第 26 卷 第 5 期　　海 洋 与 湖 沼　　Vol. 26, No. 5
1995 年 9 月　　OCEANOLOGIA ET LIMNOLOGIA SINICA　　Sep., 1995

渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响*

赵保仁　庄国文　曹德明
（中国科学院海洋研究所，青岛　266071）
雷　方　辉
（海洋石油开发工程设计塘沽公司，塘沽　300452）

提要　阐明渤海环流和潮余流的分布特征及其与沉积物输运之间的关系。本文根据80年代以来的实测海流资料得到：辽东湾的环流是顺时针向的；黄河三角洲外海存在着一支流向东北偏北向流，与辽东湾西部的东北向海流相接；渤海湾内的环流北部为反时针向，南部为顺时针向回转的双环结构。上述环流趋势与渤海沉积物分布相一致。渤海沿岸主要入海河流的特征矿物分布正是上述环流存在的最好佐证。文中进一步讨论了潮余流分布特征及其对渤海环流的贡献。

关键词　环流　潮余流　沉积物输运　渤海

全国海洋综合调查报告[1]（以下简称“普查报告”）给出的关于渤海环流的基本概念是：渤海海峡的海流为北进南出。进入渤海的高盐水在绝大多数情况下到达渤海西部近海时分成南北两支：北支沿辽东湾西岸北上，而辽东湾的低盐水则沿东岸南下，这样在渤海中部及辽东湾便形成一个顺时针向的环流；南支高盐水沿渤海西岸南下进渤海湾，然后汇集沿岸水途经老黄河口、莱州湾，从渤海海峡南部出渤海。但是近10年来，人们用数值方法得到的渤海环流主体绝大多数是呈反时针式运动的（Dou et al., 1987, 1991[2]；郑连远，1992；王辉等，1993），且很少给出实测证据。

80年代以来，由于采油需要，在许多石油平台上对海流进行长期测量。另外，在某些沿岸区域，特别在黄河口近海布设了许多连续站观测海流。因此，目前我们可用更多的实测海流资料来分析渤海的环流特征，并用以检验和评述不同数值模式的可靠性。

1　平均环流

渤海的平均水深只有18m，海水流动受风的影响较大，这就给分析渤海的平均环流带来一定困难。但是从大量的长时间的观测资料中，我们仍然可以看出渤海存在着比较稳定的环流，现分述如下。

* 国家自然科学基金资助项目，49140015号。赵保仁，男，出生于1939年10月，研究员。
收稿日期：1993年7月1日，接受日期，1995年1月17日。

1) 全国海洋综合调查报告第五册，1964。

2) Dou Zhenxing et al., 1991, A three-dimensional, timedependent and free surface hydrodynamical model and its applications to Bohai Sea.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.1 辽东湾　由1958—1959年16个月的全国海洋综合调查(简称"普查")资料[1]及普查前二个月的渤海同步观测资料[2],不难看出,由渤海海峡深入到渤海的高盐水,在绝大多数情况下分成南北两支,北支沿辽东湾西岸北上,而辽东湾的低盐水(主要来自辽河口)沿东岸南下。这样在辽东湾和渤海中部便形成一个顺时针向的环流,在上述18个月的调查资料中有15个月,即1958年3月,6月,9—12月,1959年1—6月及10—12月,辽东湾的海水大体具有这种流动趋势。仅1959年8月进入渤海的高盐水沿辽东湾东岸北上,而辽河口的低盐水则沿西岸南下,从而湾内海水明显具有反时针方向流动趋势。1959年7月和9月辽河冲淡水几乎均匀地从湾顶向湾中部扩张。普查报告认为,1959年8月辽东湾海水呈反时针向流动,与当时辽东湾东岸盛行东南风,西岸盛行东北风的气象条件有关。因此,对辽东湾夏季环流,该报告认为"辽东湾内的海流,在夏季,至少是8月份,可能是沿反时针向流动的",但是"考虑到流动的不稳定性,辽东湾夏季的环流模式仍然以同步观测6月的余流资料为代表,而用点线绘成顺时针式"。后来,在1982—1983年的辽宁省海岸带调查中,8月份便没有发现辽河冲淡水有沿辽东湾西岸南下趋向(宋有强,1990)。

