

渤海冬季环流的数值研究

刘兴泉 缪经榜

季仲贞

(中国科学院海洋研究所)

(LASG, 中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用一个等距、跳点、隐式的总能量守恒型差分方案,对渤海冬季环流进行数值研究。计算结果和海上观测的一致性令人满意的,对于渤海冬季环流的形成机制和黄海暖流余脉的影响也作了十分有意义的探讨。

一、引 言

渤海是我国近海最北端的一个内陆海,只有宽仅 56 n mile 左右的渤海海峡与北黄海相通。因此,渤海在气候上具有显著的“大陆性”,在位置上具有典型的“孤立性”。渤海的水文气象特征,按其季节划分,大体上可归纳为三种类型。10月至3月为冬季型,6月至8月为夏季型,4—5月和9月为过渡型。渤海的水深分布如图1所示,除渤海海峡北半部的水深大于 30 m 外,其余大部分水域的水深不超过 30 m。

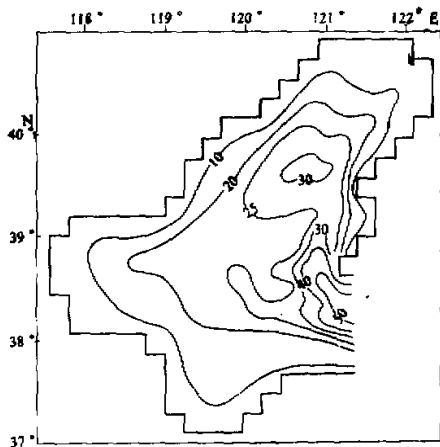


图1 渤海水深图

近 30 年来,对渤海已初步积累了一定数量的观测资料,但长系列连续观测资料很少,而大范围同步观测资料就更少,以至迄今仍十分缺少较精细的逐月平均水文气象因子的分布图,因此对渤海环流基本特征和演变规律的认识,还有待于进一步的海上观测和调查研究。毛汉礼等(1958)¹⁾曾对渤海水文气象要素的分布特征作了综合性的调查研究。管秉贤等(1977)¹⁾根据国内外已经发表的表面流多年观测资料,绘制了“渤、黄、东海表层海流图”。近年来,不少国内外学者利用数值模型对中国近海的环流基本特征和演变机制开展了动力学研究,并取得可喜的进展。

本文利用我们设计的浅海环流数值模型以探讨渤海冬季环流的基本规律,考虑到渤海的水深普遍较浅,本文采用完备的流体力学浅水运动原始方程组,数值计算的差分方案是在曾庆存教授直接指导下所设计的跳点、隐式总能量守恒型差分格式(将另文详细

1987年8月8日收到,12月25日收到修改稿。

1) 渤海及北黄海西部综合调查研究,中国科学院海洋研究所。

介绍), 这格式其实是将曾庆存设计的大洋环流格式^[9]用到有限海域中来, 初步的计算已取得很好的结果^{[1], [10]}. 本文是用更完善的资料作计算, 并在具体的格式上作了一些改进. 本文数值研究结果表明: 渤海的冬季总环流是由海区北半部的反气旋环流和南半部的气旋环流所组成, 这与管秉贤等^[1]所绘制的实测海流图的总趋势相当一致. 为了进一步探讨渤海环流的形成机制, 本文还阐述了黄海暖流及其余脉的影响, 还分析了非线性平流项、侧向摩擦和底摩擦项等的动力学效应.

二、数学模型

1. 原始方程组和定解条件

渤海冬季处在强劲的偏北风控制下, 海面风力搅拌和表层海水的冷却, 导致浅水区域的海水密度垂直分布均匀; 水文观测资料表明, 在水平方向上, 海水密度虽有某些梯度存在, 但量值较小且分布范围有限, 作为近似仍可初步假设海水密度水平分布均匀.

