

2005年黄河调水调沙期间河口入海主流的快速摆动

王厚杰 杨作升 毕乃双 李海东

(中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266003. E-mail: hjwang@mail.ouc.edu.cn)

摘要 河口入海主流是河流泥沙入海的关键传输通道. 2005年6~7月黄河调水调沙期间, 在黄河口进行了3次沉积动力过程现场观测, 结果表明河口入海主流在20余天内产生了较大幅度的快速摆动, 在相应时段的卫星遥感图像上也得到良好的印证. 河口入海主流的快速摆动是径流与河口地形相互作用的结果. 调水调沙期间大量泥沙快速入海, 在拦门沙区域沉积形成拦门沙群, 这是导致河口入海主流快速摆动的主要原因.

关键词 黄河 调水调沙 入海主流 快速摆动 拦门沙群

黄河多年平均入海沙量约为10.8亿吨^[1], 然而近50年来黄河入海径流量和输沙量急剧减少^{[2,3]1)}, 导致河流断流频仍, 下游河床抬高, 行洪能力降低. 2002年7月黄河水利委员会开始利用黄河干流大型水库实施调水调沙, 以人造洪峰冲刷黄河下游悬河河槽, 将黄河泥沙输送入海, 并确定黄河下游冲淤变化的临界流量^[4]. 2005年6月16日第4次黄河调水调沙启动, 标志着调水调沙已经由试验性阶段正式转入生产应用阶段. 自2002年以来, 黄河调水调沙时期成为水沙入海的主要时段^[5](图1). 2002年7月黄河调水调沙期间入海径流量和泥沙量分别占全年水沙量的64%和84%(图1(a)); 2003年9月调水调沙期间入海径流量和泥沙量分别占全年水沙量的25%和44%(图1(b)). 因此黄河调水调沙期间大量径流和泥沙快速入海对于河口地形、地貌以及河口演化具有极为重要的意义, 这期间也是研究黄河口高浓度泥沙传输过程的“黄金”时段.

然而目前针对黄河调水调沙期间河口入海径流泥沙传输过程、路径和范围而开展的现场监测与研究不足, 仅有张建华等^[6]分析了2002年调水调沙期间河口拦门沙的演变. 2005年6~7月中国海洋大学在第4次黄河调水调沙的初始阶段(6月15日)、中间阶段(6月21~23日)和后期(7月3~5日)进行了3次黄河口沉积动力过程现场观测, 整个调水调沙期间的河口入海径流流量变化过程如图1(c)所示. 通过海上调查发现河口入海主流在短短的二十余天内发生大幅度的快速摆动, 这一河口现象在世界其他大河河口的沉积动力学研究中尚无公开报道. 在目前黄河入海

径流量和输沙量很低的形势下, 河口的演变具有不同于以往的独特模式, 即短时间内(1个月)入海泥沙的快速堆积与年内长时间段的侵蚀相结合. 河口入海主流是调水调沙期间泥沙入海的关键传输通道, 对它的观测和记录能够为我们提供高浓度泥沙入海后传输过程的信息. 本文作者主持了2005年调水调沙期间3次黄河口沉积动力过程的现场观测, 根据现场记录资料和卫星遥感资料分析了其间河口入海主流的快速摆动, 并对主流快速摆动的可能原因进行了讨论.

1 河口入海主流的基本特征

黄河调水调沙期间河口入海主流在外观上表现为水面高于周围水体的湍急的河流淡水水体, 与长江口径流相似, 具有射流体的性质^[7]. 它是河流泥沙向海传输的关键通道, 水体浑浊, 泥沙絮团大量存在. 主流区外水体浑浊程度降低, 与主流区水体形成较大的颜色反差. 主流宽度不过百米, 与周围较为平静的水体相比, 主流水面起伏不平, 以明显的浊浪为特征(图2), 伴有响亮的流水声. 快速入海的河流淡水与周围海水水体产生了很强的盐度梯度, 由此产生的斜压效应与水位坡度形成的压强梯度相平衡, 导致主流区的水面高于周边水面.

7月3日利津站流量达到调水调沙期间的最高值(图1(c)), 在当日14:00落潮时段观测到的主流也最为明显. 从远处看, 主流区的水面明显高于周边水体, 主流区外水面低而平静(图2(a)). 在主流区内部水体浑浊, 水流湍急, 浊浪激荡起伏, 声逾奔马, 气势壮观, 中间杂以从河道冲泄而下的芦苇和水草(图2(b)).

1) Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. The Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: connections to impacts from ENSO events and dams. Submitted to Global and Planetary Change, 2005

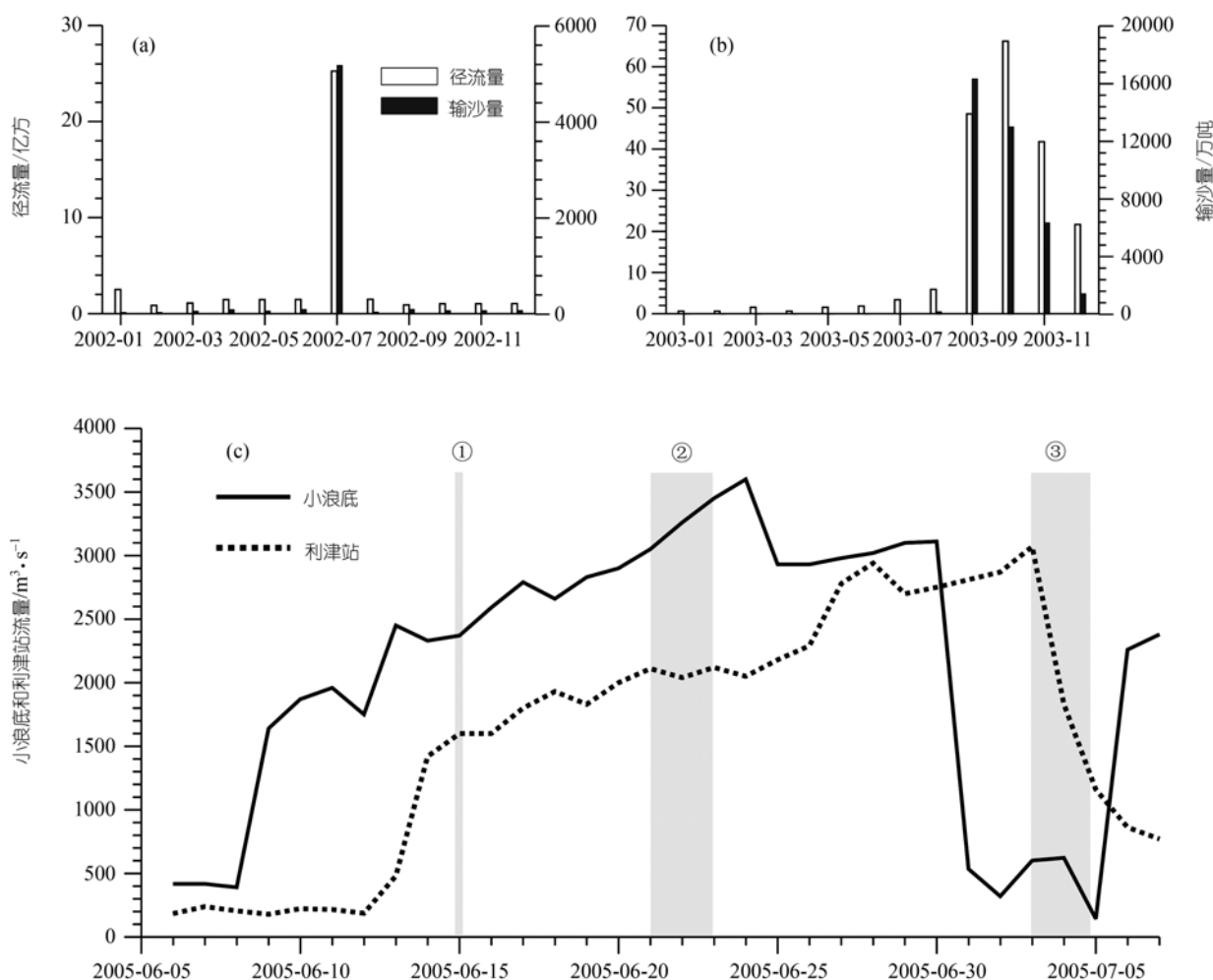


图 1 2002 年(a)和 2003 年(b)黄河利津站入海径流量、输沙量月际变化过程, 2005 年黄河调水调沙期间小浪底、利津站流量变化过程(c)

灰色条带表示 2005 年黄河河口现场观测时段

从动力学特征上看, 主流区的水流除受涨落潮流的影响而产生摆动以外, 在东西方向上基本为河流下泄流所控制. 经过 2004 年调水调沙以及冬季季节性动力改造后, 河口口门基本上偏东南方向, 在落潮时与口外西北向落潮流相互作用, 使得落潮时主流区流向时有紊乱; 在涨潮时流向稳定, 变化缓慢, 但是流速较落潮时段低(图 3). 水体盐度剖面在涨落潮时亦有显著差异. 在落潮时水体的总体盐度低于 1‰, 在垂向上混合均匀; 在涨潮时盐度垂向剖面记录显示明显的层化结构, 表层淡水的厚度不足 1 m, 向下盐度快速增加至 29‰左右(图 3).

