

渤海悬浮颗粒物三维输运模式的研究

II. 模拟结果*

江文胜 孙文心

(青岛海洋大学物理海洋研究所 青岛 266003)

提要 利用本文 I 给出的悬浮物输运的三维动力数值模式,在渤海中进行了两种情形下的模拟。首先模拟了黄河排出的细颗粒物在渤海中的运动,结果表明,这些颗粒物大部分将滞留在渤海内,而且其分布与气象条件有密切关系。另外对大风情况下悬浮物的输运进行了模拟,结果显示,大风到来时海水中的悬浮物浓度急剧上升,海底侵蚀增强,而风停止时,悬浮物浓度经过一段时间延迟后,会恢复到正常状态。这与实际观测的趋势是一致的,表明用本模式研究悬浮物的输运是可行的。

关键词 悬浮物,输运,海流,海浪,数值模拟

中图分类号 P731

用数值方法研究悬浮物的输运问题是一个较新的课题,这一方法的使用可使悬浮物输运的研究向量化迈出一大步,特别是其对某一来源的悬浮物去向和强风作用下的骤变的研究更是如此。鉴于渤海的特点,在渤海进行这样的定量研究十分重要。因此利用本文 I 的模式(江文胜等,2000)对渤海中的悬浮物输运进行数值模拟。

1 黄河排出的颗粒物的追踪

1.1 模型的基本配置

在整个渤海,水平方向采用的是 5×5 分经纬度的网格,垂直方向分 10 层,各层厚度从海面下依次是:6 层 3m,2 层 5m,1 层 10m,1 层 27m,各点最下一层按实际所剩余的厚度计算。开边界取在 $122^{\circ}25'E$,黄河的入海点在 $37^{\circ}55'N, 119^{\circ}E$ 。

在开边界处利用 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 等 5 个天文分潮的调和常数及天文因子构造出 1982 年的实时潮位,海面的气象条件由沿渤海岸边 9 个海洋观测站的气象数据来进行插值。这 9 个站是成山角、烟台、龙口、塘沽、秦皇岛、鲅鱼圈、长兴岛、大连、小长山。气象要素包括风场、气压等,风场为每 6 小时一个值,气压为每天一值,使用的是 1982 年一年的资料¹⁾。

模式中还考虑了黄河的径流,1982 年黄河年径流量为 297.0 亿 m^3 ,年输沙量为 5.42 亿 t ²⁾。由于没有更为详细的资料,只能根据多年平均的径流量,输沙量的曲线,按比例推

* 国家自然科学基金资助项目 49806007 号;国家教委博士点基金资助项目,97042305 号;国家重点基础研究发展规划资助项目,G1999043804 号。江文胜,男,出生于 1969 年 5 月,博士,副教授,E-mail:wsjang@ouqd.edu.cn

1) 国家海洋局海洋站观测资料,1982

2) 黄河利津水文站,1982 年的观测结果

收稿日期:1998-04-20,收修改稿日期:1999-04-23

算出 1982 年各月的径流量及输沙量。模式中时间步长取为 1800s。

1.2 追踪结果

为了研究不同季节从黄河排出的悬浮物在渤海中的运移,于 1982 年 1 月 4 日、4 月 1 日及 7 月 1 日,在黄河口设置 100 个被追踪的粒子,分别计算,并假定这些粒子的粒径均为 $10\mu\text{m}$,它们的沉降速度由 Stokes 公式给出。经过计算得出这 100 个颗粒在渤海中的位置,有的悬浮在水中,有的沉积在海底。所得结果见图 1。



图 1 追踪粒子分布序列示意图

Fig. 1 Distribution patterns of traced particles

a. 3 月 5 日(1 月 4 日释放); b. 6 月 28 日(4 月 1 日释放); c. 9 月 30 日(7 月 1 日释放)

○ 悬浮态(suspended); ● 沉积态(deposited)

