]}{\partial y} \right) + fU + \phi \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

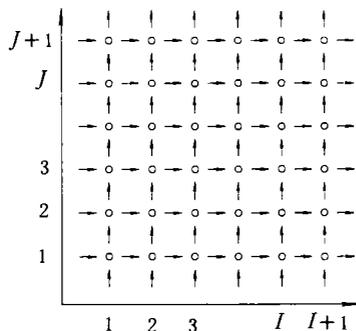


图2 计算网格中的变量配置

Fig. 2 Distribution of the variables in the computational grid

→:  $u, U, \tau_x$ ; ↑:  $v, V, \tau_y$ ; ○:  $\zeta, H, \phi, \Phi$ .

$$-A_H \Phi \Delta \left( \frac{V}{\Phi} \right) - \frac{g}{\Phi} \tau_y + \frac{g^2 V (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{c^2 \Phi^3} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial [U\phi]}{\partial x} + \frac{\partial [V\phi]}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

原来方程(1)~(3)是求未知数  $u, v$  和  $\zeta$ , 经变换后的方程(5)~(7)就变成了求未知数  $U, V$  和  $\phi$  的定解问题。待计算稳定后, 再利用关系式(4)最终求得  $u, v$  和  $\zeta$ 。为了求其数值解, 将所有变量按图2进行离散。

式(5)~(7)可以写成如下的有限差分方程:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\delta U}{\delta t} \right)_{i+\frac{1}{2}, j} + \frac{1}{2} \left( u \frac{\delta U}{\delta x} + \frac{\delta [uU]}{\delta x} \right)_{i+\frac{1}{2}, j} + \frac{1}{2} \left( v \frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta [vU]}{\delta y} \right)_{i+\frac{1}{2}, j} - [fV]_{i+\frac{1}{2}, j} \\ & + \left[ \phi \frac{\delta \phi}{\delta x} \right]_{i+\frac{1}{2}, j} - A_H \left[ \phi \Delta \left( \frac{U}{\Phi} \right) \right]_{i+\frac{1}{2}, j} - g \left[ \frac{\tau_x}{\Phi} \right]_{i+\frac{1}{2}, j} \\ & + \left( \frac{g}{c} \right)^2 \left[ \frac{U(U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{\Phi^3} \right]_{i+\frac{1}{2}, j} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\delta V}{\delta t} \right)_{i, j+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \left( u \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{\delta [uV]}{\delta x} \right)_{i, j+\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \left( v \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{\delta [vV]}{\delta y} \right)_{i, j+\frac{1}{2}} + [fU]_{i, j+\frac{1}{2}} \\ & + \left[ \phi \frac{\delta \phi}{\delta y} \right]_{i, j+\frac{1}{2}} - A_H \left[ \phi \Delta \left( \frac{V}{\Phi} \right) \right]_{i, j+\frac{1}{2}} - g \left[ \frac{\tau_y}{\Phi} \right]_{i, j+\frac{1}{2}} \\ & + \left( \frac{g}{c} \right)^2 \left[ \frac{V(U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{\Phi^3} \right]_{i, j+\frac{1}{2}} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left( \frac{\delta \phi}{\delta t} \right)_{i, j} + \left( \frac{\delta [U\phi]}{\delta x} \right)_{i, j} + \left( \frac{\delta [V\phi]}{\delta y} \right)_{i, j} = 0 \quad (10)$$

方程(8)~(9)各项的对应差分形式为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left( u \frac{\delta U}{\delta x} + \frac{\delta [uU]}{\delta x} \right)_{i+\frac{1}{2}, j} &= \frac{1}{4\Delta x} [(u_{i+\frac{3}{2}, j} + u_{i+\frac{1}{2}, j})U_{i+\frac{3}{2}, j} \\ &\quad - (u_{i+\frac{1}{2}, j} + u_{i-\frac{1}{2}, j})U_{i-\frac{1}{2}, j}] \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} \left( v \frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta[vU]}{\delta y} \right)_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{1}{4\Delta y} [(v_{i+1,j+\frac{1}{2}} + v_{i,j+\frac{1}{2}})U_{i+\frac{1}{2},j+1} - (v_{i+1,j-\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}})U_{i+\frac{1}{2},j-1}]$$

