

渤海、黄海和东海的潮余流特征及其与近岸环流输送的关系*

赵保仁 方国洪 曹德明
(中国科学院海洋研究所)

渤海、黄海和东海是西北太平洋陆缘海,有宽广的大陆架,太平洋潮波长驱直入,在大陆架海域形成显著的潮汐运动,由此而产生的潮余流输送在许多地区显示出重要作用。已有很多学者(方国洪等,1985;黄祖柯,1992)用数值方法计算过渤海的潮波运动,并给出了那里的潮余流分布。渤海的潮余流计算大体上有两种方法:(1)用二维或三维潮波运动方程组计算潮汐和潮流,然后再计算欧拉潮余流(方国洪、杨景飞,1985;于克俊、张法高,1987;黄祖柯,1992);(2)以弱非线性三维拉格朗日平均流理论为基础,计算拉格朗日潮余流,它不仅包括最基本的欧拉余流,而且还包括在浅水比较显著(与欧拉余流同量级)的斯托克斯漂移速度和高阶的拉格朗日漂移速度订正值(郑连远,1992;王辉等,1993)。上述两种方法理应给出大体相近的潮余流分布,但从现有的计算结果来看,这两种方法在渤海给出了几乎完全相反的潮余流输送。

汤毓祥(1990)曾计算过南黄海和东海大陆架区的 M_2 分潮余流,并考虑了斯托克斯速度漂移对它的影响,所得结果和已知的南黄海环流概况颇有相似之处,但由于计算边界取在东海大陆架外缘,那里的潮余流可能失真较大。Chio (1980)也曾给出过渤海、黄海和东海大陆架区的欧拉潮余流分布,但由于他的开边界也取在东海大陆架外缘,而且他给出的潮汐、潮流数值在靠近中国大陆一侧,误差较大,因此所得潮余流也不能令人满意。

最近,我们完成了包括渤海、黄海和东海全海区的潮汐、潮流二维数值计算工作(Zhao *et al.*, 1993),与实测资料相比,其结果达到的准确程度,无论在潮位还是在潮流方面都比较好。本文以这一数值计算结果为基础,给出了渤海、黄海和东海全海区的潮余流分布,同时还讨论了潮余流与近岸环流的关系。

一、二维潮汐、潮流数值模式及其主要结果

潮汐、潮流数值计算采用球坐标系中的二维潮波运动方程组,考虑侧向摩擦,引潮势中包括了固体潮的影响。计算海区包括整个渤海、黄海和东海,以及朝鲜海峡和台湾海峡北部水域,南北跨16个纬度以上。计算中取 M_2 分潮为半日潮的代表分潮,取

$$H_{m_1} = (H_{k_1} + H_{o_1})/2, \theta_{m_1} = (\theta_{k_1} + \theta_{o_1})/2, \sigma_{m_1} = (\sigma_{k_1} + \sigma_{o_1})/2$$

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告等2410号。
收稿日期:1994年6月6日。

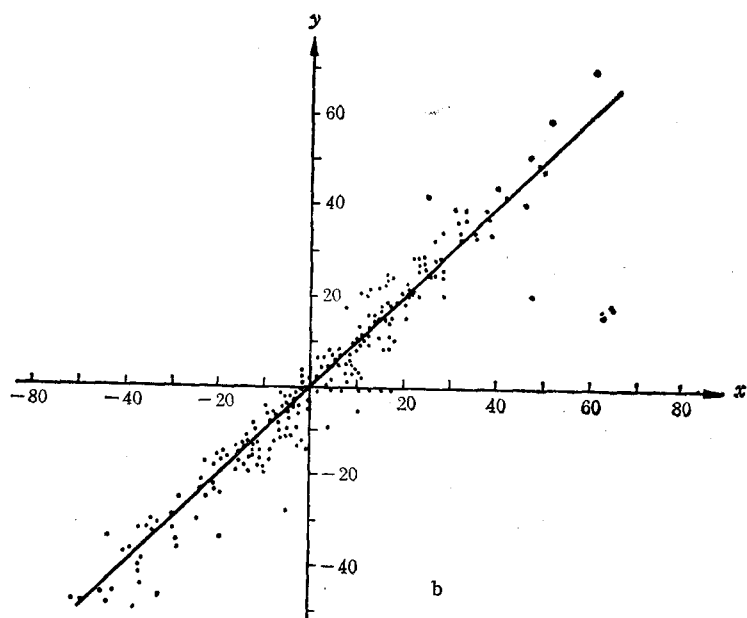
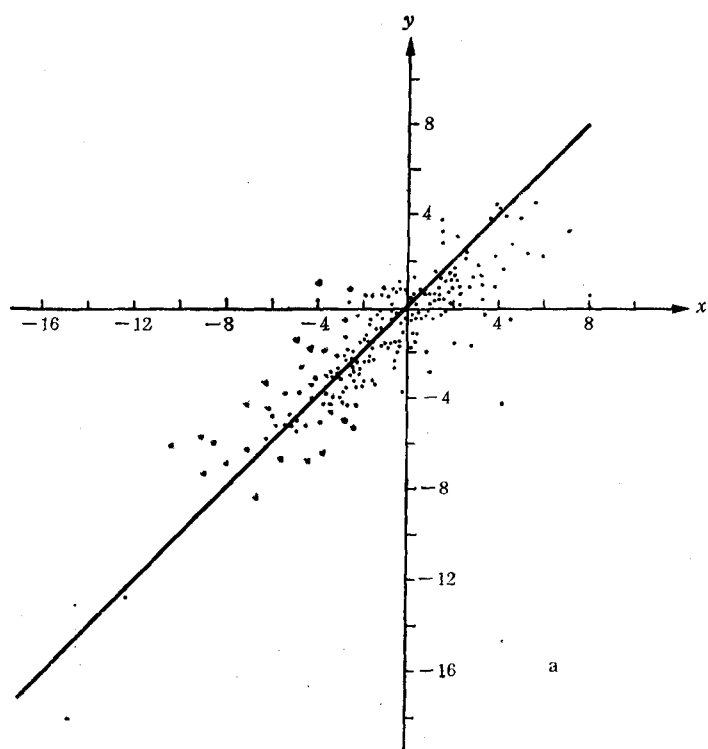