2 河口入海主流的快速摆动

在 2005 年黄河调水调沙期间进行的 3 次黄河口

沉积动力过程现场观测表明河口入海主流在 20 余天内发生了较大幅度的快速摆动.

2.1 6 月 15 日观测

在正式调水调沙之前, 小浪底水库已于 6 月 9 日开始预泄, 流量达 1600 m³/s, 至 6 月 14 日利津站方有明显反应(图 1(c)). 为了合理布设调水调沙期间河口现场观测站位, 在 6 月 15 日对河口区域地形进行了勘测. 6 月 15 日 10:00 由河口北侧孤东海堤出发, 配备测深仪, 采用 GPS 定位, 根据河口的标志点(图 4 中的 C09 和 C08)进入河口主流区. 在 N 37°46.389', E 119°19.166'位置上观测到河口入海主流, 由此沿主流方向向河口口门推进, 在经过标志点 C08 后流速很大, 船只难以继续进入河道, 转而由此向外作水深

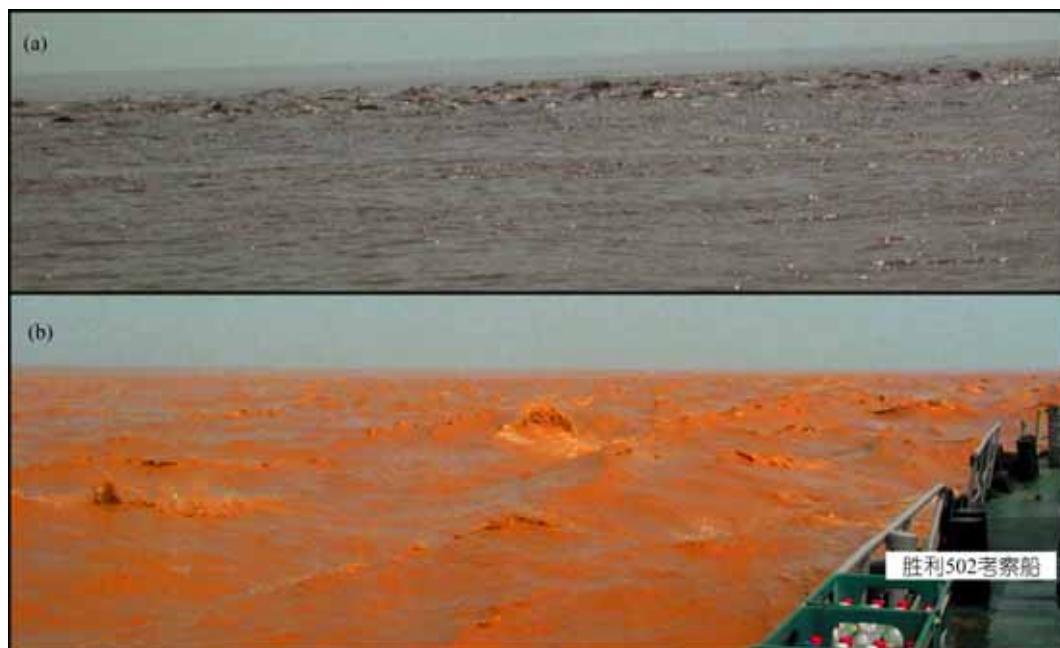


图2 2005年7月3日黄河口主流照片