80年代以来中科院海洋研究所[3]及青岛海洋大学在各海上钻井平台上进行长期测流(后者仅测8号站),时间长达1月至1年不等,一般分表、中、底三层,较浅处为表、底二层。图1中的矢量就是我们收集到的各石油平台上测流所得各层余流的垂直平均值。由图1可见,在辽东湾口靠近西岸的8号站海流为东北向,表明外海水将沿西岸流入辽东湾内。而辽东湾内的流速矢量,绝大部分指向辽东湾东岸,且流向偏南,从而反映出湾内海水作顺时针向流动的总趋势。这里还需特别指明两点:(1)8号站观测时间长达一周年,从无间断,分上、中、下三层测流,在测得的各层余流月平均值中,无一例外地都指向辽东湾内(匡国瑞等,1991),从而显示出至少在1986年9月至1987年9月这一周年内,辽东湾的海流将以顺时针向流动。(2)尽管5站的垂直平均流速指向辽东湾西岸,但是底层平均流速仍然是指向辽东湾东岸的,其方向和量值分别为96°, 1.9cm/s。

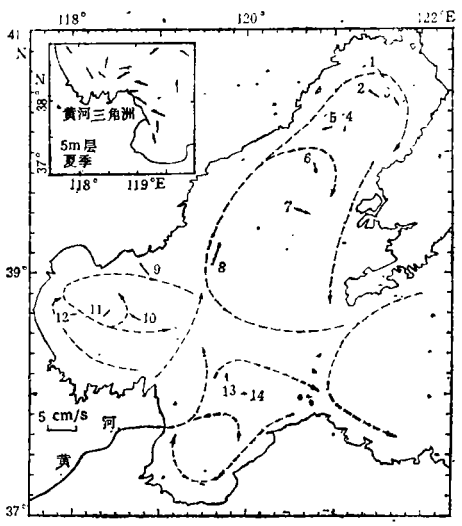


图1　渤海石油平台实测垂直平均余流矢量
(左上角小图引自山东近海水文图集[4])

Fig. 1　Vertical averaged current velocity measured from oil platforms

图中数字为站号;虚线勾画出渤海环流。

根据以上事实,可以比较有把握地指出,除夏季某些年的个别月份外,辽东湾的环流

1) 全国海洋综合调查图集第二册,1963。
2) 全国海洋综合调查报告第五册,1964。
3) 这里仅取中国科学院海洋研究所技术组1986—1993年期间在石油平台上的测流资料。
4) 山东省地图出版社出版,1988。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

将按顺时针方向流动。但在许多关于渤海冬、夏季环流数值模拟中(王辉等，1993；郑连远，1992；Miao et al., 1988; Dou et al., 1987; 1991[1]) 除 Miao Jingban 等人(1988)外，多数给出的辽东湾环流呈反时针向流动，这些数值结果均与上述实测结果相违背，难以使人信服。