在 (x, y, z) 直角坐标系下, 海水密度为常值, 深度平均的浅水运动方程和连续性方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_H \Delta u - \frac{1}{H+\zeta} \tau_x + \frac{g u (u^2 + v^2)^{1/2}}{C^2 (H+\zeta)} = 0 & (1) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_H \Delta v - \frac{1}{H+\zeta} \tau_y + \frac{g v (u^2 + v^2)^{1/2}}{C^2 (H+\zeta)} = 0 & (2) \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [u(H+\zeta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(H+\zeta)]}{\partial y} = 0 & (3) \end{cases}$$

其中 $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, u 和 v 为深度平均的海流分量, ζ 为相对于平均海平面的自由海面升高, H 为水深, τ_x 和 τ_y 为海面风应力分量; C 为粗糙度系数, 且取 $C = \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}}$, n 是 Manning 系数; A_H 为水平涡动系数.

浅水方程组 (1) — (3) 相应的固体边界条件取流速为零, 液体边界条件取流速的给定值; 由于缺少同步观测资料其初始条件取 u, v 和 ζ 均为零值.

2. 差分方程及其解法

自本世纪 60 年代以来, 国外已出现不少关于计算浅水运动原始方程的差分格式, 诸如 Arakawa (1966)^[2], Brettschneider [1967]^[3], Bryan [1969]^[4], Leendertse (1970)^[5]; 近年来, 国内不少学者已开始采用上述差分格式, 从事中国海潮汐、潮流、风暴潮、污染物漂移和海流的数值研究, 并取得一定成果. 为了发展我国自己的“计算格式”, 我们在以前工作的基础上^[9, 10]作了进一步改进. 具体作法大致如下: 令

$$U = \Phi u, V = \Phi v, \varphi = g(H + \zeta + h_s), \Phi = (\varphi - gh_s)^{1/2} \quad (4)$$

1) 刘兴泉等, 近岸海流数值计算, 1984, 全国地球流体力学学术会议报告(舟山).

其中 h_s 为海底地形高度, 相当于海底至海底以下某一个水平面(基准面)的距离, 借助于关系式(4), 方程组(1)~(3)可转换成

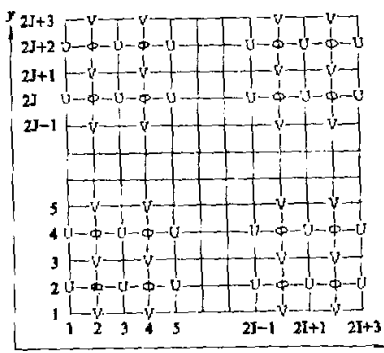
$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(u \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial[uU]}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(v \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial[vU]}{\partial y} \right) - fV + \Phi \frac{\partial \varphi}{\partial x} - A_H \Phi \Delta \left(\frac{U}{\Phi} \right) \\ & \quad - \frac{g}{\Phi} \tau_x + \frac{g^2 U (U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2 \Phi^3} = 0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(u \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial[uV]}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(v \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial[vV]}{\partial y} \right) + fU + \Phi \frac{\partial \varphi}{\partial y} - A_H \Phi \Delta \left(\frac{V}{\Phi} \right) \\ & \quad - \frac{g}{\Phi} \tau_y + \frac{g^2 V (U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2 \Phi^3} = 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial[U\Phi]}{\partial x} + \frac{\partial[V\Phi]}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

方程组(5)~(7)与其相应的边界条件和初始条件就组成了求解未知量 U , V 和 φ 的定解问题。为了求其数值解, 将 (x, y) 空间划分为如图 2 所示的等距正方形网格单元, U , V 和 φ 点分置于网格节点上(如图 2 所示)。与方程组(5)~(7)相应的差分方程组

可写为:



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

图 2 坐标和网格

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

$$\left(\frac{\delta \varphi}{\delta t} \right)_{2i, 2j} + \left(\frac{\delta[U\Phi]}{\delta x} \right)_{2i, 2j} + \left(\frac{\delta[V\Phi]}{\delta y} \right)_{2i, 2j} = 0 \quad (10)$$