图1 数值计算所得潮流调和常数分量 (y 轴) $U \cos \xi, U \sin \xi, V \cos \eta, V \sin \eta$ 与实测值 (x 轴) 的比较 (cm/s)

a. O_1 分潮; b. M_2 分潮

作为全日潮的代表分潮, 这样在一个全日潮周期内可同时模拟全日潮和半日潮运动。

计算采用 Flather 和 Heaps 的差分格式。为了同实测结果作比较, 我们从历史资料中选出 81 个有代表性的沿岸水位站, 大体均匀地散布于沿岸各处。此外, 在黄海和东海还找到了 54 个潮流比较点。潮位站调和常数的对比结果表明, 计算与实测符合得相当好。 M_2 分潮振幅差绝对平均值为 7.2cm, 相角为 6.4° , 其中最大差值分别为 22cm 和 27° ; m_1 分潮振幅误差绝对平均值为 2.6cm, 相角为 7.4° 。

图 1 给出了有关测流站潮流调和常数分量 $U \cos \xi$, $U \sin \xi$, $V \cos \eta$, $V \sin \eta$ 的计算值 (y 轴) 和实测值 (x 轴) 的对比结果, 其中实测调和常数是用准调和与分析方法得到的各层平均值, 计算所得 O_1 分潮流调和常数是由 Fang (1986) 给出的差比值从数值计算所得的 m_1 分潮求出。由图 1 可知, 计算值与观测值比较一致。

由上述可知, 本数值结果无论是潮位还是潮流, 均与实测值符合良好。因此, 我们有理由认为, 根据这一数值结果算出的潮余流分布也是可信的。

二、渤海、黄海和东海的潮余流分布特征

将数值计算所得潮流求一个周期平均值, 得欧拉潮余流, 进而由公式

$$U_e = \frac{1}{TH} \int_0^T U S dt$$

计算斯托克斯漂移速度 (Tee, 1976), 两者相加可得物质输运速度 (有时也称拉格朗日潮余流)。由于我们的数值计算包括了 M_2 和 m_1 两个分潮, 因此, 这里给出的潮余流也包括了主要半日分潮 M_2 和主要全日分潮 m_1 的联合贡献 (图 2)。

由图 2a 可知, 欧拉潮余流流速大于 1cm/s 的强潮余流海区主要分布在台湾海峡和台湾岛北端近海, 浙江北部至江苏北部的老黄河口沿海海域, 山东半岛东部及南部沿海, 渤海及渤海海峡, 西朝鲜湾、江华湾及朝鲜半岛西南角近海等沿岸海区, 此外, 在黄海入口处的中部也有较强的潮余流分布。

台湾海峡北部的潮余流最大流速达 4.6cm/s, 其流向指向台湾岛北端, 到达基隆港附近海面后分成两支, 一支转向东, 进而转向南, 在台湾东部海区形成一个小涡旋; 另一支向北, 直指杭州湾口方向。在浙南和闽北沿岸则有贴岸向南的潮余流, 最大值可达 3.0cm/s, 并在那里形成两个反时针的小涡旋。