$$\frac{1}{2} \left( u \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{\delta[uV]}{\delta x} \right)_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4\Delta x} [(u_{i+\frac{1}{2},j+1} + u_{i+\frac{1}{2},j})V_{i+1,j+\frac{1}{2}} - (u_{i-\frac{1}{2},j+1} + u_{i-\frac{1}{2},j})V_{i-1,j+\frac{1}{2}}]$$

$$\frac{1}{2} \left( v \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{\delta[vV]}{\delta y} \right)_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4\Delta y} [(v_{i,j+\frac{3}{2}} + v_{i,j+\frac{1}{2}})V_{i,j+\frac{3}{2}} - (v_{i,j+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}})V_{i,j-\frac{1}{2}}]$$

$$\left( \frac{\delta[U\Phi]}{\delta x} \right)_{i,j} = \frac{1}{\Delta x} (U_{i+\frac{1}{2},j} \Phi_{i+\frac{1}{2},j} - U_{i-\frac{1}{2},j} \Phi_{i-\frac{1}{2},j});$$

$$\left( \frac{\delta[V\Phi]}{\delta y} \right)_{i,j} = \frac{1}{\Delta y} (V_{i,j+\frac{1}{2}} \Phi_{i,j+\frac{1}{2}} - V_{i,j-\frac{1}{2}} \Phi_{i,j-\frac{1}{2}});$$

$$\Phi_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{1}{2} (\sqrt{(gh+\varphi)_{i+1,j}} + \sqrt{(gh+\varphi)_{i,j}}); \quad \Phi_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{1}{2} (\sqrt{(gh+\varphi)_{i,j}} + \sqrt{(gh+\varphi)_{i-1,j}});$$

$$\Phi_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (\sqrt{(gh+\varphi)_{i,j+1}} + \sqrt{(gh+\varphi)_{i,j}}); \quad \Phi_{i,j-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (\sqrt{(gh+\varphi)_{i,j}} + \sqrt{(gh+\varphi)_{i,j-1}});$$

$$\left( \Phi \frac{\delta \varphi}{\delta x} \right)_{i+\frac{1}{2},j} = \Phi_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\Delta x}; \quad \left( \Phi \frac{\delta \varphi}{\delta y} \right)_{i,j+\frac{1}{2}} = \Phi_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{\Delta y};$$

$$[fV]_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{f}{4} (V_{i,j+\frac{1}{2}} + V_{i,j-\frac{1}{2}} + V_{i+1,j+\frac{1}{2}} + V_{i+1,j-\frac{1}{2}});$$

$$[fU]_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{f}{4} (U_{i+\frac{1}{2},j} + U_{i-\frac{1}{2},j} + U_{i+\frac{1}{2},j+1} + U_{i-\frac{1}{2},j+1});$$

$$\left[ \Phi \Delta \left( \frac{U}{\Phi} \right) \right]_{i+\frac{1}{2},j} \approx \frac{1}{\Delta x^2} (U_{i+\frac{3}{2},j} + U_{i-\frac{1}{2},j} - 2U_{i+\frac{1}{2},j}) + \frac{1}{\Delta y^2} (U_{j+\frac{1}{2},i+1} + U_{j+\frac{1}{2},i-1} - 2U_{j+\frac{1}{2},i});$$

$$\left[ \Phi \Delta \left( \frac{V}{\Phi} \right) \right]_{i,j+\frac{1}{2}} \approx \frac{1}{\Delta x^2} (V_{i+1,j+\frac{1}{2}} + V_{i-1,j+\frac{1}{2}} - 2V_{i,j+\frac{1}{2}}) + \frac{1}{\Delta y^2} (V_{i,j+\frac{3}{2}} + V_{i,j-\frac{1}{2}} - 2V_{i,j+\frac{1}{2}}).$$

在保证计算稳定性和准确性的基础上,为加快收敛速度,又将差分方程(8)~(10)分解成如下三个计算过程:

