

12-18

黄渤海风海流的数值计算

P731.21

王宗山 龚 滨 李繁华 邹城梅 徐伯昌

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

摘 要

文中根据美国提供的“综合海洋和大气资料集”(COADS)资料,编制了黄渤海区30a(1950~1979)平均的四季(代表月取2月、5月、8月、11月)海面风场,进而通过二维非线性流体动力学方程组揭示了研究海区的平均风海流的气候学特征及其随季节的变化。

关键词: 洄游 非线性效应 气旋式流动

一、前 言

黄渤海系半封闭的陆架海区,其海区内海流的主要成分是潮流,余流弱而不稳定,实测最大流速为 $5 \sim 10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [1]。但是,由风引起的风海流有时却是不可忽视,而且甚至是十分重要的。从渤海风生海流的模拟结果看,在冬、夏季季度平均风应力场作用下,流场呈现出明显的相反分布势态,流速约 $5 \sim 15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [2];在寒潮和台风过境影响下,流场的势态则与季度平均状况迥然不同,风生海流的速度在黄渤海的某些区域可分别达到 $120 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $300 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之巨,潮流场的特征已为风海流所掩盖 [3,4]。观测的结果也表明,在大风过境后,风生海流引起了水温、盐度及化学要素等分布的再分配;同时,变化了的温、盐度——特别是温度场,又直接影响着海水介质的声学传播条件以及鱼类的栖息区域和洄游路线,从而影响正常的生产活动。

然而,以往国内外学者对黄渤海区风海流的系统研究还是不够的。早期,管秉贤曾利用余流资料作过有益的分析 [5,6]。近年,浦永修等根据温、盐度资料采用均方差法对黄海西部的海流进行了分析 [7];张淑珍等对渤海环流进行了数值模拟以及张延廷等在研究该海区风暴潮时,曾涉及到风海流的数值计算 [3,4]。到目前为止,完全旨在黄渤海区风海流的研究,应首推窦振兴等 [2] 及 Choi [8] 的工作。这些成果已在不同程度上揭示了该海区的风海流特征,不过窦振兴仅给出了冬、夏季渤海风海流的分布,而 Choi 则对人为给定的风向(NW, N, SE, SW)和定常均匀风应力($1.6 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $10^{-4} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$)场下分别用二维流体动力学模式算出了渤海、黄海、东海的对应风海流分布,缺少一种系统的时间变化图象。

本文为了给黄渤海垂直热结构数值预报提供考虑风海流的依据,试图利用美国提供的“综合海洋和大气资料集”(COADS)的资料,编制黄渤海区30a(1957~1979)平均的四季(代表月取2月、5月、8月、11月)海面风场,并通过数值求解二维非线性流体动力

学方程组,来揭示研究海区在实测的平均风场作用下的平均风海流的气候学特征及其随季节的变化。

二、物理模型和定解条件

(一)物理模型

由于研究海区系半封闭浅海和岸线曲折,在某些区域流速具有相当大的水平梯度,非线性效应相对重要,而海水的垂直运动相对微弱,因此,研究海区的水体可视为流速垂直均匀,具有自由表面和不可压缩的粘性流体。于是,海水流动的控制方程可取如下形式的深度平均动量方程和连续方程:

$$u_t + uu_x + vv_x - fv + g\zeta_x - k_s \nabla^2 u = \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w(H + \zeta)}, \quad (1)$$

$$v_t + uv_x + vv_y - fu + g\zeta_y - k_s \nabla^2 v = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w(H + \zeta)}, \quad (2)$$

$$\partial_t \zeta + [(H + \zeta)u]_x + [(H + \zeta)v]_y = 0, \quad (\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}) \quad (3)$$