杭州湾附近的潮余流流速较大, 一般都在 3.0cm/s 以上, 湾口最大达 8.4cm/s。从杭州湾往外流出的潮余流在汇集了浙江沿岸向北流动的潮余流之后, 一部分转向东南流向外海, 并在杭州湾口东南部形成一个比较明显的顺时针小涡旋; 另一部分继续北上流向长江口, 汇入由长江向外流出的潮余流。上述两者汇合后, 一部分转向东, 再转向东南流向外海; 另一部分贴岸继续北上, 在到达 $32^\circ 30' N$ 线附近后也转向东, 然后转向东南流向外海。

在苏北浅滩附近, 最大潮余流速达 7.4cm/s。沿岸向老黄河口尖凸汇集的潮余流离岸后先向东, 然后转向东南, 同沿黄海海槽南下的潮余流汇集, 并在长江口水下三角洲东北侧形成较显著的潮余流速度, 最大值为 1.5cm/s。在苏北老黄河口尖凸的南侧存在一个顺

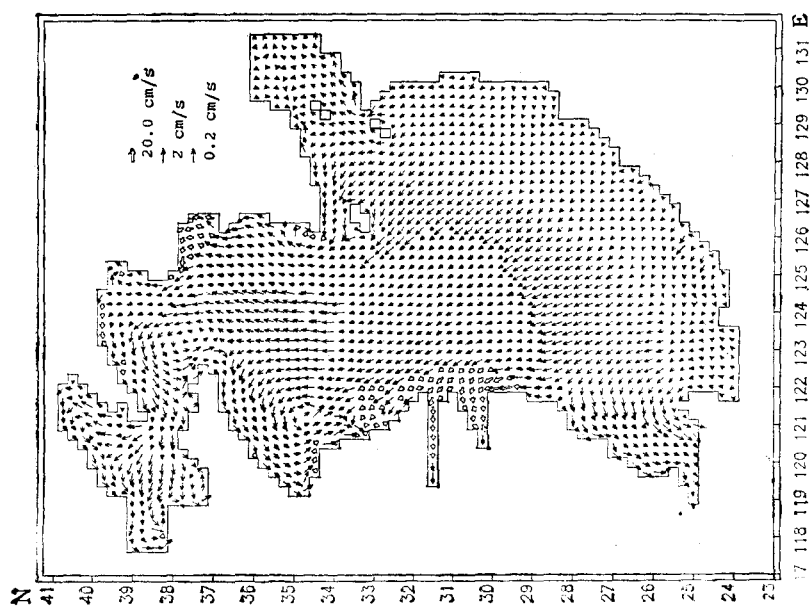


图 2a 欧拉潮余流分布 (cm/s)

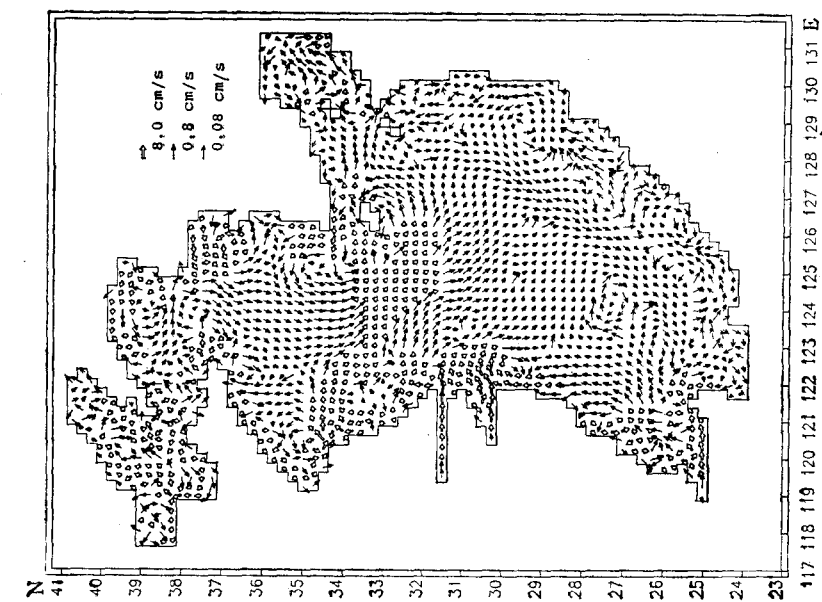


图 2b 斯托克斯漂移速度分布 (cm/s)