(1) 地转适应过程

$$\begin{cases} U_{i+\frac{1}{2},j}^I = U_{i+\frac{1}{2},j}^n + \Delta t_1 \left( [fV]_{i+\frac{1}{2},j}^I - \left[ \phi \frac{\delta \phi}{\delta x} \right]_{i+\frac{1}{2},j}^I \right) \\ V_{i,j+\frac{1}{2}}^I = V_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \Delta t_1 \left( [-fU]_{i,j+\frac{1}{2}}^I - \left[ \phi \frac{\delta \phi}{\delta y} \right]_{i,j+\frac{1}{2}}^I \right) \\ \phi_{i,j}^I = \phi_{i,j}^n - \Delta t_1 \left( \left[ \frac{\delta[U\phi]}{\delta x} \right]_{i,j}^I + \left[ \frac{\delta[V\phi]}{\delta y} \right]_{i,j}^I \right) \end{cases} \quad (11)$$

(2) 发展过程

$$\begin{cases} U_{i+\frac{1}{2},j}^n = U_{i+\frac{1}{2},j}^I - \Delta t_2 \left[ \frac{1}{2} \left( u \frac{\delta U}{\delta x} + \frac{\delta[uU]}{\delta x} \right) + \frac{1}{2} \left( v \frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta[vU]}{\delta y} \right) \right]_{i+\frac{1}{2},j}^n \\ V_{i,j+\frac{1}{2}}^n = V_{i,j+\frac{1}{2}}^I - \Delta t_2 \left[ \frac{1}{2} \left( u \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{\delta[uV]}{\delta x} \right) + \frac{1}{2} \left( v \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{\delta[vV]}{\delta y} \right) \right]_{i,j+\frac{1}{2}}^n \\ \phi_{i,j}^n = \phi_{i,j}^I \end{cases} \quad (12)$$

(3) 耗散过程

$$\begin{cases} U_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = U_{i+\frac{1}{2},j}^n + \Delta t_3 \left( A_H \left[ \phi \Delta \left( \frac{U}{\phi} \right) \right] + g \left[ \frac{\tau_x}{\phi} \right] - \left( \frac{g}{c} \right)^2 \left[ \frac{U(U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{\phi^3} \right] \right)_{i+\frac{1}{2},j}^n \\ V_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = V_{i,j+\frac{1}{2}}^n + \Delta t_3 \left( A_H \left[ \phi \Delta \left( \frac{U}{\phi} \right) \right] + g \left[ \frac{\tau_y}{\phi} \right] - \left( \frac{g}{c} \right)^2 \left[ \frac{V(U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{\phi^3} \right] \right)_{i,j+\frac{1}{2}}^n \\ \phi_{i,j}^{n+1} = \phi_{i,j}^n \end{cases} \quad (13)$$

4 数值计算的实施

按照图 2 所示的变量配置，将研究海区按经向和纬向分割成 67×63 个等距正方形网格，网格距 ΔX=Δy=11km，将变量分别离散于对应的网格节点上，使 u 和 U 置于东西边界，v 和 V 置于南北边界。根据东西固体边界的 u=0 和南北固体边界的 v=0，给出对应固体边界上的 U=0 和 V=0。由东西液体边界的 u=u\* 和南北液体边界的 v=v\*，给出对应液体边界上的 U=φu\* 和 V=φv\*。

实验证明，模拟海区液边界值给的正确与否，对海区的能量守恒和质量守恒是至关重要的。如果液边界处的值给的不合理，也就是说，通过各液边界流入和流出海区的总水量不平衡，将永远不能使海区的流场和水位场趋于稳定，而最终导致计算失败。对于一个完全封闭海区，因周边固体边界的总流量和总水位都等于零，海区的流场和水位场将严格守恒。黄海液边界值是根据通过各液边界进出海区的总水量相等的原则给出的。渤海海峡处的液边界值由 Miao Jingbang 等 (1988) 的计算结果给出 U\*。济州海峡处的液边界值 U 和黄海南部液边界值 V 是用液边界处的部分观测资料，并根据管秉贤 (1957, 1962) 所论述的环流分布趋势和量级，经过线性内插并调整后给出对应的 U\* 和 V\*。

计算海区的风应力场，北黄海直接用 Miao Jingbang 等 (1988) 的结果，而南黄海根据所提供的资料仍用 Miao Jingbang 等 (1988) 的处理方法得到。

在计算中，取  $A_H = 10^6$ ,  $n = 0.0033$ 。海区的初始条件取  $U = V = \varphi = 0$ 。经试验，三个分解过程的时间步长分别取  $\Delta t_1 = 40s$ ,  $\Delta t_2 = 200s$ ,  $\Delta t_3 = 600s$ 。为保持三个计算过程的积分时间同步，即在一个大循环中有相同的  $\Delta T$  (计算中取  $\Delta T = 600s$ )。因此，三个过程的迭代次数分别为 5 次，3 次和 1 次。