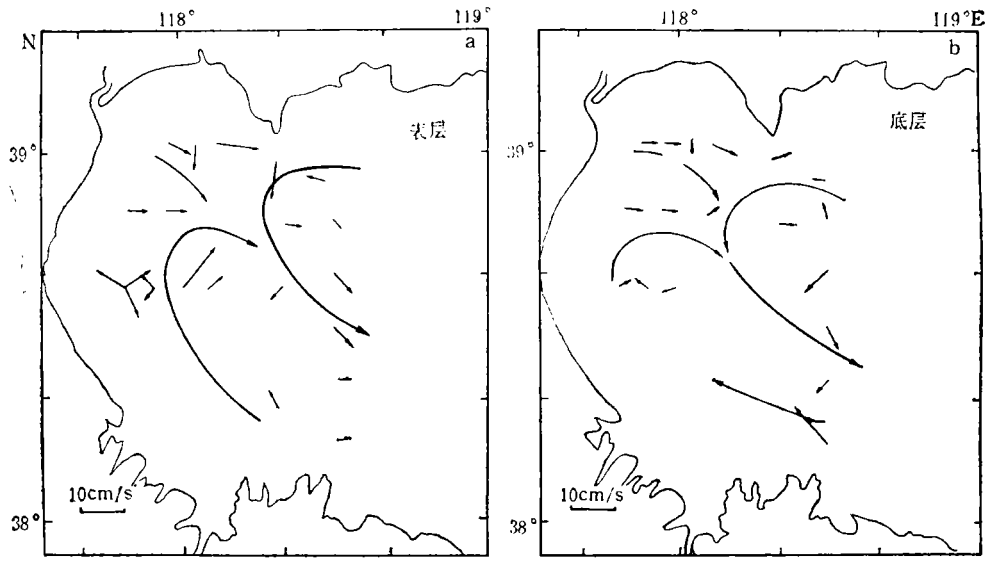


图 2 渤海湾内实测余流分布(根据天津市海岸带调查资料[2]重新绘制)

Fig. 2 Measured residual current velocity in the Bohai Sea Bay

1.2 渤海湾 普查报告认为，外海高盐水常年沿渤海湾北岸流入渤海湾，湾内沿岸低盐水则沿渤海湾南岸流出，湾内海流呈反时针向回转。然而在普查图集[3]中也清楚地看到黄河冲淡水常扩展到渤海湾南部区域，在洪水期有时甚至全部冲淡水都涌入渤海湾南部区域，如 1959 年 7 月和 8 月。这意味着从老黄河口当时就有一支沿岸流流入渤海湾。事实上 1976 年前，黄河泥沙大量涌入渤海湾(秦蕴珊等，1985)即是这支沿岸流存在的有力佐证。如此，渤海湾口左右两侧的海水都涌入渤海湾，那么唯有从中路流出才能维持水量平衡。图 1 中 11，12 站的余流矢量似乎显示了这一方向的流动特征。这样看来渤海湾的环流应该是双环结构。这种双环结构还可由图 2 的余流矢量得到进一步证明。

1.3 黄河口海区 早期这里测流资料较少，普查报告对这里的海流描述较粗浅，认为这里是黄海沿岸流的源头，海水主要向东输送，80 年代以来在黄河口地区进行了多次海洋调查并观测海流，使我们有可能对这里的海水流动进行比较客观的分析。

黄河在 1976 年前入海口门朝北，1976 年改道清水沟流路后口门朝东，在科氏力影响下且有逐渐转向东南的趋势，由于黄河入海口经常变迁，岸线变化显著，不同时期的近岸流动会有较大差异，但在离岸较远处仍可显示出比较稳定的海水运动。

从普查图集可以看到黄河冲淡水常常向渤海中部冲溢，比较典型的实例有 1958 年

1) Dou Zhenxing et al., 1991, A threedimensional, timedependent and free surface hydrodynamical model and its applications to Bohai Sea.

2) 天津市海岸带和海涂资源综合调查报告，1987。

3) 全国海洋综合调查图集第二册，1963。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

9 月，1959 年 2—6 月、9 月、11 月等最远时冲淡水舌前锋可达 39°N 线附近(图 3a)。在黄河取道清水沟流路后，口门水舌向东，但多次调查均表明离口门不远就可显示其转向东北-北方向，比较典型的例子如 1984 年 8 月(图 3b)。这些事实表明，一年中多数月份黄河三角洲外的海流可能是指向北-东北方向。另外，在文献(山东科学技术委员会，1989)中，收集了 1958—1985 年间的山东近海实测余流，除冬季实测资料较少，其他春、夏、秋三季都可看出三角洲外海的余流最终均明显地指向北-东北方向，汇入由渤海海峡流入渤海的高盐水系之中。