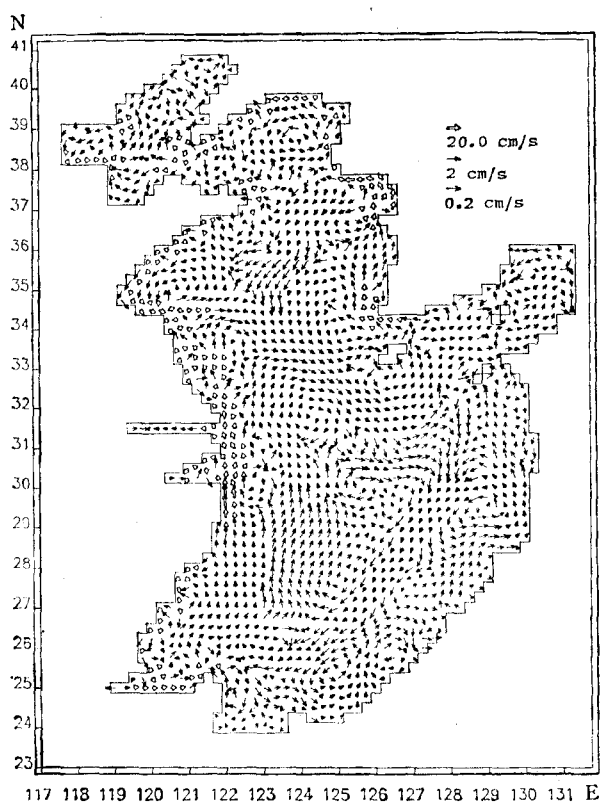


图 2c 潮流的物质输运速度分布 (cm/s)

时针方向的涡旋,而在其北侧则存在一个反时针方向运动的涡旋。

在山东半岛南部海面,从外海流向半岛方向的潮余流大体上以千里岩与朝连岛之间的海面(青岛以东)为界,以西者贴岸向西流向海州湾顶方向,以东者贴岸向东流向成山角方向。山东半岛北岸的潮余流除在渤海海峡处流入渤海外,其他均流向东,并在成山角近海形成强潮余流区和逆时针向涡旋,最大流速可达 4.7cm/s 。

在渤海的现代黄河口附近,渤海湾东岸以及莱州湾南岸和西岸的潮余流均向黄河三角洲尖凸处汇合,并在渤海湾和莱州湾分别形成逆时针涡旋和顺时针涡旋。汇集后的潮余流流向东北,其最大流速达 4.3cm/s ,然后转向北,可达辽东湾西岸秦皇岛以北海域。这支潮余流在到达秦皇岛以北海区后,又折向东,直达辽东湾东岸,然后贴岸流向辽东半岛南端。从图 2a 还可看出,由渤海海峡流入渤海的潮余流,以及由黄河口北上最后到达辽东湾东岸的潮余流,大体在辽东浅滩处汇集,这可能与辽东浅滩的发育有密切关系。从图 2a 可知,本数值计算所得的渤海欧拉余流与一些作者(方国洪、杨景飞, 1985; 于克俊、张法高, 1987; 黄祖柯, 1992) 用细网格在渤海作数值计算所得的欧拉潮余流是一致的。

在辽东半岛南岸,潮余流速一般为 $1-2\text{cm/s}$,大连近海可达 $3-4\text{cm/s}$,渤海海峡处最大可达 7cm/s 。辽东半岛南岸的潮余流方向为西向,然后在辽东半岛顶端离岸向西南方向流动,并在旅顺-大连外海形成一个逆时针向小涡旋。潮余流在整个北黄海则形成一个逆时针向的大涡旋。

从图 2a 可知,朝鲜西岸有 3 个强潮余流区,分别在西朝鲜湾、江华湾和木浦外海,并各自形成独立的反时针向潮余流涡旋,其最大流速分别达 2.4cm/s , 3.9cm/s 和 4.2cm/s 。在朝鲜海峡,潮余流速不足 1cm/s ,总的流动趋势是东北方向,只有釜山近海有从日本海流向朝鲜海峡的西南向潮余流,以及济州海峡的北岸有贴岸向西的潮余流。在黄海海槽及东海外大陆架处,潮余流的主流向为偏南方向,但流速较小,不足 1cm/s 。

从图 2b 可知,斯托克斯漂移速度方向同 M_2 分潮能通量方向一致 (Zhao *et al.*, 1993), 而其流速除水深极小的强潮海区如杭州湾、长江口内、浙江北部近海、江华湾等地大于欧拉余流外,其他大都小于欧拉余流值。最强的斯托克斯漂移速度发生在杭州湾口南部近海,达 23.9cm/s , 其次在江华湾,为 9.0cm/s 。