### 5 计算结果与分析

在整个数值模拟的实施中，不需采取任何平滑措施，经过约 4d 的积分时间，就可使计算结果满足给定误差。获得了令人非常满意的流场和对应的水位场，其流场与主要对应流系如图 4a 和 图 4b 所示。

管秉贤 (1984)<sup>1)</sup> 在论述中国海的

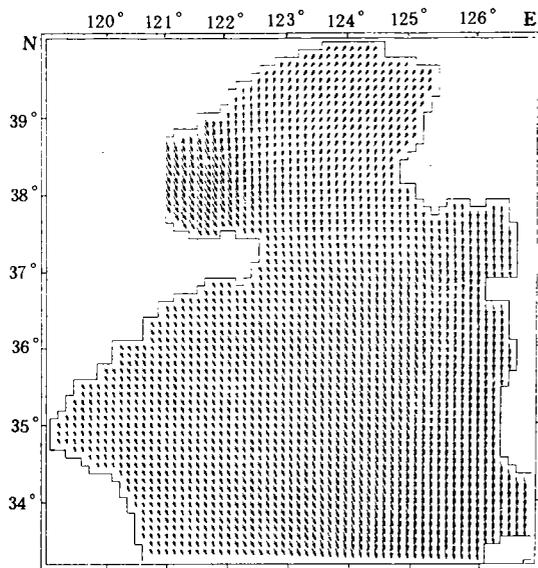


图 3 计算海区的风场分布  
Fig. 3 Wind pattern of the computational sea area

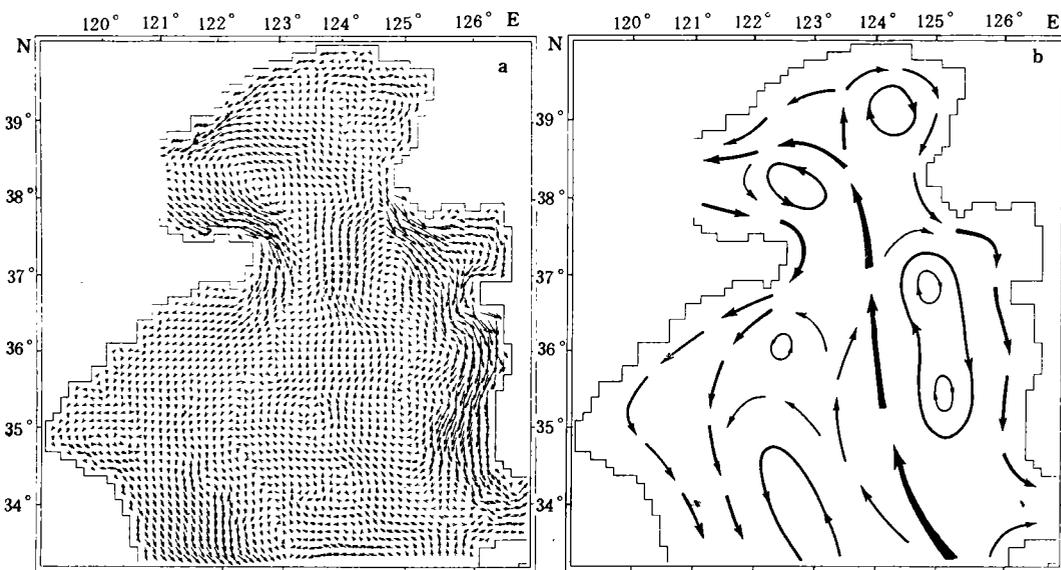


图 4 黄海冬季环流数值模拟结果(a)及其主要流系示意图(b)  
Fig. 4 The wintertime circulation modelling (a) of the Yellow Sea and its schematic representation (b)

1) 中国科学院海洋研究所, 1984, 渤海黄海东海调查研究报告, 116—140.