(a) 河口主流的远观特征; (b) 近观形态

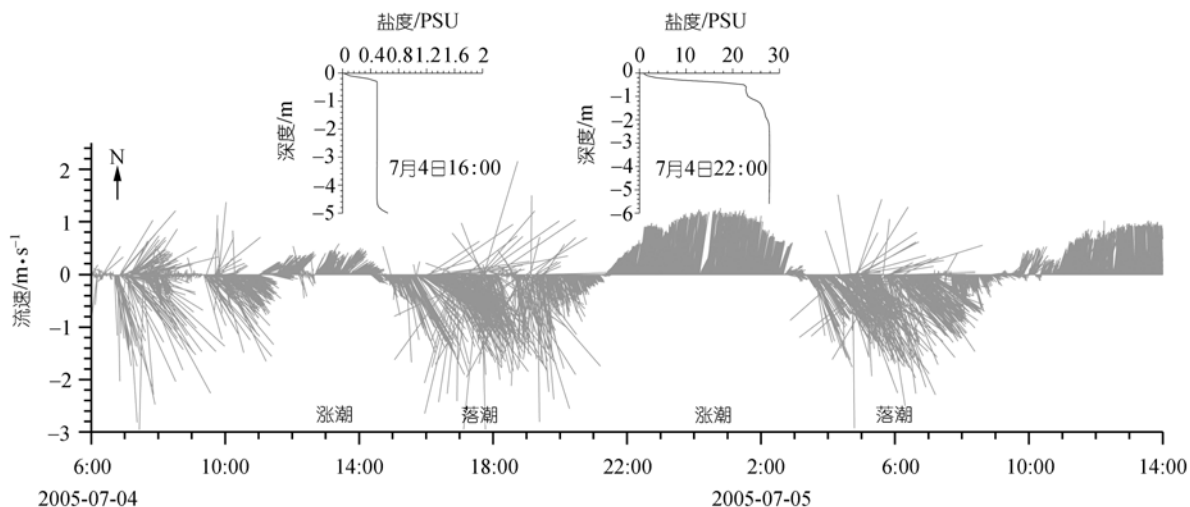


图3 7月4~5日河口主流站位上的连续海流记录和涨落潮时刻的盐度剖面

站位位置如图4所示。图中箭头和字母“N”指明北向

观测,测深航迹如图4所示。

水深观测结果(图4)表明,河口拦门沙附近2 m以浅的区域水深变化平缓,2 m以深区域的水深梯度较大,基本上为东南走向,这与当时的河口入海主流方向相吻合。

2.2 6月21~23日三船同步观测

根据6月15日水深观测结果以及主流位置和走

向,初步设计了3个定点观测站位A、B和C(图4)。C站观测25 h后转移至D站位,D站位定点观测13个小时后转移至D1站位,A站和B站始终保持不变。配备的主要仪器有自容式海流计(ALEC公司生产的Compact EM,流速流向精度为 $\pm 2\%$)、YSI多参数水质仪、便携式温盐深仪(Compact-CTD,精度)、双频测深仪(E-Sea Sound 206C,频率为24kHz/204kHz)以