式中, u, v 为深度平均速度分量; H 为参考面起算的水深; ζ 为水位; g 为重力加速度; f 为科氏参量; ρ_w 为海水密度; ∇^2 为拉氏算子; u, v 和 ζ 的下标为对应的偏导数; τ_s 和 τ_b 分别为海面和海底边界上的摩擦应力,其表达式为:

$$\tau_{s,x,y} = \rho_a C_D |\vec{W}| W_{x,y}, \quad (\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}) \quad (4)$$

$$\tau_{b,x,y} = g \rho_w C^{-2} |\vec{V}| V_{x,y}, \quad (5)$$

式中, ρ_a 为空气密度; $C_D = (0.8719 + 0.000704 |\vec{W}_{10}|) \times 10^{-3}$ 为曳力系数; $\vec{W}_{10}$ 为海面上 10m 高处的风速; $C = \frac{1}{M} (\overline{H + \zeta})^{1/6}$, M 为 Manning 系数。

(二)定解条件

边界条件:

在闭边界上,取深度平均速度的法向分量等于零(即 $V_n = 0$)。

在开边界(长江口至济州岛)上,取辐射条件:

$$\zeta = \frac{H + \zeta}{c} \vec{v} \quad (6)$$

式中, c 为长波速度,由于研究海区为“超浅海”范畴,故我们取 $c = \sqrt{2gH}$ 。

初始条件:在 $t = 0$ 时,全域内 $\zeta = 0, u = v = 0$ 。

三、数值模型和数值计算

(一)坐标系和空间网格定义

在计算中,我们取 36°N 为 x 轴(向东为正)和取 120°E 为 y 轴(向北为正), z 轴自海平面起算(向上为正)。

对于方程组(1)~(3)的离散,我们采用 Platzman 的交错网格。各量在空间网格上的

定义为:在 (i, j) 点上求 ζ ,在 $(i + \frac{1}{2}, j)$ 点上求 u 和 w ,在 $(i, j + \frac{1}{2})$ 点上求 v 和 w ,在 $(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2})$ 点上求 H 。

(二)数值模型和数值计算

在本文的计算中,是采用隐显方向交替有限差分(ADI)方法建立数值模型,即将时间步长分为两个半步长,在前半步长中,对 ζ 和 u 采用隐式差分,而对 v 采用显式运算;在后半步,将 u 和 v 交换位置差分运算。

计算网格的空间步长取 $\Delta x = \Delta y = 20\text{km}$,计算时的时间步长取900s。整个计算工作是在IBM4381机上完成的。

四、结果及讨论

(一)平均风场

风海流场的结构,除了受制于海底地形和海岸形态等因素外,首先依赖于风应力场的分布和变化。为了考察风应力场的季节变化,我们利用美国提供的COADS资料计算了1950~1979年11月、2月、5月、8月四个季度代表月的30a平均风场(图1)。由图可以看出,从秋季到冬季(图1a,b),黄渤海区主要为偏北风所控制,并在秋季除于南黄海开边界附近风速稍小外,其余广大海区的平均风速均为5~7m/s;在冬季,除海州湾的风速稍小外,其余海区的风速均为4~8m/s,且于122°E以东海域的风速有加大的趋势。春季(图1c),黄渤海区的风场除渤海为相对稳定的东南风所占据以外,黄海的风向多变和风速极不均匀,其中122°E以西海区的风速偏大(偏西风达7~8m/s),风场呈现出过渡季节的不稳定性。夏季(图1d),风场大致与秋、冬季相反,即风向以东南为主,其中渤海的风向由春季的东南变为东南偏东,风速亦有所增大;黄海的风向是东南偏南,风速除山东南部海区较大(达7m/s)外,其余海区多为3~6m/s。

由上述不难看出,渤海的风场分别于秋、冬季及春、夏季相似,且风场比较均匀,唯独风速秋季(11月)略大于冬季(2月),夏季(8月)略大于春季(5月)。黄海风场在秋、冬季,除海州湾和开边界附近有些差异外,其余区域比较相似;春季黄海的风场具有明显的过渡性质;夏季黄海的风场虽其风向大致与秋、冬季相反,但风速却小得多。这充分反映出黄、渤海区的风场既具有不同的季节的差异,又具有其各异的区域性特点。