环流系统中指出：黑潮分支对马暖流在济州岛东南分成两支，其主支经对马海峡和朝鲜海峡进入日本海，其分支转向西北，在济州岛西南插入南黄海，称为黄海暖流，黄海暖流沿黄海东部北上，到北黄海延伸成为黄海暖流余脉。黄海暖流及其余脉与黄海沿岸流构成了黄海环流。暖流北上，沿岸流一般南下(见图 5)。

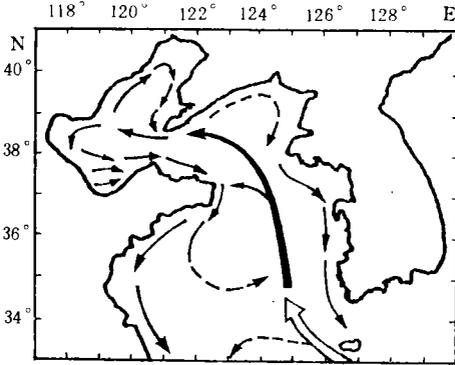


图 5 黄海环流示意图(管秉贤, 1984)<sup>1)</sup>

Fig. 5 Schematic representation of the Yellow Sea circulation in wintertime (from Guan, 1984)

图 4 表明，本海区的主要流系；黄海暖流及其余脉、辽东南部沿岸流、黄海西部沿岸的黄海沿岸流、西朝鲜沿岸流，黄海暖流及其余脉与黄海沿岸流之间的气旋式环流和黄海暖流及其余脉与西朝鲜沿岸流之间的反气旋式环流构成了黄海冬季环流的主体。对照图 4b 和图 5，黄海冬季的环流系统，本文的数值结果同管秉贤 (1984)<sup>1)</sup> 所论述及绘出的流系示意图几乎完全相同。

以来自外海的暖流作为入流条件，黄海暖流从济州岛西南进入南黄海后，其东

边济州岛西岸的流即绕过济州岛，从济州海峡南部进入日本海，然后，暖流向西北方向流动，大约在东经 123° 30'，北纬 34° 30' 附近海区，由于受海底凸起地形的影响，黄海暖流西边分出一个支流，这个支流的一部分作反时针旋转，在南黄海的西南部形成了一个气旋式环流，使黄海暖流首先受到了削弱。另一部分绕过凸起地形后，又汇集到黄海暖流中去。减弱后的黄海暖流沿黄海槽北上，在进入北黄海之前，由于南黄海和北黄海分界处东西两岸地形的突出，使黄海槽在此变窄，在该处海底地形和偏北风的作用下，使黄海暖流再次受到削弱。其东部分出一个分支，这个分支作顺时针旋转，在南黄海东部的狭长区域形成了一个南北长约三个纬度，东西宽约一个经度的近似椭圆形的反气旋环流。而在这个反气旋环流短轴的两侧又各有一个小的反气旋环流。减弱后的黄海暖流称为黄海暖流余脉。黄海暖流余脉进入北黄海，在北黄海洼地分成两个支流：其主支——减弱后的黄海暖流余脉，沿西转的黄海槽流动，其中一部分作反时针旋转，在北黄海的西南部形成一个气旋环流；另一部分经渤海海峡北部的老铁山水道进入渤海。在北黄海洼地，由黄海暖流余脉分出的另一个支流继续北上，由于受到北部岸界的阻挡，在辽东半岛与朝鲜半岛的分界处又分成东西两支，其西支——辽东南部沿岸流，沿辽东半岛南部沿岸向西南流动，在渤海海峡北部的老铁山水道与减弱的黄海暖流余脉汇合，一同流入渤海，构成渤海的环流系统。其东部分支，一部分作顺时针旋转，在北黄海的西朝鲜湾形成一个反气旋环流。而另一部分——西朝鲜沿岸流，则沿岸边向东流动，绕过西朝鲜湾湾顶，沿朝鲜半岛西岸南下，在朝鲜半岛南端东拐，从济州海峡进入日本海。

从渤海海峡南部进入北黄海的渤海南部沿岸流沿山东半岛北部沿岸向东，成为黄海

1) 中国科学院海洋研究所, 1984, 渤海黄海东海调查研究报告, 116—141。

沿岸流的起始部分, 它绕过山东半岛后, 沿山东半岛南部沿岸向西南流动, 在南黄海的海州湾以北分成两支, 一支南下, 另一支沿岸边流动, 这两支流又将在海州湾以南汇合, 从江苏沿岸东部海区流入东海。