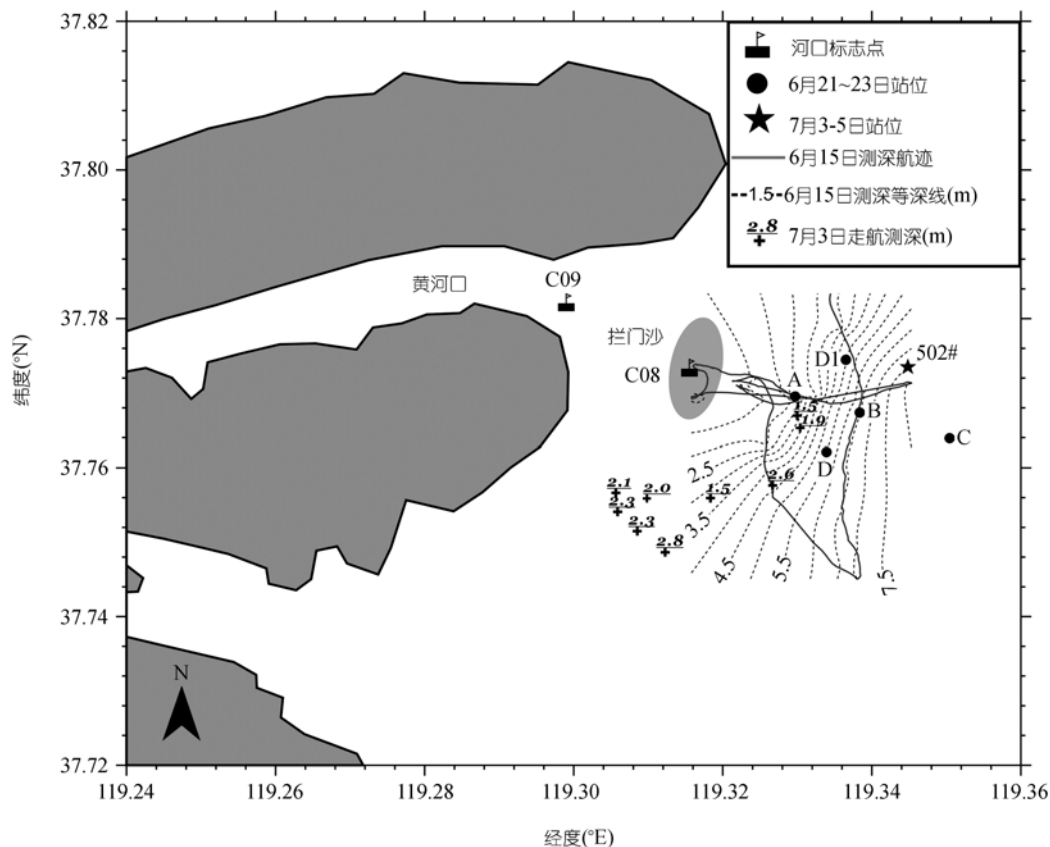


图4 2005年6月15日、7月3日黄河口拦门沙区域地形观测对比以及现场调查站位设计

及水样采集设备。观测时间自 6 月 21 日 11:00 至 6 月 23 日 14:00, 在 21 日夜间 21:00 至次日凌晨 3:00 遭遇 7 级以上大风, 观测有数小时中断。

从现场观测情况来看,虽然各站水体浑浊度很高,但并未记录到如 6 月 15 日所观测到的入海主流,不仅在外观上相去甚远,仪器记录上亦无表征.图 6 为 A 站位海流连续记录,可以明显地分辨出涨落潮时段.涨潮流基本为西南方向,而落潮流基本为东北方向,河口径流的影响并没有在其中得到反映.涨、落潮的盐度剖面相差无几,中层以下的盐度分布基本没有变化,只是在落潮时表层的淡水厚度略有增加(图 5).从上述观测结果来看,A、B 和 C 三个站位并未处于河口入海主流位置上,与 6 月 15 日的观测相比,主流已经发生了摆动.

一个重要的现象是 D 站位观测期间在其南侧看到了河口的主流, 并听到有响亮的溶急水流声音. D 站位的水体浑浊度也高于其他的站位. 但 D 站位 13 小时观测结束后移动到 D1 站位, 并未发现周围存在河口主流的迹象. 因此可以推断, 河口主流在 21~23

日已经向河口南侧摆动.

2.3 7月3~5日现场观测

为了详细记录调水调沙期间河口主流的动力结构、温盐分布结构和高浓度泥沙的传输过程,在7月3日乘胜利502号考察船于13:30抵达河口,适逢落潮,是河口主流最为明显的时段。在 $N 37^{\circ}46.456'$, $E 119^{\circ}20.457'$ 的位置(B站位北侧)发现河口入海主流。与6月15日观测的主流相比,水面更高,水体更为浑浊,流速更急,瞬时流速可达 3.0 m/s 。

在主流位置确定后, 502 号船由主流区向南作折线走航, 途中多次搁浅, 河口前缘的地形与 6 月 15 日的观测相比已经有相当大的变化(图 4)。7 月 4 日 6:00 在主流区 4 米左右水深位置开始定点观测。在主流区内船只随流向的摆动而有所偏转, 但始终在主流区内, 偏转过程中水深从 4 米左右变化至 6 米左右。观测期间海上气象状况良好, 至 5 日 14:00 连续观测的时间达 32 h, 详细记录了调水调沙后期利津站流量从 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 快速降至 $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ 过程中河口水文、泥沙变化信息。主流区的外观特征和水流、典型盐度剖