(二)风海流场

在上述的风场作用下,计算的风生海流的季节变化和空间分布如图2所示。由图可见,秋季(图2a),在偏北风作用及水深和岸界的影响下,渤海的风海流场比较复杂,即在辽东湾和普兰店湾分别呈现反气旋式流动,秦皇岛外海和渤海湾分别为气旋式流动,而渤海中央和莱州湾海区则为一较大的反气旋式流动所占据。黄海,由于其海域相对宽阔,在风场作用和地理因素影响下,形成一个既统一而又有一定分割(从成山角至长山串)的反气旋式流动,其中心位置位于38.5°N, 124°E至34.8°N, 125°E一线附近;超过20cm/s的流速出现在朝鲜近岸区域。在北黄海的西侧存在一气旋式流动,并在渤海海峡

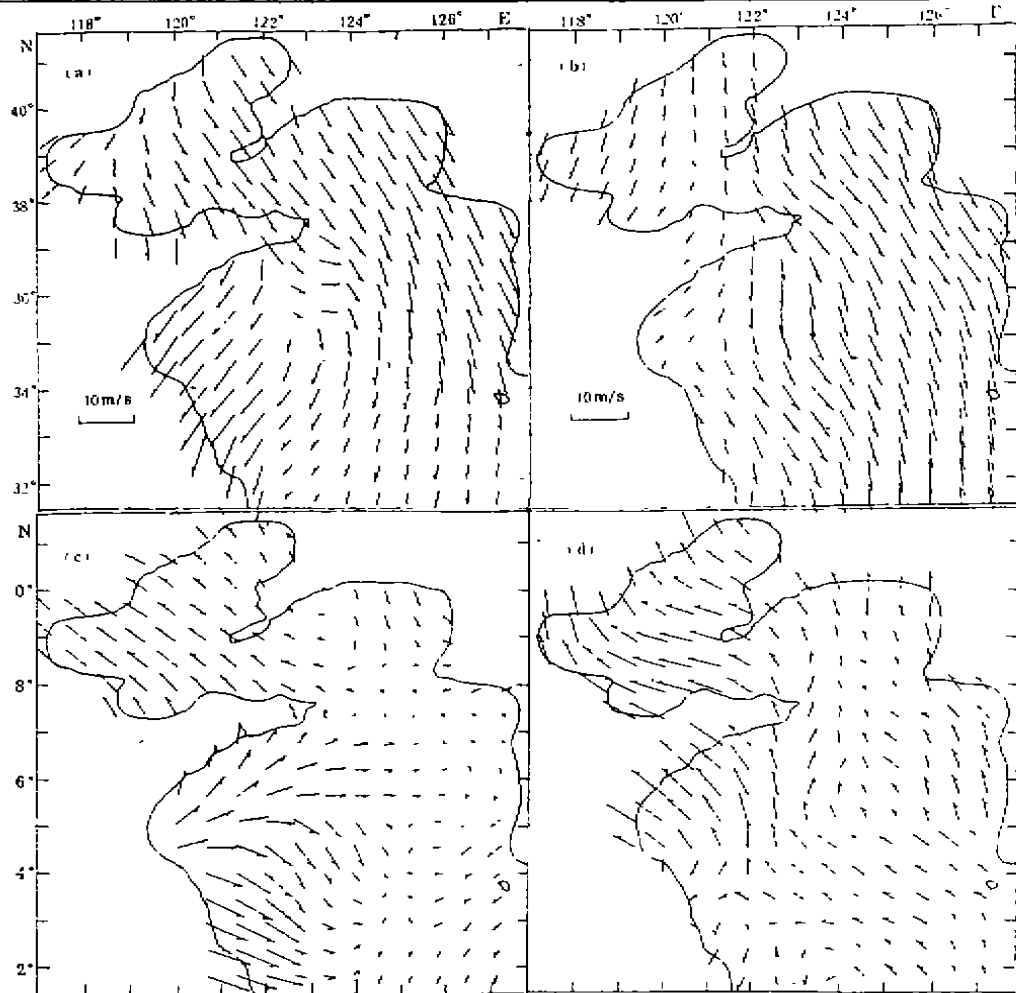


图1 1950~1979年4季(代表月)的30m 平均风场

a 为11月, b 为2月, c 为5月, d 为8月

处形成于其北部海水流入和南部流出渤海的形势;在海州湾至苏北浅滩外侧,在东北风的作用下形成一个相对统一而又有分割(分别位于 33°N 和 34.5°N 附近)的气旋式流动。