从图 1 可以看出,颗粒物的输运在不同季节是不一样的。经过分析,发现这种不同主要是由不同季节气象因素的不同而引起的,其中起主要作用的是海面风应力。由于在黄河口附近没有找到气象资料,所以这里的气象条件是由其它的几个岸边站观测值插值得来的。对这里影响最大的两个站是塘沽和龙口,因此可以观察这两个站的风场与黄河口输出的颗粒物去向的关系。

观察 1 月、4 月、7 月黄河口排出的颗粒物的去向图(图 1)可以发现,1 月份排出的颗粒物有向东北偏东方向运移的趋势,随着颗粒物向离岸方向扩展,一部分渐渐转向南方,向莱州湾方向发展。从 1982 年 1 月、2 月、3 月的风玫瑰图¹⁾可以看出,在 1 月份,黄河口的风向主要集中在东南、西北向,但这时由于颗粒刚刚进入海中,聚集在岸边,受风的影响不大,而且风只是使它们来回运动,总是停留在河口附近;到了 3 月份,塘沽站西南风较强,加上龙口较强的东南风使在黄河口的悬浮物向东北方向移动。

4 月份黄河口排出的泥沙的去向与 1 月份的明显不同,它们是沿着渤海湾南岸向渤海湾内运动的。这也与风的作用有直接关系,从 4 月份的风玫瑰图¹⁾可以发现,塘沽风向较为分散,而龙口风向仍为东南、西北方向。同样,这时的颗粒物受风的影响较小。5 月份塘沽及龙口的风向多为东南风,所以,这时的颗粒物就沿着渤海南岸进入渤海湾。但到了 6 月份,有些粒子又开始向渤海湾外移动。

7 月份起始的颗粒物基本上是向东运动,从 7、8、9 月的风玫瑰图¹⁾可以看出,这时的风力较冬季的小,因此这时有更多的颗粒沉积在水下。

1) 江文胜,1997. 渤海悬浮物输运的动力模型和数值研究,青岛海洋大学博士学位论文

Yanagi 等(1995)曾利用冬季平均的风场计算了海浪,并用二维潮模式计算了渤、黄、东海的 M_2 分潮和在冬季平均风场作用下及温度、盐度场下的诊断流场,以及 M_2 的潮致余流。然后在这些作用力的驱动下,进行了粒子的数值追踪。这个模拟共进行了 15 个月,但这 15 个月并不是真正意义上的 1 年零 3 个月,而是全部在冬季的条件下重复的过程。他们的结果是由黄河排出的悬浮物基本上滞留在渤海内,大部分将很快沉积在河口附近。这与本文结果一致。Yanagi 等(1995)结果显示,大部分悬浮物将沉积在渤海湾的近南岸处,少数的粒子会到达渤海湾的中部,但所有的粒子几乎都在渤海湾内。这一点与本文结果不一致,这种不一致可能是由于首先他们采用的是冬季平均风场,这种风场把一些大风给平均掉了,而大风过程对于悬浮物的输运无疑是重要的。另外由于他们是对整个渤、黄、东海的模拟,因此网格较粗,会影响模拟的结果。

2 悬浮物浓度对风的响应

2.1 模式的配置

研究渤海中悬浮物浓度对风的响应,必须知道海底的底质中细颗粒物质的分布情况,这一条件是根据中国科学院海洋研究所海洋地质研究室(1985)、Saito 等(1993)及《渤海、黄海、东海海洋图集》(1992)等文献中的各种粒径物质在底质中的含量图综合得出的。

黄河排出的泥沙量如前所述估算出,黄河排沙量尽管很大,但据地质学家研究,排出的泥沙大部分沉积在河口附近,直接覆盖在水下三角洲上,参与造陆运动。Pang 等(1980)估计黄河排出的泥沙只有 36% 没有立即沉下,而被海水输运走。这里由于模拟时网格较粗,再加之黄河口附近地形、岸线变化复杂因此不能对黄河口附近作很细致地刻画。另外,在模式中没有考虑絮凝作用,所以在河口附近由于淡水与盐水混合而使悬浮物快速沉积的机制就体现不出来。因此本研究取黄河总输沙的 36% 来作为在这个地方的悬浮物输入,也就是说,把黄河的输入点放在了河流中悬浮物已大量沉积之后的地方。