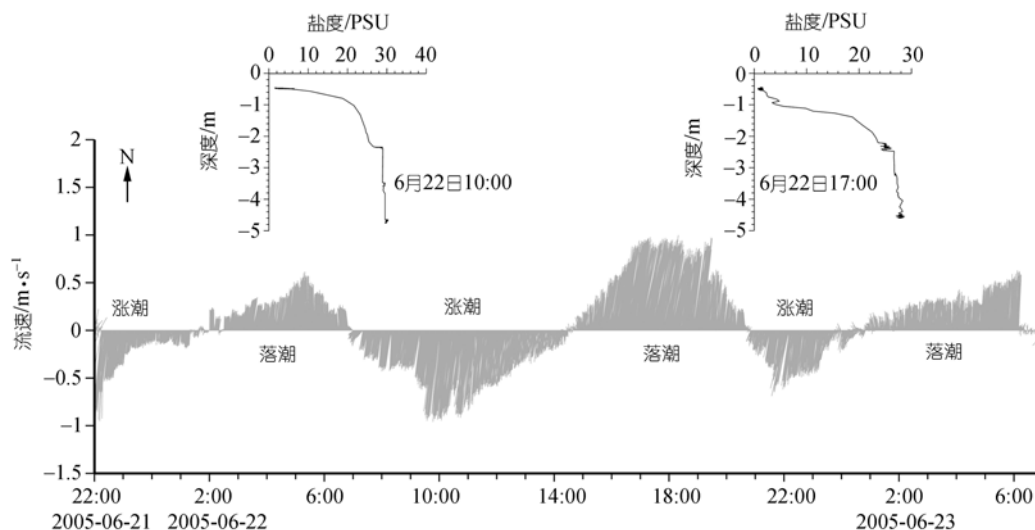


图5 6月21~23日在非主流站点A上海流连续记录以及涨落潮时刻的盐度剖面特征
 站点位置如图4所示. 图中箭头和字母“N”指明北向

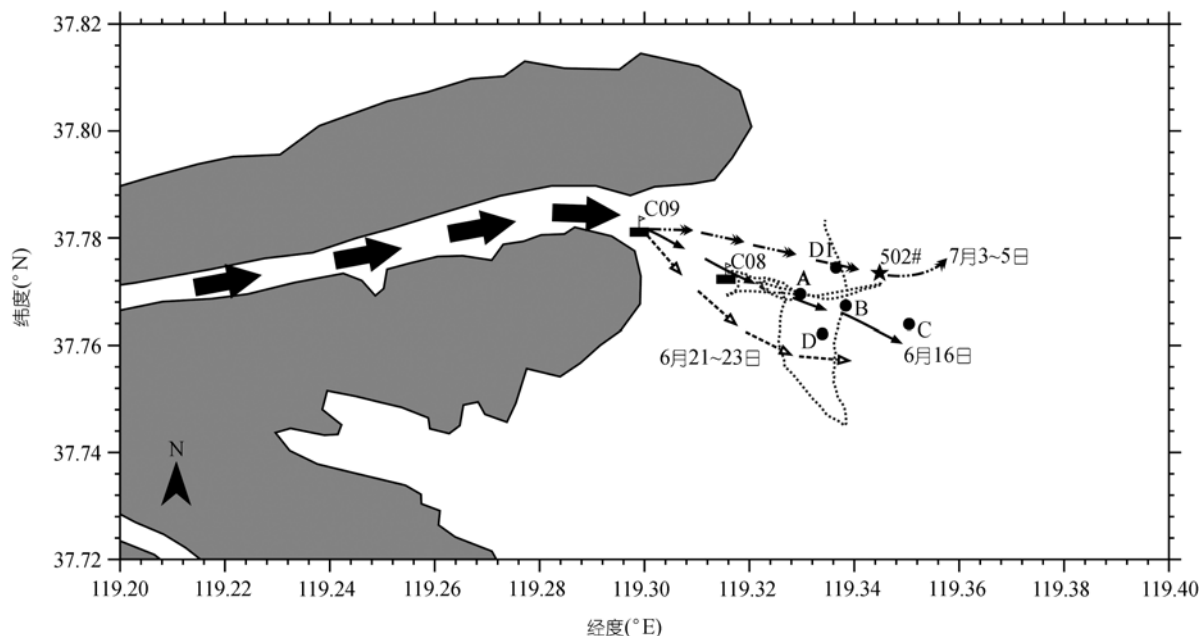


图6 黄河口现场调查记录到的河口主流方位, 反映了2005年调水调沙期间河口主流的快速摆动

面特征分别如图2和3所示.

2.4 河口入海主流的摆动过程

三次河口现场观测表明调水调沙期间的河口入海主流并不是稳定在一个固定方位上, 而是随时在变换位置. 对入海主流的走向采用如下定义: 以北向为 0° , 顺时针方向旋转为正. 如图6所示, 在调水调沙的初期(6月15日)利津站的流量在 $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右, 受河口口门的约束, 主流方向基本上是 120° 的方向

(东南偏东). 在中间阶段(6月21~23日), 在预设的站点上并没有观测到预期的主流, 仅在D1站点远远看到了其南侧有水面高出周围水体的湍急浊流, 这表明主流已经向南摆动, 其大致方位为 150° (东南偏南). 在7月3~5日观测期间, 主流又向北摆动, 大致的方位为 100° 左右(偏东). 河口入海主流的上述摆动过程在卫星遥感图像上也得到了相应的印证. 经过2004年黄河调水调沙和冬季风暴的动力改造以后,

河口口门由原来的东北向向东南偏转, 河口径流也偏东南方向, 在口外受落潮流影响转向北(图 7(a)和(b)). 图 7(c)为 2005 年 6 月 16 日 3:14 的 SPOT5 卫星遥感图像, 显示落潮时段河口主流的方向基本为东南方向, 泥沙扩散范围并不大, 从 C08 标志点至清浑水界面仅有 4 公里左右. 河口主流走向与 6 月 15 日观测和 6 月 21~23 日站位布设基本一致, 但是 6 月 21~23 观测期间主流已向南摆动. 在 7 月 4 日 3:00 的 IRS-P6 卫星图像(图 7(d))上显示落潮时河口主流已经向北摆动, 基本方位为东稍有偏南, 这与海上的现场观测是一致的(图 6).