在冬季(图2b)由于 122°E 以西海域的风速低于秋季以及风向的变化,在渤海中海流场发生了较大变化,即除辽东湾和普蓝店湾处的反气旋流动依然存在外,渤海中央区为一弱的气旋式流动所占据,而在北黄海的西部,此时秋季的气旋式流动消失,海水从渤海海峡的中部流入和从其两端流出渤海。冬季渤海风海流的这种分布趋势,与前人所指出的渤海北部为反气旋式流动,南部为气旋式流动及渤海海峡处海水为北进南出的格局几相吻合^{1)[1,2,8]}。在南黄海西部,秋季的气旋式流动也消失,且在南部(苏北浅滩外侧)出现一微弱的反气旋式流动。在 122°E 以东的广大海域,流场与秋冬相似,唯独南黄海的反气旋环流于 34°N 以南比秋季大为(向东)缩小,而在以北反而向西扩大;冬季超过 20cm/s 的大流速区仍位于朝鲜半岛的近岸海域。冬季黄海风海流的这种分布与前人的许多研究结果相一致。如,浦泳修等通过温度均方差分布的分析得出,黄海中部存在一

1) 中国科学院海洋研究所,渤、黄、东海表层海流图,1977。

个弱的反气旋环流^[7], 奚盘根等根据数值模拟结果指出, 东中国海环流的主要特征是几

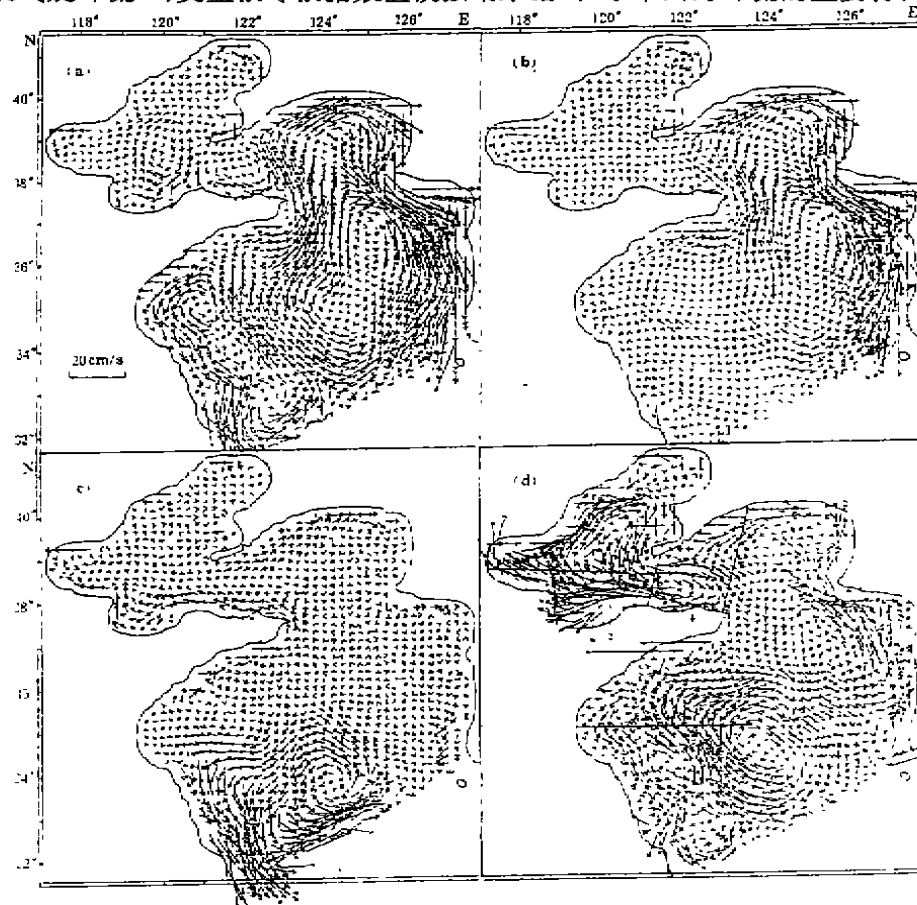


图2 多年平均风海流场

a 为11月; b 为2月; c 为5月; d 为8月

乎沿等深线流动^[10], 文献^[11]的实测冬季底层余流图也表明, 在南黄海存在反气旋回旋的趋势, 李繁华等根据1月份的资料计算的整个黄海的密度流也呈反气旋式流动, 且于124°E附近流速最小, 而向其东西两侧流速加大^[12] (诚然, 密度流与风海流在其成因上有本质的区别, 但在1月份海水的温、盐、密度均几乎垂向均匀。这样, 在赖以产生密度流的等压面的倾斜中, 风海(全)流起着促进作用, 因此在密度流的计算结果中应包含风海流的贡献, 这也是浅海海流动力学复杂处之一)。