其中

$$\frac{1}{2} \left(u \frac{\delta U}{\delta x} + \frac{\delta[uU]}{\delta x} \right)_{2i+1,2j} = \frac{1}{8\Delta x} \left[(u_{2i+3,2j} + u_{2i+1,2j})U_{2i+3,2j} - (u_{2i+1,2j} + u_{2i-1,2j})U_{2i-1,2j} \right]$$

$$\frac{1}{2} \left(v \frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta[vU]}{\delta y} \right)_{2i+1,2j} = \frac{1}{8\Delta y} \left[(v_{2i+2,2j+1} + v_{2i,2j+1})U_{2i+1,2j+2} - (v_{2i+2,2j-1} + v_{2i,2j-1})U_{2i+1,2j-2} \right]$$

$$\Phi_{2i+1,2j} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(\varphi - gh_s)_{2i+2,2j}} + \sqrt{(\varphi - gh_s)_{2i,2j}} \right)$$

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

$$\left[\Phi \Delta \left(\frac{U}{\Phi} \right) \right]_{2i+1,2j} \approx \frac{1}{4\Delta x^2} [U_{2i+3,2j} + U_{2i-1,2j} - 2U_{2i+1,2j}] \\ + \frac{1}{4\Delta y^2} [U_{2i+1,2j-2} + U_{2i+1,2j+2} - 2U_{2i+1,2j}]$$

其余各项的差商均可如法泡制,凡时间导数项均采用向前差商,而空间导数项则采用中心差商。

为了确保计算的稳定性和尽可能地节省机时,本文采用分解计算方法^[10,11],将差分方程组(8)~(10)分解成下列三个计算子过程:

1) 地转适应过程

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

2) 演变过程

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

3) 耗散过程

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

3. 数值计算的实施

为了确定海面风场, 本文主要依据的是张美芳等 (1963)^[6] 的研究结果. 由于该项研究尚缺辽东湾北部和莱州湾两个局部区域的风场资料, 我们分别参考了管秉贤等 (1964)^[1] 和张必成等 (1976)^[2] 的研究结果; 前者是利用 1959 年全国海洋普查资料统计的月平均风场, 后者是采用 1958—1967 年十年海上平均气压计算的地转风场, 应用 A. N. 索尔金娜的经验表格, 根据海区的水气温差, 算得近海面 6 米处的风场. 所采用的风应力计算公式为:

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho C_D (|\vec{W}| W_x, |\vec{W}| W_y) \quad (14)$$

其中 C_D 为曳力系数, 取值为

$$C_D = \begin{cases} (0.87 + 0.06 |\vec{W}|) \times 10^{-3} & |\vec{W}| \leq 10 \text{ m/s} \\ (1.10 + 0.05 |\vec{W}|) \times 10^{-3} & |\vec{W}| > 10 \text{ m/s} \end{cases}$$

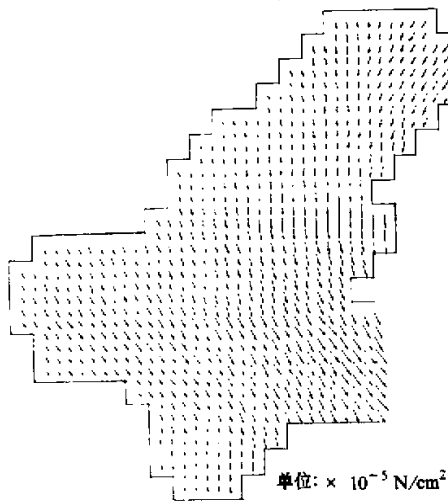


图3 渤海冬季海面风应力场

关系式 (14) 中的 $|\vec{W}|$ 为海面附近风速. 依据上述所收集的资料和研究成果, 其一月份多年平均风应力分布图如图3所示, 并以此作为渤海冬季海面风场的典型代表. 由于是月平均, 其风速值无疑要低于寒潮大风过境时的值.