3 河口入海主流快速摆动的可能原因

河口主流短期内的快速摆动是复杂的河口动力与地形相互作用的直接反应, 导致主流摆动的原因可以大致归结于两个方面: (i) 河口拦门沙区域地

形的快速变化; (ii) 调水调沙期间河口径流量的快速变化.

首先, 调水调沙期间小浪底水库排出的大量泥沙以及下游河道冲刷带来的泥沙在短时间内快速入海, 其中颗粒较粗的部分以及细颗粒泥沙絮凝所形成的团絮会在河口拦门沙附近快速沉积, 从而导致拦门沙区域水深快速变浅, 水深变浅则使得河口主流转向. 这种变化过程与陆上河段的改道有相似的机理, 只是后者的时空尺度较前者要大得多. 在 7 月 3 日胜利 502 考察船在由主流区向南走航过程中不断搁浅(船只的最低吃水为 1.2 m). 与 6 月 15 日的测深结果相比, 水深已明显变浅, 河口前缘的淤积厚度在 0.5~2.0 m(图 4), 表明这期间随着河口主流快速摆动入海泥沙在河口前缘快速沉积, 从而形成了水深较浅的拦门沙群, 这反过来又导致河口主流不稳定, 不

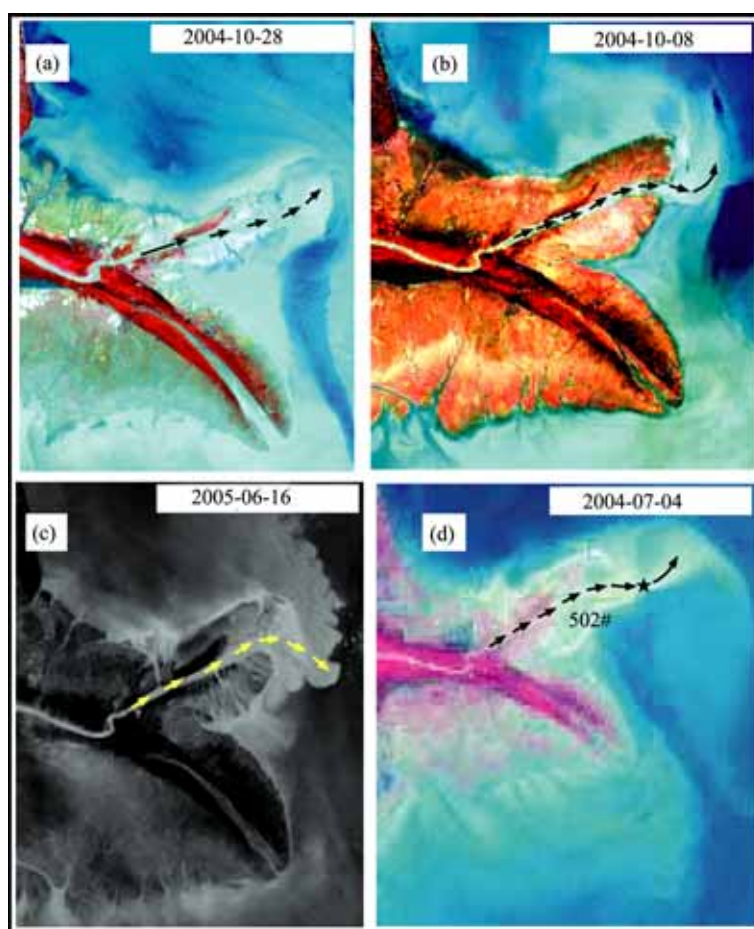


图 7 2004 年以来不同时期卫星遥感图像反映的黄河口口门变动及河口入海主流走向和位置(图中箭头所示), 其中(c)和(d)对应了 2005 年调水调沙期间观测的入海主流位置