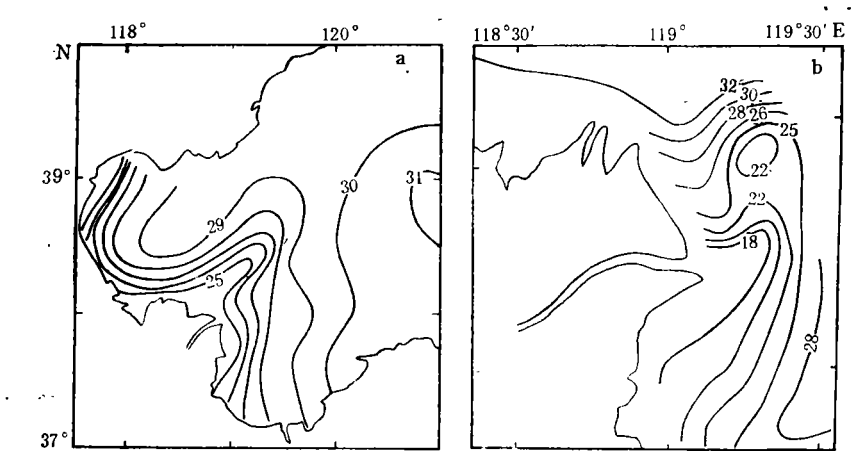


图 3　黄河口外表层盐度分布

Fig. 3　Surface salinity distribution of the Huanghe River Delta

a. 1959 年 9 月(引自普查图集第二册)；　b. 1984 年 8 月(引自沈志良，1989)。

1.4　莱州湾　　莱州湾水深更浅，平均约 10m，海流受风影响更大，实测流矢多变。最早管秉贤将这里的平均环流绘成顺时针式，后来 Miao 等人(1988)用数值方法证实莱州湾冬季环流呈顺时针向流动。我们认为上述莱州湾的环流趋势是合理的。

2　渤海的潮余流

利用方国洪等[1]潮汐潮流细网格 (5′ × 5′) 数值结果计算潮余流。其中算得的欧拉余流如图 4a 所示，Stocks 潮余流据 Feng 等人(1986)的公式(23)计算，算得的 Stocks 潮余流如图 4b 所示，拉格朗日潮余流如图 4c 所示。这里还需指出我们给出的潮余流中既包括了半日分潮 M_2，又包括了全日分潮 M_1 对潮余流的贡献。

由图 4a 可知，给出的欧拉潮余流从黄河三角洲顶端出发，潮余流指向北-东北向，当其到达辽东湾西岸时逐渐向右转向，流往辽东湾东岸，然后又向辽东半岛南端汇聚，最后又转向西南，在渤海中部和辽东湾形成一个大的顺时针向的余环流，这同图 1 所示的相应位置处的环流趋势是一致的。由此可见潮余流对渤海中部及辽东湾顺时针向环流有重要贡献。

由图 4 可知，渤海绝大部分海域的 Stocks 潮余流均小于欧拉潮余流，因此合成后的

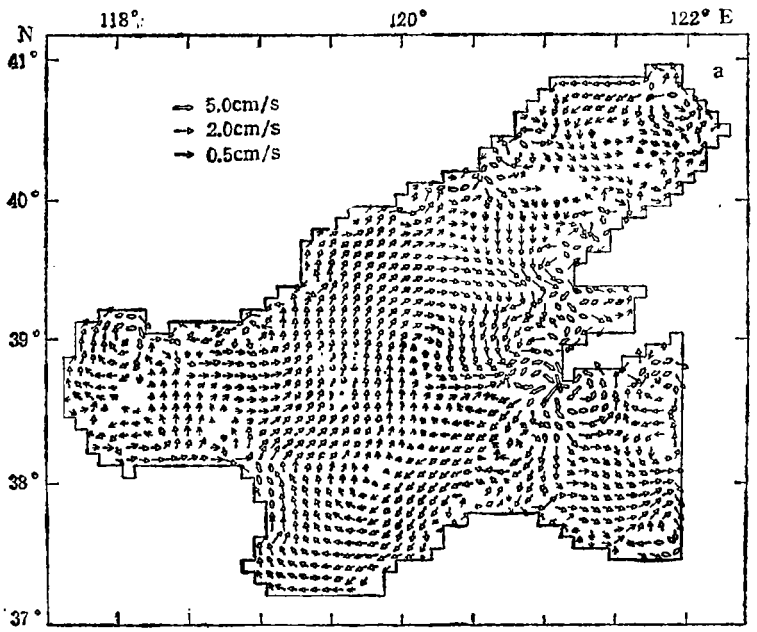
1) 方国洪、曹德明，1991，黄河三角洲岸线变化对渤海潮汐潮流的影响，第二届黄海国际学术讨论会交流论文。