黄河口排出的颗粒物的粒径分布见表 1。利用表 1 的数据,将黄河排出的粒径在 $20\mu\text{m}$ 以下的悬浮颗粒物简化为 3 种粒径,即 $16\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 和 $4\mu\text{m}$,而这三种粒径的颗粒占小于 $20\mu\text{m}$ 的颗粒的比例依次为 20%、40% 和 40%。按这个比例把进入海水中的悬浮物颗粒分成三类,根据 Stokes 公式它们有不同的沉降速度。当然利用 Stokes 公式可能会低估某些细颗粒物的沉降速度,如在絮凝发生的情况下,但是由于絮凝的复杂性(Eisma, 1993),任何简单的修正都不足以产生本质的区别,而且本文只想在趋势上研究悬浮物的输运,因此在这里采用 Stokes 公式来计算沉降速度。

表 1 1982 年 7 月黄河利津站沉积物粒径分布(引自 Zhang, 1985)

Tab. 1 The size distribution of sediment at Lijin station on the Huanghe River in July, 1982 (from Zhang, 1985)

粒径(μm)	63—32	32—16	16—8	8—4	<0.004
含量(%)	7.10	12.10	25.10	23.70	32.30

模式中暂不考虑海面的悬浮物来源。起始时给定在全海域 40mg/L 的均匀初始场,整个模拟从 1982 年 1 月 1 日开始,最终模拟至 1982 年 8 月 31 日。对其间大风作用下的悬浮物的分布作了分析。

2.2 深度平均悬浮物浓度对风的响应

在整个 8 个月的模拟过程中,有几次大风过程,其中 1982 年 3 月 23 日到 25 日在渤海湾和莱州湾就有一次。在这次过程中,莱州湾风速有 9m/s 以上,而在渤海湾则达到 15m/s 以上。在这种风场驱动下,从模拟结果可以看出,随着风浪的加大,海底的摩擦速度超过了临界速度,使得海底发生了侵蚀,海底侵蚀出来的细颗粒物进入水中,在风的搅拌作用下,海水中的悬浮物不能沉积下来,水中的悬浮物含量迅速上升。然后随着风力的减弱,水中的细颗粒物慢慢下沉,由于海底摩擦速度的减小,于是海底在发生了淤积,从而使海水中的悬浮物浓度下降,图 2 及图 3 所展示的海水中悬浮物浓度及海底细颗粒物含量的变化图,清楚显示了这一过程。