卫星遥感图像由中国科学院中国卫星遥感地面站(www.rsgs.ac.cn)提供

断摆动以寻找入海最为通畅的路径。这样就形成了短时间内河口主流与河口地形的强烈互动。

其次,调水调沙期间河口流量经历了由低到高的变化过程,径流流量越大,其本身的能量和惯性力就越大,从而就越能保持河流径流的方向,这也可能是7月3~5日河口主流向北摆动的原因之一。朱兰部等^[8]认为黄河径流量是影响黄河冲淡水转向的一个重要因素,但是并未考虑地形因素的作用。乐肯堂^[9]对于长江冲淡水路径转向问题的动力学分析表明长江口冲淡水转向存在临界流量,当径流量大于临界值时冲淡水能够向左(北向)偏转,这与Beardsly等^[10,11]的分析结果是一致的。黄河口也存在类似的情形,只是空间尺度要比长江口冲淡水小得多^[8,9,12]。

Rossby 数表征惯性力与柯氏力比值:

$$R_o = \frac{u}{fL},$$

其中, u 为河口入海主流的特征流速, f 为柯氏力系数,可由 $f = 2\Omega \sin \varphi$ 确定,地球转动角速度 $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, φ 为研究区域的纬度, L 为主流区的空间尺度。调水调沙期间河口入海主流平均流速为 1.0 m/s , 水平空间尺度为 5 km , R_o 大致为 2.3 , 表明惯性力远大于柯氏力。在7月3日河口流量达到最高,主流流速在 2.0 m/s 左右, R_o 约为 4.6 , 同样是惯性力起主导作用。因此柯氏力对河口主流摆动的影响甚微。

潮流及其引起的河口切变锋对黄河口泥沙的传输和沉积具有重要的作用^[13],但在7月4~5日长达34 h的定点连续观测过程中河口入海主流在涨、落潮时段并无明显摆动,表明潮流对主流的快速摆动没有显著的影响。当然,对黄河调水调沙期间河口主流快速摆动的机制还需要详细的动力学分析,而河口拦门沙地形的快速变化必须作为重要因素加以考虑。

4 结论

随着黄河入海水沙通量不断减少,调水调沙成为黄河泥沙入海的主要方式,这期间也是观测和研究河口高浓度泥沙沉积动力过程的关键时段。2005年黄河调水调沙期间的3次河口沉积动力过程观测表明河口入海主流是泥沙入海的关键传输通道。在

动力特征表现为受河流下泄流控制,落潮时为河流淡水,涨潮时底层有盐水楔入。在调水调沙的短时间内,河口入海主流发生较大幅度的快速摆动,摆动过程中入海泥沙在河口前缘大量淤积,快速形成河口拦门沙群。河口地形地貌的快速变化是入海主流快速摆动的主要原因,调水调沙期间河口径流流量的变化也是影响主流摆动的另外一个重要因素。

致谢 作者衷心感谢参加2005年黄河口海上调查航次的所有工作人员、黄河河口研究院程义吉和胜利油田海洋船舶公司孙源。审稿人对本文提出了宝贵的意见和建议,谨致谢忱。本研究受国家重点基础研究发展规划项目(批准号:2002CB412404)和国家自然科学基金项目(批准号:40306008)资助。

参 考 文 献

- 1 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 1983, 91: 1~21
- 2 Yang Z S, Milliman J D, Liu J P, et al. Yellow River's water and sediment discharge decreasing steadily. *EOS*, 1998, 79: 589~592
- 3 Xu J. Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China. *Environmental Management*, 2005, 31(8): 328~341
- 4 李国英. 黄河调水调沙. *人民黄河*, 2002, 24(11): 1~5
- 5 中国河流泥沙公报, 2003. 中华人民共和国水利部. www.hydroinfo.gov.cn
- 6 张建华, 徐丛亮, 高国勇. 2002年黄河调水调沙试验河口形态变化. *泥沙研究*, 2004, 5: 68~71
- 7 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨. *海洋与湖沼*, 1963, 5(3): 183~206
- 8 朱兰部, 赵保仁, 刘克修. 黄河冲淡水转向问题的初步探讨. *海洋科学集刊*, 1997, 38: 61~67
- 9 乐肯堂. 长江冲淡水路径的初步研究. *海洋与湖沼*, 1984, 15(2): 157~166
- 10 Beardsly R C, Hart J. A simple theoretical model for the flow of an estuary onto a continental shelf. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83: 873~883
- 11 Beardsly R C, Limeburner R, Yu H. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 1985, 4: 57~76 [DOI]
- 12 Takano K. On the velocity distribution off the mouth of a river. *Journal of Oceanography Society of Japan*, 1954, 10(2): 60~64
- 13 Li G X, Yang Z S, Yue S H, et al. Sedimentation in the shear front off the Yellow River Mouth. *Continental Shelf Research*, 2001, 21: 607~625 [DOI]

(2005-09-17 收稿, 2005-11-07 收修稿稿)

1) Wang H J, Yang Z S, Guo Z G, et al. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) mouth. 2005