由欧拉潮余流与斯托克斯速度漂移相加而得到的潮流物质输运速度如图 2c 所示。在杭州湾、长江河道内等少数海区的斯托克斯漂移速度大于欧拉余流,且方向相反,致使物质输运速度方向与欧拉余流相反,在其它大多数海区,潮流物质输送速度仍然同欧拉潮余流方向基本一致。这里还需特别指出,在渤海的大部分地区,尽管斯托克斯漂移速度方向与欧拉潮余流方向相反,但由于后者的量值大于前者,因此合成后的物质输运速度仍然同欧拉潮余流基本一致。

三、潮余流与近岸流系

由图 2 可看出,潮余流在许多海域的流动方向同已知的近岸流系的方向是一致的,最明显的区域有以下几个:

1. 北黄海

辽东半岛南部近海的潮余流常年将鸭绿江口附近的冲淡水沿岸向西输运,这同已知的辽南沿岸流的输运方向是一致的。山东半岛北岸的潮余流方向同黄海沿岸流北段(或称鲁北沿岸流)的流动方向基本一致(海峡处除外)。而在整个北黄海存在着一个大的逆时针方向的潮余流输送,同已知的北黄海环流方向相一致,也和张法高等人 (Zhang *et al.*, 1987) 用漂流瓶和漂流卡得到的北黄海环流相一致(图 3)。

2. 山东半岛南岸

青岛以东近岸潮余流的流动方向同近岸实测余流方向基本一致,并且石岛南部海面的顺时针向潮余流涡旋同漂流瓶显示的顺时针向海水运动亦十分一致。由上述可看出,潮余流对山东半岛东南近海的顺时针涡旋的形成起着重要作用。

3. 江苏北部近海

潮余流从老黄河口向东流动,进而绕过苏北浅滩和长江口外的水下三角洲流向东海外大陆架,同黄海沿岸流南段的流动方向基本一致。另外,从浙江沿岸至长江口的潮余流也同已知夏季的江、浙沿岸流及长江冲淡水的运移方向一致。特别应当指出,在海岸带调查中,长江口北部近海在冬、夏两季均观测到流幅分别为 30n mile 和 15n mile 的北向流动,而在其外侧又观测到指向东,进而指向东南方向的流动(图 4)¹⁾。从盐度分布图(图