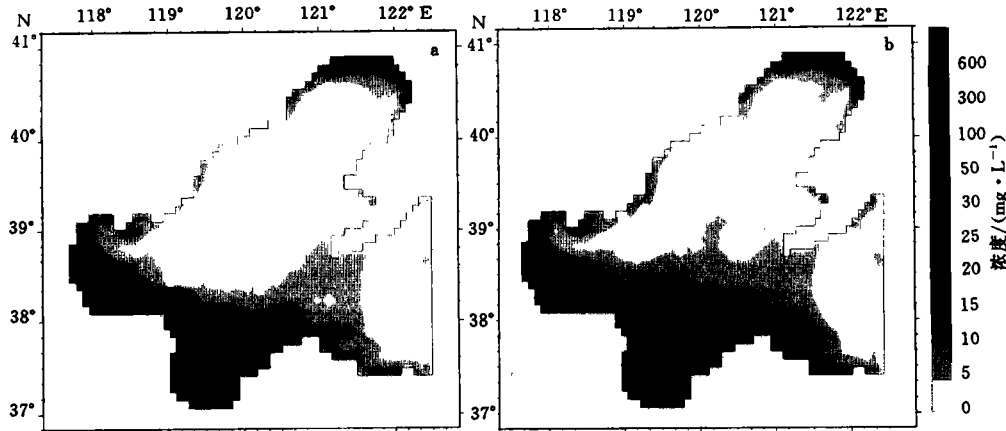


图 2 悬浮物浓度分布

Fig. 2 SPM concentration distribution
a. 03-23-00:00; b. 03-23-08:00

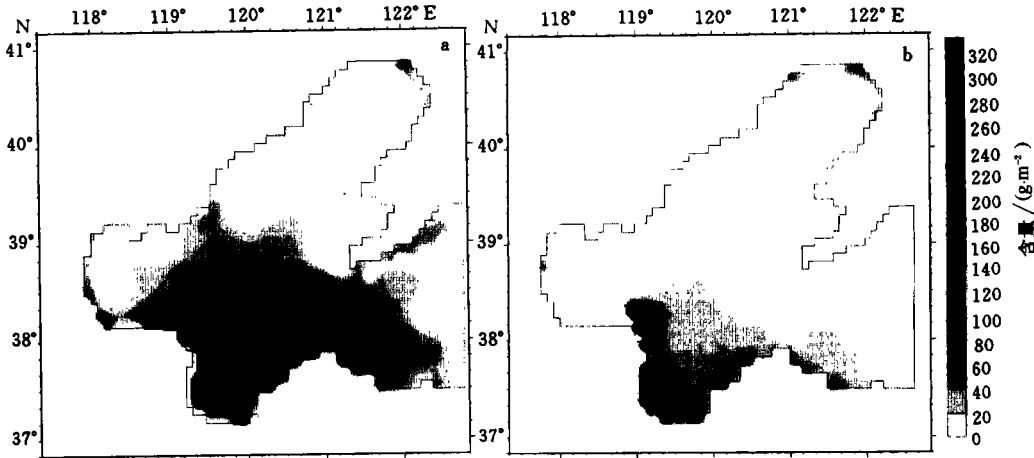


图 3 海底底质中细颗粒物含量变化分布

Fig. 3 Distribution of sediment fine fractions

a. 03-23-0:00—8:00 的海底侵蚀量; b. 03-25-8:00—03-26-8:00 的海底淤积量

从图2、图3中可以看出,海水中的悬浮物浓度对风的响应很快,风力一加大,海底的侵蚀马上加强,海水中悬浮物浓度就会提高,这时海水中的悬浮物浓度将会达到平常的几十倍。而当风速减小时,悬浮物的浓度的变化却有一个延迟效应,即这个浓度并不马上减小,而是慢慢地变小,这是因为由于风浪的搅拌,细颗粒物质基本上较均匀地分布在水中,当风浪减小时,它们需要一段时间才会沉积下来,所以风力减弱,并不会马上使海底有许多沉积。另外,海流的输送作用在图3中也可以看出来,那就是海底侵蚀最大值发生处与悬浮物浓度局部最大值位置有时并不一致。这就说明,从该处侵蚀起来的细颗粒物质被流输运到其它地方去了,这一点充分体现了风浪掀沙海流输沙的悬浮物输运机制。