海区的液体边界被置于渤海海峡, 其液体边界值本文参照 Hsueh (1986)^[7] 的计算, 以及为本文作准备的大海区数值计算的结果. 固体边界与流速分量的节点相一致, 海区东、西部固体边界被置于 U 点处, 海区南、北部固体边界被置于 V 点处; 则相应的固体边值可分别取为 $U=0$ 和 $V=0$. 本文所采用的计算时间步长分别为 $\Delta t=4 \text{ min}$,

- 1) 黄东海环流的研究, 中国科学院海洋研究所资料室.
2) 黄渤海十年平均风场, 中国科学院海洋研究所资料室.

$\Delta t_2 = \Delta t_3 = 20$ min. 空间步长取 $\Delta x = \Delta y = 12$ km. 水平涡动粘滞系数取 $A_H = 10^6$, Manning 系数取 $n = 0.02$, 这是考虑到底摩擦中潮流非线性效应的影响.

在给定稳定风场的条件下, 由开始计算经过 2 天就接近平均环流场, 为了获取最终的稳定解, 本文一般取 5—7 天的计算结果.

三、结果和讨论

1. 渤海冬季环流的基本特征

渤海冬季环流的数值结果如图 4 所示, 它表明渤海冬季环流的总趋势和文献[1] 所示的观测结果相当一致. 图 5 是管秉贤等^[1] 依据实测资料所绘制的渤海冬季环流趋势图 (表层海流图). 不难看到, 两幅图所示的环流系统基本相符. 冬季外海水经渤海海峡北部的深水一侧进渤海中央区后, 主流在中央区的西侧接近 20 m 等深线处分成南北两支. 北支沿辽东湾西侧北上, 流向几乎和等深线平行, 绕过湾顶后, 再沿辽东湾东侧南下, 形成反气旋流动; 对应于辽东湾西侧的陆架宽、坡度缓, 而东侧的陆架窄、坡度陡, 其反气旋流动是西侧北上的流幅宽、流速弱, 而东侧南下的流幅窄、流速强. 南支超过 20 m 等深线继续向西延伸并进入渤海湾, 绕过湾顶后, 折向南, 再沿渤海湾南岸向东, 穿过莱州湾北翼, 经渤海海峡南部流入北黄海, 形成气旋流动. 北部的反气旋流动和南部的气旋流动构成了渤海冬季环流系统的主体.

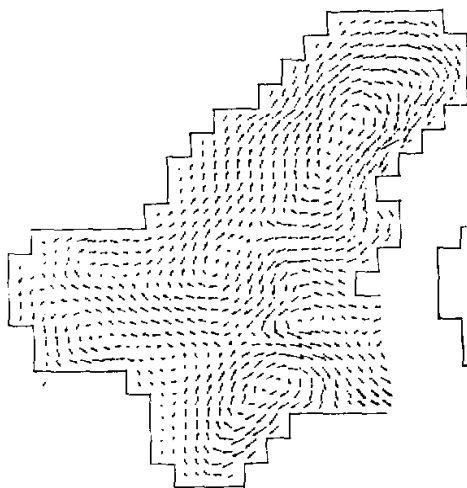


图 4 渤海冬季环流场

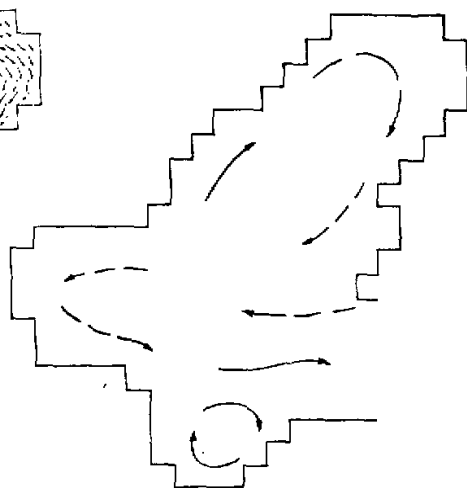


图 5 渤海冬季表层实测海流图^[1]

北支的反气旋流动存在大小不等的两个近乎封闭状的涡. 北面那个大的反气旋涡的中心部分恰好对应着辽东湾内封闭的 30 m 等深线, 而位于偏南的那个较小的反气旋涡则几乎被仅有一面开口的 25 m 等深线所包围. 莱州湾内明显地存在着一个局地反气旋涡, 这可能与莱州湾的形状及局部环流的配置有关.