1) 林锡藩、陶义忠, 1981, 1982, 海洋研究(内部刊物)。

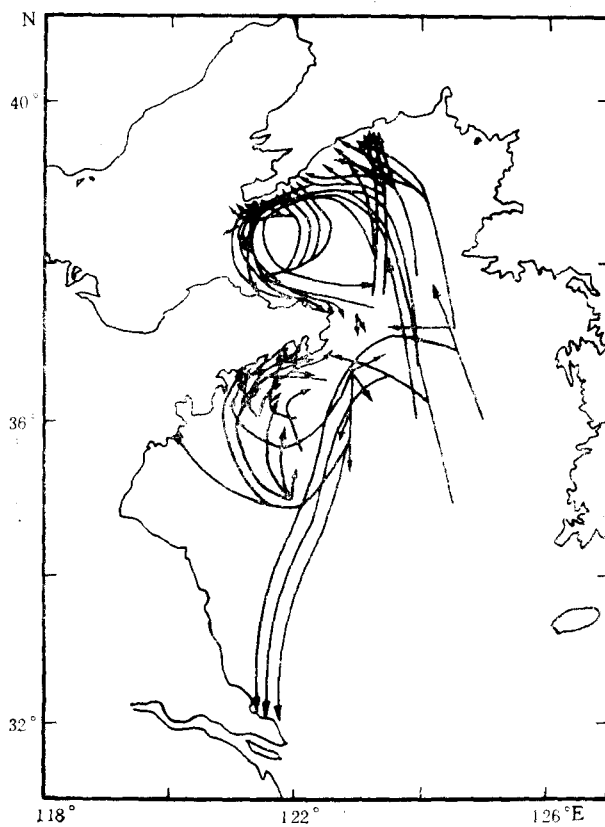


图3 漂流瓶漂移方向及可能的漂轨迹

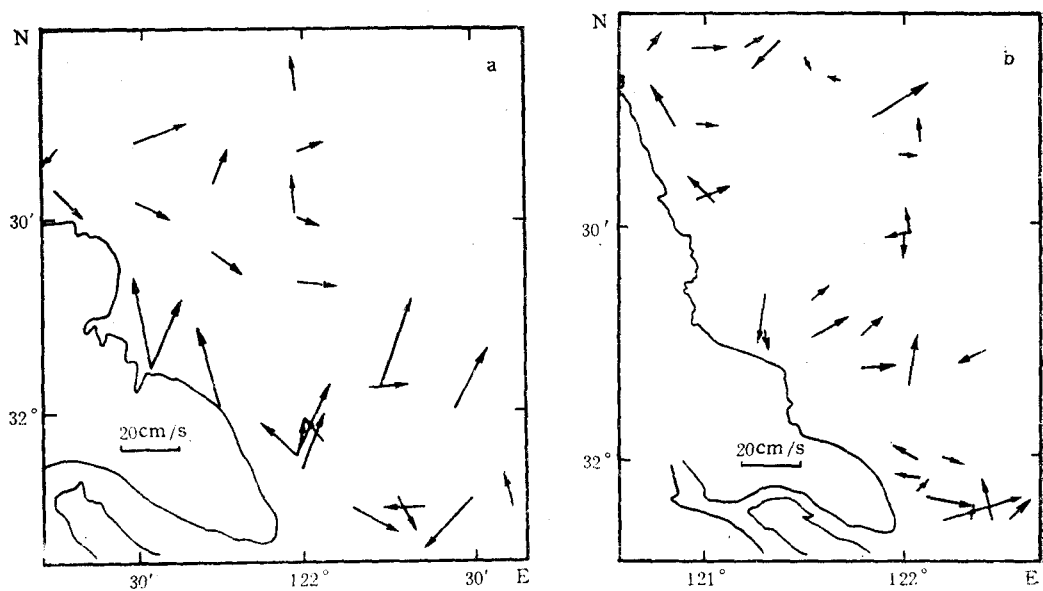


图4 苏北近海实测余流(表层)分布 (cm/s)

a. 1980年夏季; b. 1980年冬季

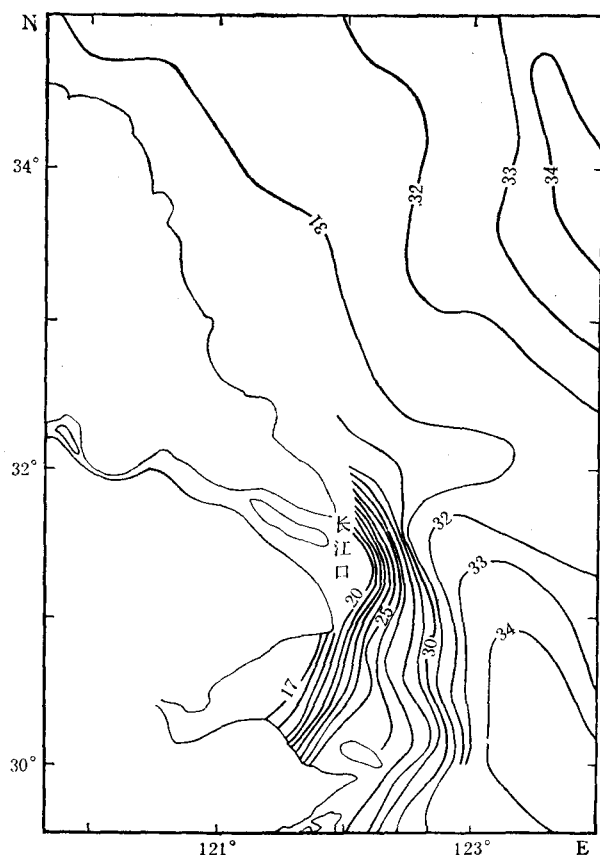


图5 长江口近海表层盐度分布(1959年2月)

5) 可看出,即使在冬季,长江北支口门外也常常可以发现一个指向东北方向的小低盐水舌,在其汇集了来自苏北近海的低盐水后,又迅速转成东南方向,形成一股指向东南的大低盐水舌。苏北沿岸并无大江入海,看来源于长江和杭州湾,贴岸北上的潮余流是苏北沿岸水和黄海沿岸流的重要淡水来源之一。

4. 渤海

渤海海峡的潮余流主要以流入渤海为主,这同海峡处北进南出的环流趋势有所不同。但是,在渤海内部,潮余流存在着一个顺时针向的大循环和莱州湾存在顺时针的小循环等均同已知的渤海环流相一致。

特别需要指出的是,数值结果表明在黄河三角洲尖凸处存在着先流向东北,然后转向北,最后到达辽东湾西岸秦皇岛近海的潮余流输送。在全国海洋普查报告中虽然没有谈及这一方向的海水运动,但是,在当时所绘制的一些温、盐平面分布图中¹⁾可以看出这支海流的存在迹象。80年代以来的实测海流资料,特别是石油平台测流资料²⁾则完全证实了