2.3 悬浮物浓度的垂直分布与风的关系

由于悬浮颗粒物具有一个向下的沉降速度,而且海面又没有沙源,因此在一般情况下

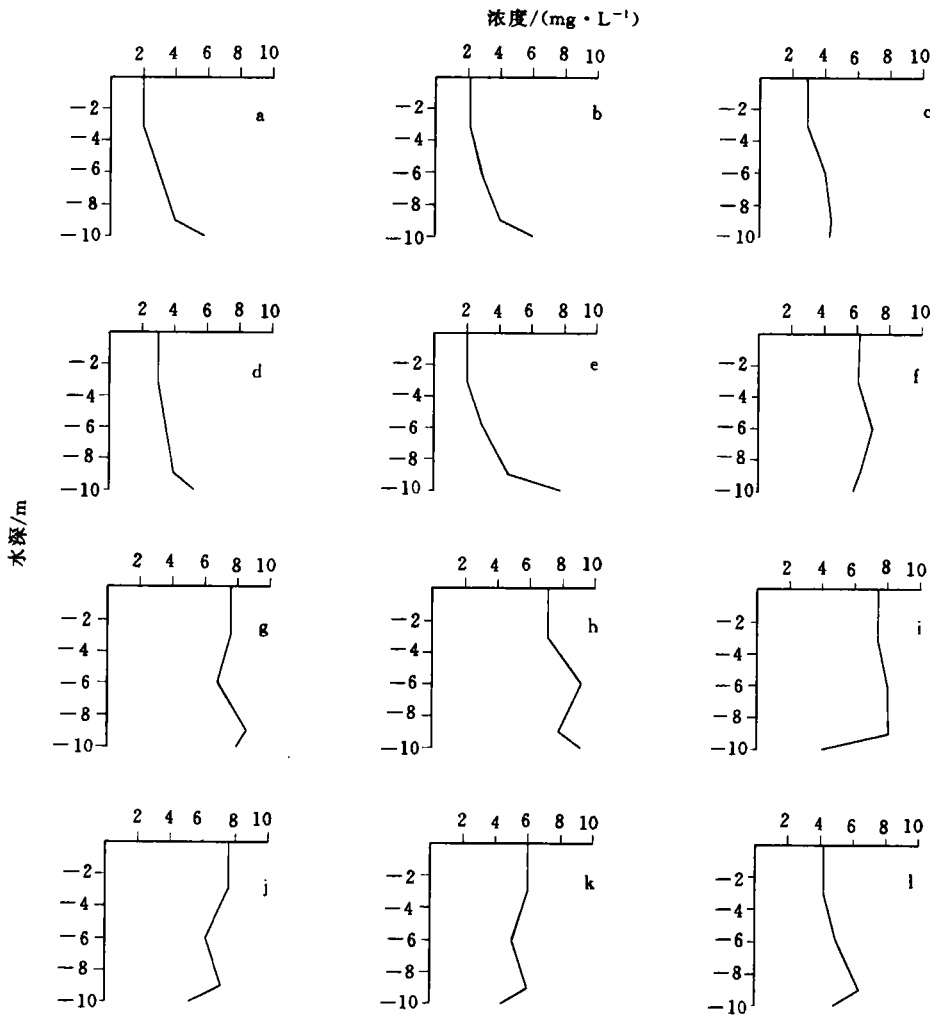


图4 莱州湾某点处悬浮物浓度垂直分布时间序列

Fig. 4 Time series of vertical SPM concentration distribution profiles in the Laizhou Bay.

a—1. 1982-08-01-06:00—08-02-04:00 每隔两小时的结果

悬浮颗粒物浓度在海底底部高而表面低。但是在某些情况下,如遇到大风天气,悬浮物的这种垂直分布将会发生变化。1982年8月1—2日在莱州湾有大风天气,选取莱州湾中一点来看悬浮物浓度的垂直分布与风的关系,图4是该点处的悬浮物浓度垂直分布曲线时间序列。

图4仅显示了整个过程的几个片段,在8月1日6点、8点,悬浮物浓度垂直分布基本正常,呈上低下高趋势,到了10点、12点,则由于悬浮物在海底的沉积,悬浮物浓度在底部减小,而在上部却增加,这是从其它地方来的悬浮物运动到了该水体的上层,所以整体上浓度有所增加。到了14点,这时风力加大了,海底有细颗粒物被卷挟到海水中,所以这时底层悬浮物浓度大幅度增加。随着风的搅拌作用增强,到了16点,整个水体中的悬浮物浓度近于均匀,18点整体浓度继续增加。20点以后风力开始减弱,于是底层的悬浮物沉积下来,表层悬浮物开始向下沉,这样在中层产生了一个浓度值较大的区域,然后表层浓度继续减小,底层浓度相对加大,渐渐地又回到以往正常的状态。从这里再一次看到悬浮物浓度在风力加大时增长很快,而风力衰减时则缓慢变小。