黄海暖流及其余脉和沿岸流的形成原因, 主要是在偏北风的作用下, 外海入流与海底地形的耦合效应。暖流北上, 沿岸流南下, 流的流动趋势普遍与海底等深线平行。涡旋的生成原因, 主要是由于逆向流系的切变效应, 黄海暖流在北上途中, 由于受地形的影响, 在其两边产生支流, 由于北上暖流和南下沿岸流的切变效应, 使西边的支流在暖流及其余脉与黄海沿岸流之间形成气旋环流, 而使东边的支流在暖流及其余脉与西朝鲜沿岸流之间形成反气旋环流。

由于模拟的是风应力作用下的水深平均流, 一般来讲, 水深大的海区流速小, 水深小的海区流速大, 就整个黄海的水深分布, 一般沿岸区域较浅, 中央区域较深。就中央区域的水深分布而言, 南黄海槽的水深大于北黄海槽的水深。由图 4 可以看出, 沿岸流的流速一般比黄海暖流及其余脉的流速大, 而黄海暖流余脉的流速比黄海暖流的流速大。

流的强弱与海区的水深变化有着密切的关系, 水深变化大的海区流幅窄, 流速强。而水深变化小的海区, 流幅宽, 流速弱。对照图 4a 和图 1, 可以看出, 辽东半岛南部沿岸、朝鲜半岛西部沿岸、山东半岛北部及东端沿岸和东经 122°, 北纬 34° 附近海区, 其等深线变化较显著。这些海区的流幅窄, 流速强, 一般流速约为 20cm/s。而在山东半岛东端沿岸和朝鲜半岛西部沿岸, 其最大流速约可达 32cm/s。在北黄海的西朝鲜湾、南黄海的海州湾及其以南和南黄海槽, 由于等深线变化较缓慢, 因此, 这些海区的流幅宽, 流速弱, 一般流速约为 10cm/s。而在流幅最宽, 流速最弱的海州湾附近海域, 流速只有 2cm/s。随着黄海槽自南向北的逐渐变窄和水深的逐渐变浅, 黄海暖流及其余脉的流幅也逐渐由宽变窄, 流速由弱变强。在南黄海和北黄海分界处的暖流流速、北黄海暖流余脉的流速, 约可达 15cm/s。整个海区中涡旋中心的流速最弱, 其流速不到 1cm/s。

在数值模拟中获得了如图 6 所示的与海区流场对应的海面水位场。由图 6 可以看出, 有两条标为零大致东西走向的标准海平面等值线。一条在北黄海的山东半岛北部沿岸; 另一条在南黄海, 自海州湾湾顶向东南延伸到东经 123°, 北纬 34°, 又向北偏东延伸, 到达南黄海和北黄海的交界处再向南偏东, 一直延伸到朝鲜半岛南端的岸界。以这两条标准

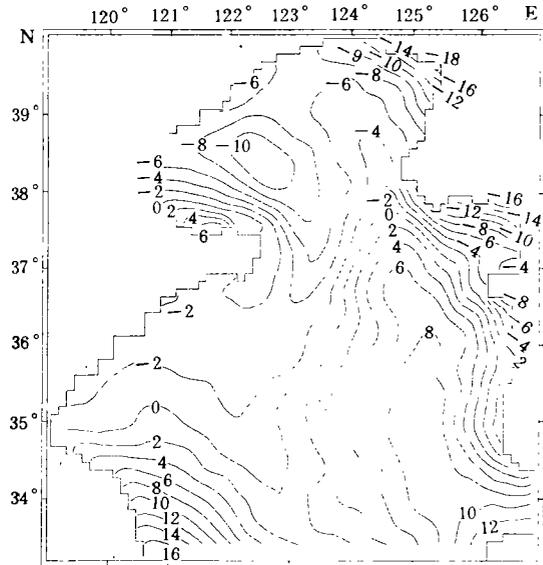


图 6 数值模拟的海区水位场(m)

Fig. 6 Water level field (in cm) of the Yellow Sea from numerical simulation

海平面等值线为界, 整个海区的水位场被分成正值与负值面积大约相等的两部分, 正值表示海面上升, 即为海区增水; 负值表示海面下降, 即为海区减水; 而且海区的增水等于减水。