1) 全国海洋综合调查组,1963,全国海洋综合调查图集(内部资料)。

2) 赵保仁等,1993,渤海的环流、潮余流及其与沉积物输送之关系(内部资料)。

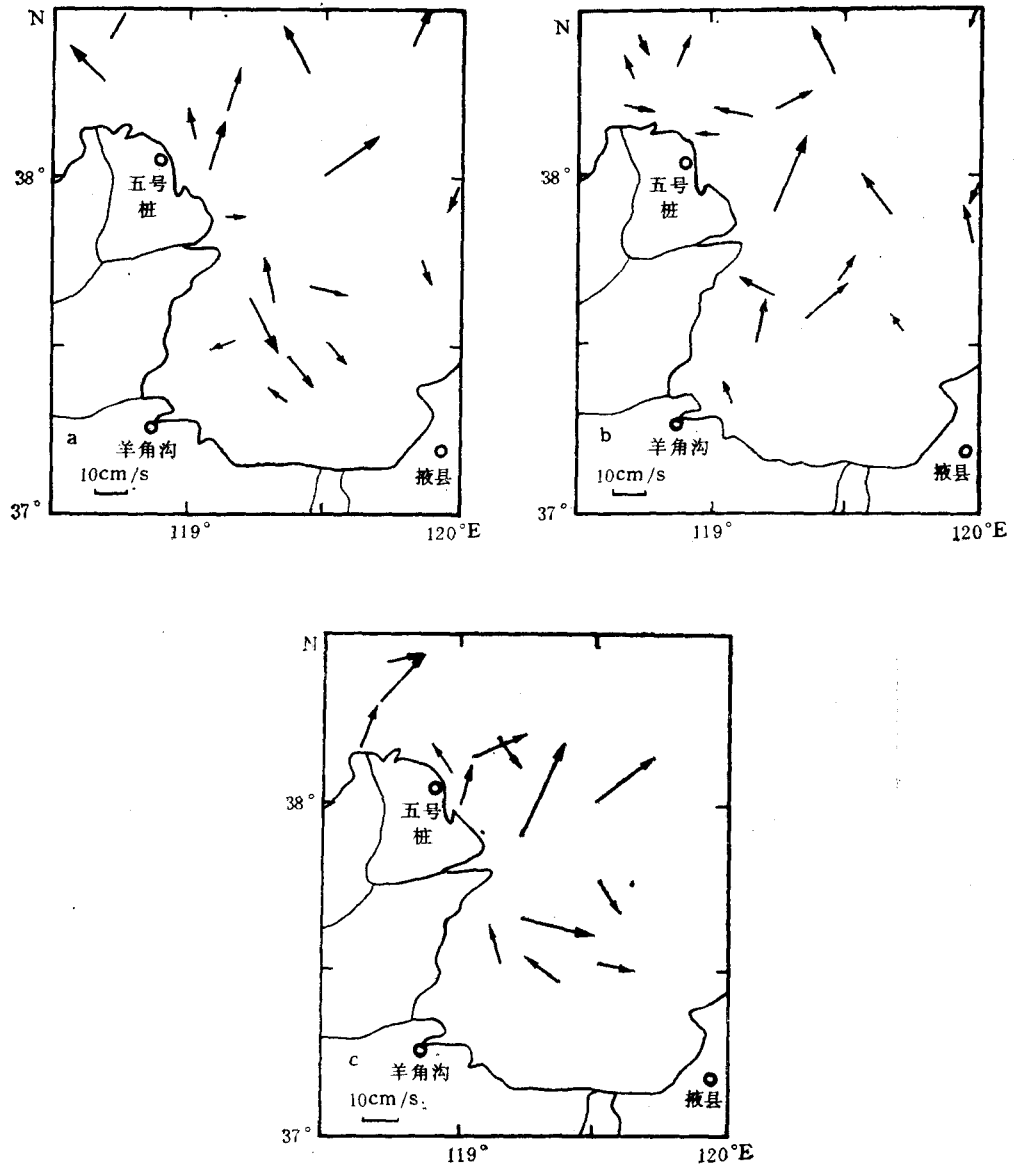


图6 黄河口近海表层余流分布

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季

它的存在。图6给出黄河口外的余流分布(李繁华等, 1989), 清楚地表明, 在黄河口处存在着流向东北方向的海水运动。另外, 从渤海沉积分布图(图7)中也可以看到, 来自黄河口的细颗粒沉积物——软泥从黄河口一直延伸到辽东湾西岸的秦皇岛以北海区, 这同潮余流所显示的物质输运完全一致。

观测表明, 黄海和渤海的余流量值一般只有 10cm/s 左右, 且方向多变。用浮标或在石油平台上进行长时间测流, 所得平均余流通常都在 5cm/s 以下, 许多甚至不足 1cm/s , 与我们给出的潮余流值十分接近。由此可知, 潮余流在近海物质的长期输运中起着重要