3 结语

用数值方法研究悬浮物的输运目前在我国并不多,本文利用一个三维的悬浮物输运模式对渤海中的悬浮物输运作了初步研究。在潮流、风海流及风浪的驱动下黄河排出的细颗粒物进行了追踪,并对其中的一些现象作了分析,结果得出风场的差异对悬浮物的分布将产生很大影响。本文模拟海水中的悬浮物、底质中的细颗粒物含量在大风情形下的变化情况,特别是悬浮物浓度的垂直分布变化说明了模式充分体现了风浪掀沙、潮流输沙的特点。这对研究港口航道淤积等问题提供了一个可行的方法。

参 考 文 献

- 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室,1985. 渤海地质. 北京:科学出版社,232
- 江文胜,孙文心,2000. 渤海悬浮颗粒物三维输运模式的研究 I. 海洋与湖沼,31(6):682—688
- 渤海·黄海·东海,海洋图集,地质分册,1992. 北京:海洋出版社,81
- Eisma D, 1993. Suspended matter in the aquatic environment. Berlin: Springer-Verlag, 315
- Pang J Z, SH Si, 1980. Fluvial Processes of Huanghe River estuary, II. Hydrographical character and the Region of sediment silting. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 11(4):295—305
- Saito Y, Yang Z S, 1993. Sediment budget in the East China Sea, Proceeding of the 3rd Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics. Japan: The committee of Environmental Geology of the Geological Society of Japan, 123—128
- Yanagi, Inoue K, 1995. A Numerical Experiment on the Sedimentation Processes in the Yellow Sea and East China Sea. *J Oceanography*, 51:537—552
- Zhang Z Z, 1985. Modern estuary sediment of some large rivers in China. In: Modern sedimentation in the coastal and near-shore zone of China, ME Ren (ed). Beijing: China Ocean Press, 152

3D SUSPENDED PARTICULATE MATTER TRANSPORTATION MODEL IN THE BOHAI SEA

II. SIMULATION RESULTS

JIANG Wen-Sheng, SUN Wen-Xin

(*Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

Abstract In this paper the model described in the former article is used to simulate SPM transport. The space resolution is 1/12 degree both in the latitude and in longitude in the horizontal direction and 10 layers is divided in the vertical direction. The whole system is driven by the meteorological force such as wind stress and air pressure in 1982. The tidal wave propagating from the Bohai Strait and the Huanghe River inflow are the other two driving forces.

Two cases have been studied in this paper. The first one is numerical tracing of sediment particles discharged from the Huanghe River. 100 particles are released from the Huanghe River mouth on January 4, April 1 and July 1 in 3 separate runs. After the release, these 100 particles are traced and the distribution patterns at different months are shown. It is found that almost all the particles stay in the Bohai Sea, but the positions of the SPM are not the same at the end of the simulation if they have different releasing time. The differences are from the unique feature of the wind field for each month.

The other one simulates SPM transport during strong winds. The results show that the SPM concentration in the water column increases rapidly when the wind gets strong. The erosion begins at the same time and the fine fraction of the sediments becomes less than before. When the wind calms down the SPM in the water begin to settle on the seabed, but the concentration decrease slowly. Because the SPM is stirred up by the wind and distributed evenly, it needs some time to settle down.

The vertical profile of the SPM concentration also changes significantly during the strong wind. Normally the SPM concentration is higher near the bottom than at the surface. In the strong wind the SPM concentration at the bottom will increase quickly and the high concentration area goes up to the surface until the SPM concentration is nearly uniform. Then the SPM settle down slowly after the wind ceases. This reflects that the wind is essential to SPM transport in the sea.

Key words Suspended particulate mater, Transport, Current, Wind wave, Numerical modeling