图 4 还表明:辽东湾的东岸、渤海海峡的南部以及莱州湾的东翼为平均流的三大强流区(垂直平均流速大于 10 cm/s),最大平均流速可达 15 cm/s ,多分布在强流区的浅水段。辽东湾的中部、渤海中央区的北部以及渤海湾的西部等处流速较弱,渤海海峡北部的人流,其平均流速虽未达到强流速值,但因水深大,总的人流体积输运(全流)仍居整个渤海之冠。

渤海冬季水位场的计算结果表明,水位的升降趋势完全和流场相适应,辽东湾北部减水最剧,渤海湾的西部和北部也有显著减水,增水最大处为莱州湾的南部和东部,渤海中央区的东翼和渤海海峡的南端也出现不同程度的增水。

2. 辽东湾东侧南下海流的去向

数值结果表明,冬季辽东湾内确实存在一范围较大的反气旋环流,辽东湾西侧北上的海流,其源头连结着渤海中央区自东向西的主流,这一点是比较清楚的;可是,辽东湾东侧南下海流的去向,却一直是一个有待进一步探讨的问题。由于缺乏足够的海上观测资料,对这种南下海流的去向有三种意见:一种认为自渤海海峡的北端流入北黄海;另一种认为这支海流自辽东湾南下,由于水温低海水密度较大,当流至辽东湾南端时,可能下沉而由深层经渤海海峡南部进入北黄海;第三种意见是这支海流仅以反气旋涡动形式在辽东湾内回旋。管秉贤等^[6]认为:就平均情况而言,北黄海的外海水是经年由渤海海峡北部进入渤海的,而自渤海流入北黄海的渤海水经年是由海峡南部流出的,本文的计算结果正好支持了这一推断。

图 4 表明:辽东湾东侧的南下海流(即辽东沿岸流)至 40°N 附近、长兴岛以北海域,就有一部分流动加入到海湾北面那个大的反气旋涡中,而另一部分流动则继续南下至 39°N 附近,几乎沿着大回旋的 25 m 等深线流动;其中只有一部分随同海峡北部的人流继续西进,而剩余部分仍旧沿 25 m 等深线拐向东南,最终经渤海海峡的南部流出渤海。值得指出的是,外海水自海峡北部进入渤海后并非全部流向渤海中央区,其中有部分流动在抵达 25 m 等深线后,就汇同南下的辽东沿岸流立即拐向东南,直接经海峡南部流入北黄海。

3. 关于“黄海暖流余脉”的初步探讨

冬季,外海水自渤海海峡的北部进入渤海,并向中央区内部纵深发展,其动力机制的探讨一直是令人感兴趣的。管秉贤^[8]曾指出:“不分冬、夏,凡由北黄海进入渤海的高盐水均称为黄海暖流余脉”。多年来,由于海洋观测手段的限制,现有的观测资料,尚不足以阐明“黄海暖流余脉”的真象,不少学者认为暖流余脉宛如“喷射”型式的流动,自海峡“喷口”进入渤海后,沿渤海中央区西流,并形成渤海环流的主干。本文通过流体力学数值模拟,对这个问题提出了一个不太成熟的新看法。为了探讨“暖流余脉”对冬季渤海环流的影响,本文不是在数值模拟中直接封死渤海海峡——把渤海误作为封闭海来处理;而是在包括渤海在内的黄、渤海合在一起的大海区数值模拟中,假想地关闭了南、北黄海之间最狭窄的通道口,即闸住了山东省成山头至朝鲜的长山串之间的海洋断面。由于“黄海暖流”本身不能自南黄海进入北黄海,则“黄海暖流的余脉”也

就不可能自北黄海经渤海海峡以“喷射”型式进入渤海了。图 6 为成山头至长山串海洋断面不存在水交换时渤海冬季环流的分布图。比较图 4 和图 6, 不难发现两者的环流几乎处处一致, 甚至流速量值也相差无几。这表明渤海冬季环流几乎和“黄海暖流余脉”关系不大。自南黄海经成山头至长山串的海洋断面进入北黄海的“黄海暖流及其余脉”, 只能影响北黄海的环流分布, 而涉及不到渤海海峡, 这一结论至少在冬季是基本成立的。