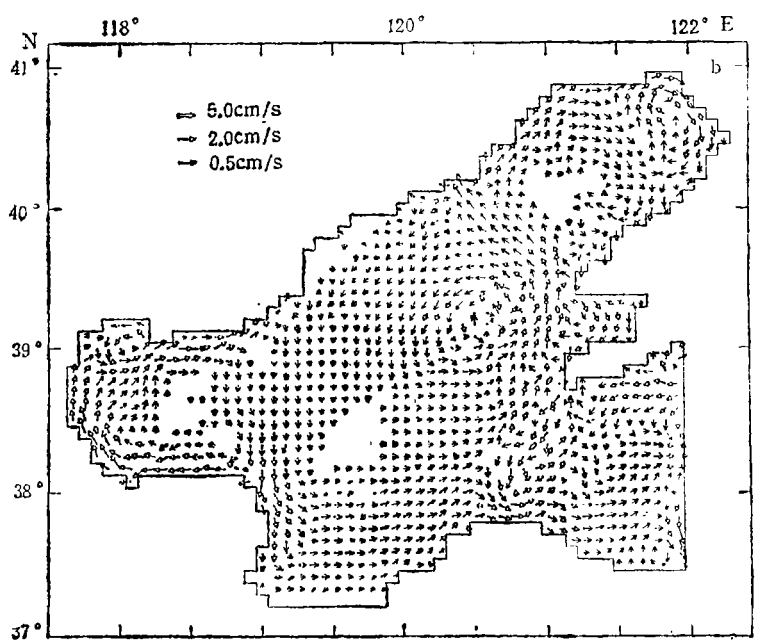
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

拉格朗日潮余流的流动趋势仍然同欧拉余流基本一致。这与郑连远(1992)和王辉等人(1993)的结果相差甚远。看来本文给出的潮余流分布更趋合理。

3 渤海环流与沉积物输运

为了说明渤海环流与沉积物输运之间的关系，首先考察渤海沉积物分布(图5)。由图5可知黄河细颗粒物质主要分布在渤海湾南部和莱州湾西侧，以及从老黄河口至秦皇





?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

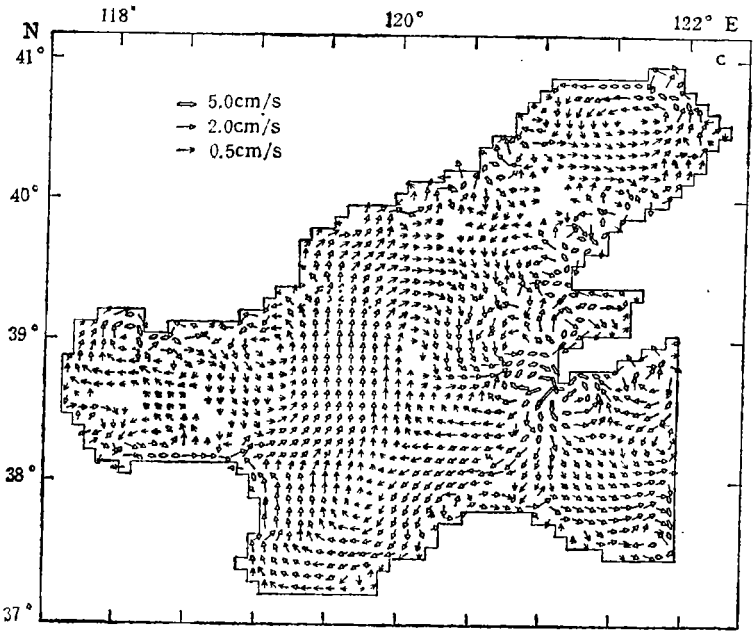


图 4　渤海的潮余流分布

Fig. 4　Distributions of tidal residual currents in the Bohai Sea
a. 欧拉潮余流；　b. Stocks 潮余流；　c. 拉格朗日潮余流