春季(图2c), 渤海的风向大致与秋、冬季相反, 即为东南风所占据。此时, 除辽东湾、普蓝店湾及秦皇岛外海分别存在微弱的气旋式流动以外, 黄海水大量从渤海海峡南侧流入和从其北侧流出渤海。在黄海, 由于风速弱和风向不稳定, 整个北黄海形成一个弱的反气旋式流动; 在南黄海, 于青岛外海和黄海槽区域分别形成弱的反气旋式流动, 而在其间偏南区域则形成一个稍强的气旋式流环。

夏季(图2d), 渤海区在较强的东南或东南偏南风作用下, 除辽东湾仍保留一弱的气旋式流动外, 整个渤海为一较强的反气旋流动所占据。在黄海, 其东侧为两个相互联系的气旋式流动所占据, 从而使朝鲜沿岸附近海域的海流与秋、冬季相反(为偏北向流)。在南黄海的中央区, 存在一个可影响到青岛外海的反气旋流动, 而在上述两个大的

风生环流系统的西侧,于北黄海西部,存在一个与渤海较强反气旋流动相联系的局地反气旋流环,从而使渤海海峡的海水呈现明显的南侧流进和北侧流出之势,在海州湾至苏北浅滩外侧,类似于秋季存在着三个相联系的气旋式流动,从而促进了黄海中央区反气旋式流动的发展。夏季风海流场的这些特征,可以由黄渤海区温度的剖面分布找到佐证。下面,引用1959年8月份黄渤海主要温度剖面图(图3)与对应的多年平均风海流场进行对照。比较表明,在渤海中南侧的准纬向及渤海海峡东侧的温度剖面(图3a,b)上,分别于 119°E 及 38°N 附近对应于反气旋流场等温线呈现下沉趋势;在城山角至鸭绿江口的剖面(图3c)上,其南端的海水下沉与北黄海西部的反气旋式流动对应较好,而向北则无对应关系。在 35°N 剖面(图3d)上,温跃层于 121°E 附近对应于气旋式流动呈上抬,而在 123°E 附近则对应于反气旋式流动呈下降趋势。诚然,采用多年平均的温度剖面分布进行上述对照最为理想。然而,在资料缺乏的情况下,进行上述对照还是有意义的,因为多年平均的温度剖面的特征也包含在一年的分布特征之中。

此外,从多年平均风海流的季节变化来看,在渤海夏季比冬季强盛,这一规律与文献[2,5,6]相一致;在黄海,秋季最强,春季最弱,而冬、夏季居中,这一规律与李繁华等通过热量平衡原理得出的规律性相一致^[13]。