冬季, 渤海正处于强劲的偏北风控制下, 整个渤海在所谓的“Spin-up”阶段, 必然会出现水位下降, 大量的海水将经渤海海峡注入北黄海。考虑到海区的水量守恒, 在“Spin-up”阶段的后期应有外海水自北黄海回流进渤海, 以补偿渤海所流失的水量。当渤海环流达到相对稳定时, 整个渤海的水量收支也就取得相对的平衡, 此时“Spin-up”阶段结束。因此, 冬季外海水自海峡北部进入渤海, 就本文的均匀模式假设而言, 应当是风生补偿流的形式, 它是冬季偏北风场的间接效应。如果冬季渤海海峡的东侧分布着水平梯度不大的高盐水, 那么随着风生补偿流的平流效应, 其外海的高盐水将被风生平流带进渤海中央区, 并形成盐度的舌状分布, 管秉贤^[6]把这种盐度的舌状分布称作“黄海暖流余脉”, 并取名为“射形流”。因此, 本文初步认为: 冬季若考虑海水盐度轻微的水平分布不均匀性, 则“黄海暖流余脉”的形成机制可能是风生补偿流的平流效应; 而盐度本身的平流和扩散效应, 相对于风生效应, 可能是次要的。当然, 要确证这一结论, 还有待于今后进一步对密度场的斜压模式进行数值研究。

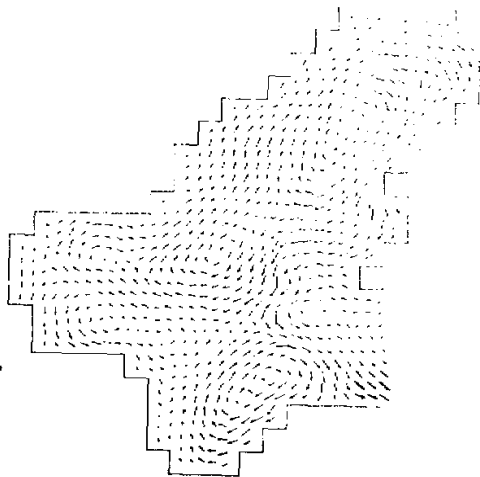


图 6 不考虑黄海暖流入侵的渤海冬季环流图

4. 对非线性效应和摩擦效应的讨论

为了探讨非线性效应和摩擦效应对渤海冬季环流的影响, 本文分别作了单独略去方程中的非线性项, 或底摩擦项, 或侧向摩擦项, 以及同时略去上述三项因子的四种数值模拟。计算结果表明, 不论是单独略去三项因子中的任何一项, 或是同时略去三项因子, 其四种流场都不存在实质性的变化。考虑到文章的篇幅, 本文只给出同时略去上述三项因子的环流图(图 7)。比较图 4 和图 7, 二者是相当接近的。这说明粗略看来, 不考虑底摩擦和侧向摩擦的线性机制就足以简述渤海冬季平均环流的主要特征。不过, 详细分析图 4 和图 7, 二者仍有某些不同之处。图 7 表明: (1) 辽东湾西侧和北侧、莱州湾西部、渤海海峡南部以及整个渤海湾其流速值普遍增加 1—2 cm/s。这可能是那里水深较浅, 底摩擦相对比较重要; 本文只略去底摩擦效应的数值计算证实了这种看法。(2) 辽东湾整个东侧直至 39°N 附近, 其流速值普遍减少 1—2 cm/s, 这可能和那里流速强, 水深大, 非线性效应相对较重要有关; 本文只略去非线性项的数值计算证实了这种看法。