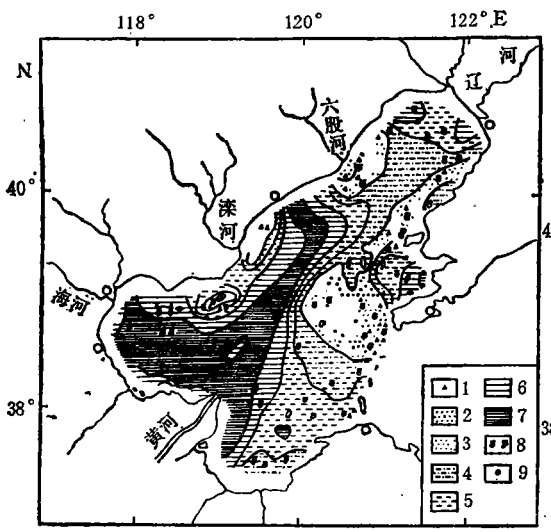


图 5　渤海沉积物分布
（引自秦蕴珊等，1985）

Fig. 5　Distribution of sedimints in the Bohai Sea

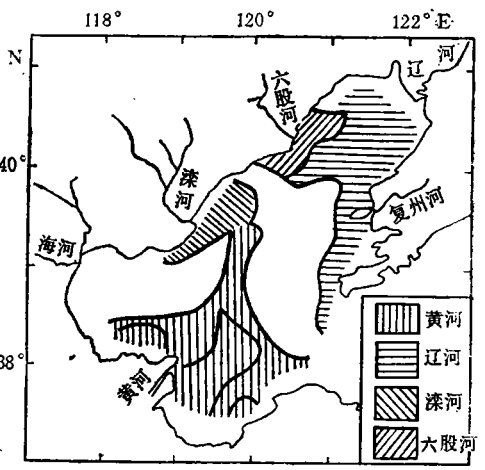


图 6　渤海入海河流特征矿物分布
（根据秦蕴珊等，1985，重新绘制）

Fig. 6　Typical mineral distribution of main rivers flowing into the Bohai Sea

岛近海的狭长地带，粗颗粒物质主要分布在这一狭长地带的两侧。沉积物的这种呈带状分布特征一方面与粗细物质的不同来源有关，另一方面主要与图 1 所示的渤海环流输送

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

有关。过去由于对渤海环流系统缺乏深入了解，无法理解黄河物质何以主要向西(渤海湾南部)和向北(至秦皇岛近海)输送，而不是主要向莱州湾和海峡方向输送。此外，与沉积物分布有关的各地球化学元素如 Al，Fe，C 有机，$CaCO_3$ 等也都具有类似的条状分布特征(秦蕴珊等，1985)。这样本文得到的渤海环流首次同渤海海底沉积物分布相协调。

渤海的沉积物主要来自渤海周围的河流泥沙输入，流入渤海的主要河流有黄河、辽河、滦河、六股河等。由机械分析和矿物分析可知(秦蕴珊等，1985)黄河泥沙颗粒较细，矿物组成以白云母和方解石含量高为其主要特征。滦河、六股河及复州河等河流输沙颗粒较粗，以砂为主，辽河泥沙粒经介于上述两类河流之间。滦河泥沙矿物组成中以高含量辉石而有别于黄河，辽河，又以高含量石榴子石与六股河相区别。六股河则以矿物中含有最高的磁铁矿为其主要特征。辽河泥沙矿物组成以钾长石含量高而有别与其他河流。

由秦蕴珊等(1985)给出的各特征矿物分布(见图 6)可知，黄河代表矿物白云母分布同图 5 细颗粒物质一致，显示其向西，向北和向东输送特征。滦河特征矿物石榴子石和六股河特征矿物磁铁矿主要沿渤海西岸向辽东湾内输运，而辽河特征矿物钾长石则居辽东湾北部区域，并主要沿东岸向渤海南部输送。这些特征矿物的输运线路同我们的渤海环流基本一致，从而也是图 1 所示渤海环流的有力佐证。