冬季, 整个海区在偏北风的控制下, 加之由渤海海峡南部流入的渤海南部沿岸流, 使海区的水体由北向南输送。由于通过各液边界流入和流出海区的水量相等, 整个海区的总水量守恒, 必然导致海区北部减水, 南部增水, 从而使整个海区北部水位下降, 南部水位上升, 海平面大致呈南高、北低的南北倾斜趋势。海区水体在由北向南的输送过程中, 由于黄海暖流及其余脉沿黄海槽北上, 不但使海区北部的减水不断得到补偿, 而且迫使北部水体从黄海暖流及其余脉两侧向南输送。当整个海区的流场和水位场趋于稳定, 向北和向南的水体通量达到平衡, 整个海区的减水等于增水。由图 6 可以看出, 在黄海暖流及其余脉北上途中, 暖流及其余脉流经区域海面出现与黄海槽走向一致的脊状凸起, 而在东西两岸沿岸流南下途中, 海面各出现谷状下凹。由图 6 还可以看出, 在黄海沿岸流南下过程中, 由于先后受到山东半岛北部岸界和江苏大陆向东突出岸界的影响, 在以上两个区域又相继呈现海面水位上升。

海面水位的变化与海区地形、海面风场分布和海区流场的强弱有密切的关系。在地形影响大、流速强和流与风逆向海区的面倾斜幅度大; 反之, 海面倾斜幅度小。对照图 6、图 4 a 和图 3, 在山东半岛北部及东端沿岸、江苏大陆东部沿岸、朝鲜半岛西部沿岸、西朝鲜湾以及在进入北黄海之前的黄海暖流流经区域的海面, 倾斜幅度均较大; 而其它海区的面倾斜幅度均较小。整个海区的最大减水在北黄海的西朝鲜湾湾顶和南黄海的东北角, 其中西朝鲜湾湾顶的最大减水可约达 20cm。最大增水在南黄海的江苏大陆东部沿岸和南黄海槽。而江苏大陆东部海区的最大增水约为 16cm。

## 6 结论

黄海的环流系统主要由以下环流构成: 沿黄海槽北上的黄海暖流及其余脉, 分别沿东西两岸南下的西朝鲜沿岸流和黄海沿岸流, 黄海暖流及其余脉与西朝鲜沿岸流和黄海沿岸流之间的反正旋环流和正旋环流。黄海暖流及其余脉, 西朝鲜沿岸流和黄海沿岸流形成的主要原因, 是由于在偏北风作用下, 外海入流与地形耦合效应的结果。气旋环流与反气旋环流的形成, 则主要是由于逆向流系的切变效应所致。由模拟的环流场和水位场证实, 本差分格式完全保持了整个研究海区的总能量和总质量守恒。而能量和质量守恒的根本保证是通过各液边界流入和流出海区的水体平衡。

## 参 考 文 献

- 曾庆存、张学洪, 1981, 中国科学, 11: 1 355—1 366。  
管秉贤, 1957, 海洋与湖沼, 1: 95—122。  
管秉贤, 1962, 海洋与湖沼, 4: 121—141。  
缪经榜、刘兴泉, 1989, 海洋学报, 11(1): 15—22。  
Miao Jingbang, Liu Xingquan, 1988, *Oceanol. et Limnol. Sin.*, 6: 216—226。

## NUMERICAL SIMULATION OF THE YELLOW SEA WINTERTIME CIRCULATION

Liu Xingquan

*(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)*

**Abstract** Data of the wintertime circulation of the Northern Yellow Sea and the Bohai Sea (Miao et al., 1988, 1989) were used for numerical simulation for the whole Yellow Sea using improved numerical difference scheme. The computational results showed that the difference scheme completely keeps the conservations of the energy and volume of the seawater in the sea areas. Recording the major tendency of the circulation, the numerical results agree well with the analysed results from observation data. The Yellow Sea circulation system mainly consists of the Yellow Sea Warm Current flowing northward along the Yellow Sea Trough, the Western Korean Coastal Current and the Yellow Sea Coastal Current flowing southward along the eastern and western coasts of the Yellow Sea, respectively. The Yellow Sea Warm Current and its extension form anticyclonic and a cyclonic circulations respectively with eastern and western coastal currents.

**Key words** Yellow Sea Circulation Energy mass conservations Cyclonic and anticyclonic circulations