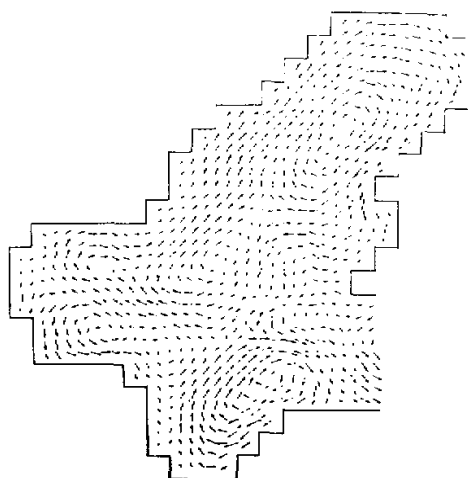


图7 不考虑非线性项及侧向和底摩擦的渤海冬季环流图

当冷空气过境或强风暴入侵渤海时,不但底摩擦显得重要,非线性项也是必须考虑的。侧向摩擦项的量级最小,本文只略去侧向摩擦项的数值模拟结果几乎和图4完全一致;该项的重要性,对于流速强、流幅窄的流系是不可忽略的。

致谢: 本文曾得到毛汉礼、曾庆存和管秉贤教授的热情关怀和大力支持,曾、管两位教授还审阅了全文,特此致谢。此外本工作初期还得到袁重光、李荣凤等同志的许多帮助,也顺致谢意。

参 考 文 献

- [1] 管秉贤、丁文兰、李长松, 1977, 渤、黄、东海表层海流图, 中国科学院海洋研究所。
- [2] Arakawa, A. 1966, Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: two-dimensional incompressible flow, part I. *J. Comput. Phys.*, 1, 119-143.
- [3] Bretschneider, G. 1967, Anwendung des hydrodynamisch-numerischen Verfahrens zur Ermittlung der M-Mitschwingungszeit der Nordsee. *Mitt. Inst. Meereskunde Univ., Hamburg*, VII.
- [4] Bryan, K. 1969, A numerical method for the study of the circulation of the world ocean, *J. Comput. Phys.*, 4, 347-376.
- [5] Leenderse, J. J. 1970, A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas, Vol. I. Principles of Computation, Rand Corporation, RM-6230-RC.
- [6] 张美芳、陈金宝, 1983, 冬、夏季渤海平均海面风应力场, 海洋潮涌通报, 1, 1-6.
- [7] Hsueh, Y. and R. D. Romea, 1986, Wintertime winds and coastal sea-level fluctuations in the Northeast China Sea. Part II: Numerical model, *J. Phy. Oceanogr.*, 16, No. 2, 241-261.
- [8] 管秉贤、陈上及, 1964, 全国海洋综合调查报告第五册, 中华人民共和国科学技术委员会, 海洋组海洋综合调查办公室编。
- [9] Zeng Qing-cun, 1983, Some numerical ocean-atmosphere coupling models. In: Proceedings of the First International Symposium on the Integrated Global Ocean Monitoring Tallinn USSR, October 2-10.
- [10] 曾庆存、李仲贞、李荣凤, 1987, 一个近岸海流数值计算模式及其检验, 水动力学研究与进展, 第2卷1期, 67-74.
- [11] Zeng Qing-cun and Zhang Xue-hong, 1982, Perfectly energy-conservative time-space finite-difference schemes and the consistent split method to solve the dynamical equations of compressible fluid, *Scientia Sinica*, 25, Ser. B, No. 8, 866-880.

(3) 在 $38^{\circ}30' - 39^{\circ}30'N$ 和 $119^{\circ}45' - 120^{\circ}45'E$ 的小范围内, 流场变化最为显著(图7中虚线所示的方框区), 那里的流速值有的竟自 12 cm/s 增至 18 cm/s , 而有的却由 9 cm/s 降至 4 cm/s . 整个流动系统都作了反时针转动, 即由向西南流转向南流, 因为该处水深变化剧烈, 为整个渤海之冠, 流速也甚强, 可能强烈地反映着流场与水深场之间的非线性相互作用。只略去底摩擦或非线性项的数值试验都不能完善地阐述这一现象, 只有当二者同时略去时, 才能出现图7的环流形式。

如果流场中流速度值进一步增大, 底摩擦项就逐渐显示出重要性了; 特别是