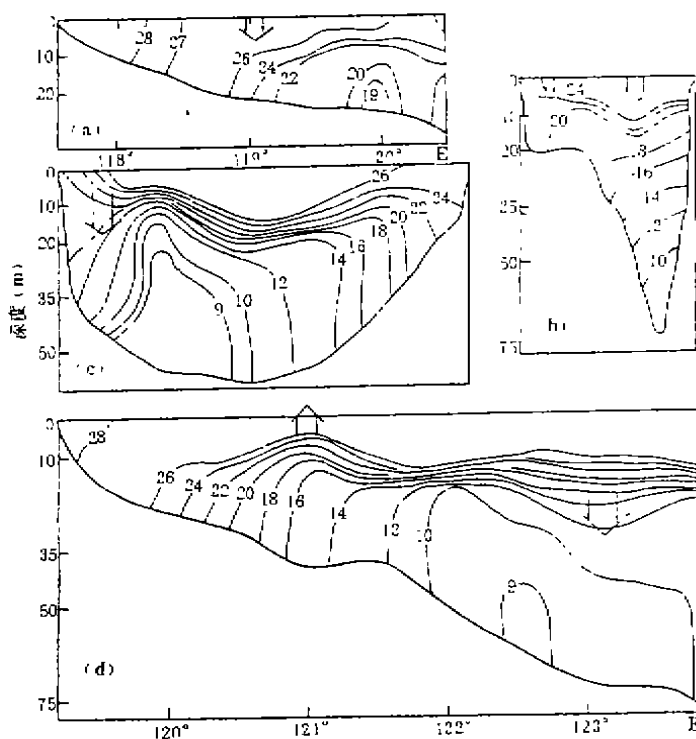


图3 1959年8月黄渤海实测的主要温度剖面分布图

a 为渤中准纬向剖面, b 为蓬莱至旅顺剖面, c 为成山角至鸭绿江口剖面, d 为 35°N 剖面, $\Rightarrow$ 为海水上升或下降的位置

五、结束语

由上述可以得出如下几点认识:

1. 黄渤海区风海流的时、空变化是比较复杂的,既具有(黄、渤)海区的差异,又具有季节的不同。
2. 风海流场的结构与温度场——特别是温跃层的气候起伏关系密切。
3. 风海流强流区的流速可达20cm/s 以上,这对黄渤海区水温结构数值预报模式中考虑平流和侧向混合效应提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国科学技术委员会海洋组:全国海洋普查综合报告(第五册),1964。
- [2] 窦振兴等:渤海风海流数值计算,国家海洋局海洋环境保护研究所,1984,47~68。
- [3] 张延廷、王以娇:渤海风场的模拟及风暴潮数值计算,海洋学报,5(1983)3:261~27。
- [4] 张延廷、王以娇:8114号台风影响下黄海水位场和流场的数值模拟,黄渤海海洋,8(1986)1:1~6。
- [5] 管秉贤:中国沿海的表面海流与风的关系的初步研究,海洋与湖泊,1(1957)1:95~115。
- [6] 管秉贤:有关我国近海海流研究的若干问题,海洋与湖泊,4(1962)3:121~141。
- [7] 浦泳修等:黄海西部流况的初步分析,黄渤海海洋,1(1983)2:8~20。
- [8] 张淑珍等:渤海环流数值模拟,山东海洋学院学报,14(1984)2:12~20。
- [9] Choi, B. H. :Note current driven by a steady uniform wind stress on the yellow sea and the East China sea. *La mer* , 20(1982)2:65~74。
- [10] 吴盘根等:东中国海环流的一种模型(1)——冬季环流的数值模拟,山东海洋学院学报,10,1980:13~25。
- [11] 国家海洋局第一海洋研究所海流组:黄海海流状况,海洋研究(增刊), (3)1979:1~16。
- [12] 李繁华、孔祥德:海底起伏对密度流的影响及浅海动力计算方法的初步研究,海洋湖泊通报, (1)1988:10~15。
- [13] 李繁华、孔祥德:关于黄海暖流某些特征的分析,海洋湖泊通报, (4)1987:1~6

A Numerical Calculation for the Wind-Driven Current in the Huanghai and Bohai Seas

Wang Zongshan Gong Bin Li Fanhua Zou Emei Xu Bochang
(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao)

Abstract

Based on the Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) supplied by U. S. A., the mean seasonal wind fields (with Feb., May, Aug., and Nov. representing winter, spring, summer and autumn respectively) over the Huanghai and Bohai Seas are constructed for the period 1950~1979.

On the basis of the seasonal mean wind fields, the climatological feature of the mean wind-driven current in the studied sea area and its seasonal variations are revealed by solving two-dimensional hydrodynamical non-linear equations.

Key words: migration non-linear effect cyclonic motion.