4 结语

本文从实测海流资料得到渤海中部及辽东湾内的平均环流是顺时针向的，渤海湾的平均环流，北部为反时针向，南部为顺时针向的双环结构。在黄河三角洲外海存在着一支流向东北偏北向海流，最后与辽东湾西部的东北向海流相接。潮汐潮流的数值计算结果表明，渤海的潮余流对渤海中部及辽东湾的平均环流有重要贡献。本文给出的渤海平均环流，首次与渤海沉积物的分布和输运相协调，而渤海沿岸主要入海河流的特征矿物的分布也正是上述环流存在的最好佐证。但是目前渤海环流数值结果，绝大多数与本文给出实测结果相违背，因此作者认为有必要重新设计渤海环流数值计算工作。

参 考 文 献

山东省科学技术委员会，1989，山东近海水文状况，山东省地图出版社(济南)，221。

王辉、苏志清、冯士筰等，1993，渤海三维风生-热盐-潮致 Lagrange 余流数值计算，海洋学报，**15**(1)：9—21。

匡国瑞、张琦、戴煜芝，1991，渤海中部长期流的观测与余流分析，海洋与湖沼通报，**2**：1—11。

沈志良、陆家平、刘兴俊，1989，黄河口及其附近海域的无机氮和磷酸盐，海洋科学集刊，**30**：51—79。

宋有强，1990，辽东湾北部岸带温，盐分布基本特征，海洋通报，**9**(3)：9—14。

郑连远，1992，三维潮致拉格朗日余流的数值计算及其在渤海中的应用，青岛海洋大学学报，**22**(1)：39—49。

秦蕴珊、赵一阳、赵松龄等，1985，渤海地质，科学出版社(北京)，232。

Dou, Z. X., Zhang, C. Z. and Zhang, Y. F., 1987, A numerical computation of the wind driven current in the Bohai Sea, *Acta Oceanol. Sinica*, **6**(3):344—351.

Feng, Shizuo, Rrlph T. Cheng, Pangen Xi, 1986, On tidal-induced Lagrangian residual current and residual transport. 2. Residual transport with application in south San Francisco Bay, *California, Water Resources Reseach*, **22**(12): 1 635—1 646.

Miao Jingbang, Liu Xingquan, 1988, A numerical study of the wintertime circulation in the northern Huanghai Sea and the Bohai Sea, Part I: Basic characteristics of the circulation, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, **6**(3): 216—226.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CIRCULATION, TIDAL RESIDUAL CURRENTS AND THEIR EFFECTS ON THE SEDIMENTATIONS IN THE BOHAI SEA

Zhao Baoren, Zhuang Guowen, Cao Deming

(Institute of Oceanology, Academia Sinica Qingdao 266071)

Lei Fanghui

(China Offshore Oil Development and Engineering Corporation, Tanggu, Tanggu 300452)

Abstract

Distribution characteristics of circulations and tidal residual currents and their relations to sediment transport in the Bohai Sea are discussed, and numerical models of circulations in this sea at present are also reviewed. Current data measured from the eighties at the oil platforms and other places show that the circulation in Liaodong Bay is clockwise, that in the offshore areas of the Huanghe River Delta is a current directed northeast by north and joined to the northeastward current in the western part of Liaodong Bay and that the circulations in the Bohai Bay are anticlockwise in the northern part and clockwise in the southern part. Most numerical models of the Bohai Sea circulations at present do not conform to the above results. The Eulerian and Langrangian residual currents are also discussed on the basis of results of numerical model of tide and tidal current. It was found that the Eulerian and Langrangian tidal residual current form a large clockwise circulation in the central part of the Bohai Sea and Liaodong Bay. This circulation is very consistent with the circulation pattern from the Huanghe River Delta to Liaodong Bay and means that the tidal residual currents contribute importantly to the Bohai circulations. It is further pointed out, for the first time that the circulations of Bohai Sea are consistent with the sediments distribution in the Bohai Sea. In fast, the distribution of typical minerals of the sediment discharge from main rivers flowing into the Bohai Sea is the best evidence for existence of Bohai circulation given above.

Key words Circulations Tidal residual currents Transport of sedimentation Bohai Sea

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net