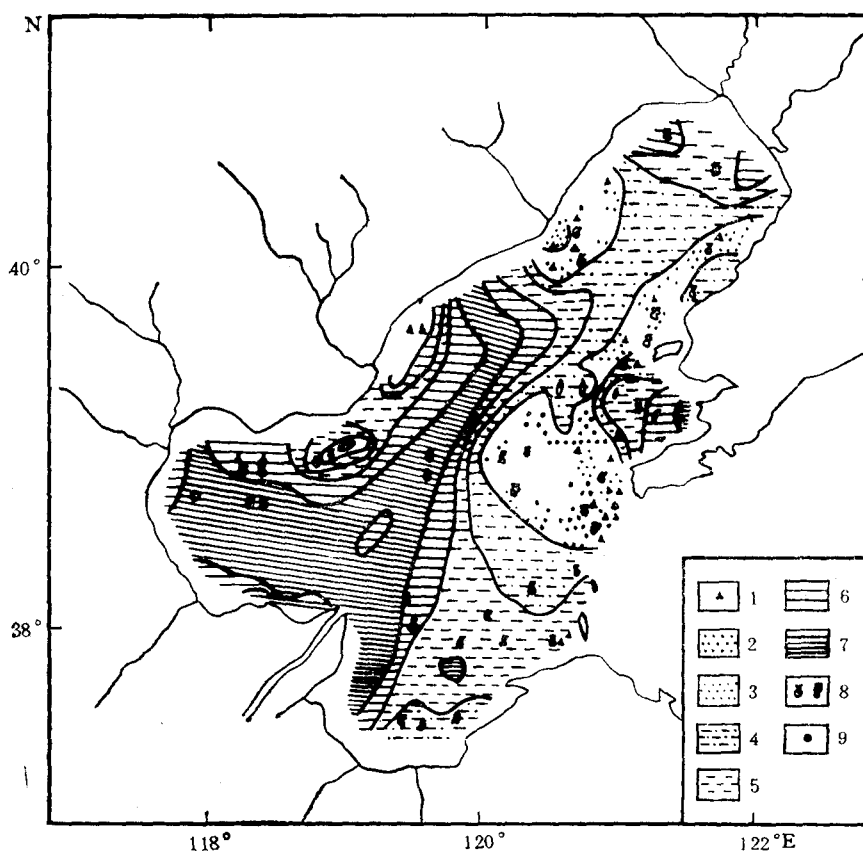


图7 渤海沉积类型图

1.砾石; 2.中砂; 3.细砂; 4.粗粉砂; 5.细粉砂质软泥; 6.粉砂质粘土软泥;
7.粘土质软泥; 8.贝壳; 9.铁锰结核

作用。

参 考 文 献

- 于克俊,张法高,1987,渤海潮波运动的三维数值计算,海洋与湖沼,18(3): 227—236。
 方国洪,杨景飞,1985,渤海潮运动的一个二维数值模型,海洋与湖沼,16(5): 337—346。
 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室,1985,渤海地质,科学出版社,232。
 王辉,苏志清等,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。
 李繁华,刘爱菊等,1989,山东近海水文状况,山东省地图出版社,221。
 汤毓祥,1990,东海和南黄海潮流的数值模拟,黑潮调查研究论文选(一),海洋出版社,33—43。
 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。
 黄祖柯,1992,渤海的潮汐余流,海洋湖沼通报,3: 1—7。
 Choi, B. H., 1980, A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, KORDI Report 80-02, Korea Ocean Research and Development Institute, 1—72。
 Fang Guohong, 1986, Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China, C. J. of Oceanology and Limnology, 4(1):1—16。
 Tee, K. T., 1976, Tide-induced residual current, a 2-D nonlinear numerical tidal model, J. of Marine Research 31:603—628。
 Zhang Fagao, Mao Hanli et al., 1987, Analysis of drift card experiments in Bohai Sea and Huanghai Sea (1975—1980), C. J. of Oceanology and Limnology, 5(1):67—72。

Zhao Baoren, Fang Gouhong *et al*, 1993, Numerical modeling on the tides and tidal currents in the Eastern China Seas, *Yellow Sea Research*, 5:41—61.

CHARACTERISTICS OF TIDAL RESIDUAL CURRENTS AND THEIR RELATIONS WITH COASTAL CURRENT TRANSPORTS IN THE BOHAI SEA, YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA*

Zhao Baoren, Fang Guohong and Cao Deming
(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

ABSTRACT

With numerical model results on the tide and tidal current in the eastern China Seas the characteristics of tidal residual currents are discussed. It is showed that in most China mainland coastal areas such as those in Liaonan, the Shandong Peninsula, offshore northern Jiangsu, and the Bohai Sea, the directions of tidal residual currents are consistent with the coastal current system. So the tidal residual currents in these areas play important roles in coastal current transport.

* Contribution No. 2410 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences