

黄河入海泥沙输运及沉积过程的数值模拟

李国胜¹, 王海龙^{1,2}, 董超^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 以利津站代表的黄河入海径流和泥沙数据驱动 ECOMSED 模型, 对黄河入海泥沙悬移输运过程的逐月时空变化、输送通量以及海底沉积效应进行了数值模拟实验。分析结果表明, 在忽略再悬浮作用条件下, 黄河入海泥沙的输运扩散过程具有明显的季节变化规律, 且这种变化具有年际相似性。黄河泥沙入渤海后总体朝向辽东湾西侧海岸扩散, 而主要沉降区域是黄河口附近, 且随着距离的增大, 沉积通量迅速降低。模拟沉积速率一般在 0.5~0.1 mm/ 年左右, 与实际调查结果非常接近。海底地形等高线向渤海海盆西部、渤海湾南部, 以及渤海海峡方向突出, 也反映了泥沙通量的输送方向。从黄河入海泥沙悬移扩散过程的季节变化特征及其海底沉积效应来看, 渤海海域泥沙悬移输运过程受潮汐动力、余流和底层流场等因子的制约。除了黄河河口地区以外, 各月悬浮泥沙高浓度区基本一致, 集中分布在潮流能量最强的海域, 潮流水平动能的大小与悬沙浓度大小分布基本一致。泥沙悬移输运方向与模拟获得的渤海三维风驱—潮致 Lagrange 余流的方向具有明显的相关关系, 泥沙扩散的方向和强度明显受余流方向和强度的控制。

关键词: 黄河; 入海泥沙; 悬移输运; 沉积效应; 数值模拟

1 引言

黄河为季节性多泥沙河流, 以利津站 (1855~1988 年) 为代表的年平均入海输沙量高达 13.4 亿 t 以上^[1, 2]。据统计, 黄河 1976 年至今走清水沟流路入渤海以来, 利津站 (1976~1997 年) 年平均来沙量达 6.33 亿 t, 其中约占 1/3 堆积在三角洲陆上部分外^[3], 约有 2/3 输送到了滨海区和渤海海盆。据中科院海洋所 1985 年调查估算, 进入滨海区和渤海海盆的泥沙约近 70% 沉积在近河口 10~15 km 范围的水下三角洲内, 只有大约相当于黄河入海通量 1% 的悬沙经渤海海峡南侧输入到黄海^[4], 成为渤海海峡和黄海等处泥质沉积区的物源之一^[5-7], 其余绝大部分细颗粒悬浮物在环流作用和混合扩散作用的影响下^[8], 在渤海海域形成长周期和大尺度的悬移输运, 对渤海海底及海岸地貌的发育演化及其相关的侵蚀 / 沉积效应产生着重要影响。

河流入海泥沙的长周期悬移输运过程涉及十分复杂的时空过程和机制, 河流径流, 潮汐、环流、温盐结构等海洋动力条件, 以及风应力的影响等诸多因素对悬移泥沙的长期输运过程都起着非常重要的作用。然而, 由于过去绝大多数研究工作都是基于实际海洋调查资料的分析, 受实测资料在时间和空间覆盖范围的限制, 因而很难从整体上把握黄河入海泥沙悬移输运的时空变化规律及其侵蚀与沉积效应。20 世纪 70 年代末期, Emery 等人对渤海海水中悬浮颗粒物就做过简单研究报道, 秦蕴珊等对渤海海水中悬浮

收稿日期: 2005-04-19; 修订日期: 2005-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40271020); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-207-05); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (CXIOG-A04-09) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 40271020; Knowledge Innovation Project of CAS, No.KZCX2-207-05; No.CXIOG-A04-09]

作者简介: 李国胜 (1963-), 男, 江苏常州人, 研究员。主要从事海陆相互作用过程遥感与 GIS 模拟研究。

E-mail: ligs@igsnrr.ac.cn

体的来源、分布等问题的讨论是迄今为止较为详细的研究成果^[9]。渤海地质调查资料分析表明,黄河入海泥沙在进入渤海海域后,细颗粒物主要向西(渤海湾南部)、向北(至秦皇岛近海)和向南转东(莱州湾和渤海海峡方向)输送,粗颗粒物主要分布在这个狭长地带的两侧,与沉积物有关的多种地球化学元素如 Al、Fe、C、CaCO₃ 也具有类似的条带状分布特征^[4]。颗粒悬浮物浓度的水平分布在不同季节由于河流径流量的变化和风的影响,各海区有着显著变化^[10, 11]。渤海海底现代沉积速率除黄河三角洲较高外^[12],渤海湾和辽东湾^[13, 14],以及渤海中央海盆^[12],一般均在 1~0.1 mm/年左右。研究发现,黄河泥沙入海后在渤海海底的沉积分布与渤海余流是相协调的^[19],而且特征矿物的输运路线也与渤海余流结构基本一致^[20]。80年代以来受潮致 Lagrange 余流理论的影响^[15-18]。从这些事实推论,黄河入海泥沙的长周期及大空间尺度的输送过程似主要应由余流方向所决定,即主要依赖于 Lagrange 余流的驱动。一些学者在研究渤海水动力条件的基础上,尝试分析了黄河入海泥沙悬移输运的分布特征及其海洋水动力和海面风应力等在悬沙输运机制方面的作用^[21-27]。虽然目前全面研究黄河入海泥沙在渤海海域季节一年尺度悬移输运过程的数值模拟研究工作并不多见,但从理论上讲,对黄河入海泥沙的长期输运过程起主要作用的并不是瞬时的振荡流场,而应是这种流场经过某种平均之后所表现出来的长期作用^[28-29],可以肯定地说,河流径流、海洋水动力以及海面风应力等对浅海悬浮泥沙的长期输运都起着非常重要的作用。但是,黄河入海泥沙在渤海海域的季节一年尺度悬移输运具有什么样的时空规律,入海泥沙在不同季节和不同方向上的长期输运率和垂向沉积通量有多大,侵蚀与沉积效应如何等等,这些问题虽然有少量研究,但迄今并没有定论回答,尚待做进一步深入研究。

2 数值模拟方法

2.1 模式基本方程

本研究采用了可专门模拟不同水体流体动力以及物质输运过程的 ECOMSED 模式作为黄河入海泥沙悬移过程的数值模拟物理原型,它包括水动力模块 ECOM 以及物质输运模块 SED 两个部分。ECOM 模型从原始奈维-斯托克斯方程出发,以自由水位、三方向速度分量、温度、盐度、密度和代表湍流的两个特征量为预报变量,对海洋非线性动力过程进行刻画。有关 ECOM 模式方程可详见参考文献^[30-32],这里不再一一赘述。本项研究中,有关渤海动力场条件由 ECOM 模式模拟产生^[33]。SED 模型是基于沉积动力学的物质输运数值模拟系统,它包含了粘性和非粘性沉积物的输运、沉积及再悬浮过程,因而可以计算出分层深度内的悬浮泥沙浓度,使得模型模拟的结果更为精确。其中,对非粘性泥沙的输运、沉积及再悬浮过程采用的是 Van Rijn 模式^[34],而对于粘性泥沙的再悬浮、沉降、堆积等过程则是采用 Gailani 等人的研究成果^[35-38]。三维输运控制方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} + \frac{\partial (W - W_s)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中: C 为泥沙颗粒浓度, U、V、W 分别是 x、y、z 方向上的水体流速, A_H、K_H 分别是水平和垂向涡扩散率, W_s 为泥沙颗粒(絮团)沉降速度。

上述三维输运控制方程的边界条件为:在海表不考虑大气沉降的颗粒物,海底把泥沙沉降和再悬浮分别视为水体泥沙扩散的汇和源,即:

$$K_H \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (z = \eta)$$

式中: C 为泥沙浓度, E 、 D 分别为再悬浮和沉积通量。 η 为自由海表面, H 为水深。

海底剪切应力定义为:

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (3)$$

式中: ρ 为介质密度, u_* 为摩阻流速, 根据 Prandtl-von Karman 的定义, 有:

$$u_* = \frac{ku}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (4)$$

式中: k 为 Karman 系数 (0.4); u 为底层流速, z 为底层中心点深度, z_0 为粗糙突起高度。

粘性底床上泥沙的再悬浮通量的计算, 采用 Gailani 等 (1991) 公式^[39], 即:

$$\varepsilon = \frac{a_0}{T_d^m} \left(\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right)^n \quad (5)$$

式中: ε 为再悬浮潜力; a_0 为常数, 与床底底质有关; T_d 沉积时间; τ_b 床底剪切力; τ_c 为侵蚀临界剪切力; m , n 为沉积环境参数。

再悬浮速率 (E_{ict}) 定义为 (所有可以悬浮泥沙悬起的时间段内, 一般为 1 分钟):

$$E_{\text{ict}} = \frac{\varepsilon}{3600 \text{seconds}} \quad (6)$$

$$E = f_k E_{\text{ict}} \quad (7)$$

式中: E 为输运方程中的悬浮通量, f_k 为床底中粘性泥沙的百分含量。

粘性泥沙沉积通量的计算, 是根据近底沉积物通量和粘性底床的絮状物概率大小来确定的, 其计算方法采用 Krone (1962) 公式^[40]:

$$D = -W_s CP \quad (8)$$

式中: D 为沉积通量, W_s 为粘性泥沙凝絮沉降速率, C 为粘性泥沙浓度, P 为沉降概率, W_s 为粘性沉积物絮凝沉降速率。经过大量的试验测定, 结果表明粘性絮状沉积物的沉降速率依赖于絮状物形成位置的浓度和水体剪切应力的乘积, 即:

$$W_s = \alpha (CG)^\beta$$

式中: α 、 β 为参数, G 为水柱内剪切力, 可用以下公式计算:

$$G = \rho K_M \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中: K_M 为垂直涡流粘质, ρ 为悬浮介质密度。

沉降概率采用 Partheniades 的研究成果^[41], 即当 $0 < Y < +\infty$ 时:

$$P = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Y^2}{2}} (0.4362z - 0.1202z^2 + 0.9373z^3) \quad (10)$$

式中, $z = (1 + 0.3327Y)^{-1}$

当 $Y < 0$ 时, $P(-Y) = 1 - P(Y)$ 。

2.2 初始、边界条件

计算网格南起莱州湾南岸, 北至辽东湾顶, 西起渤海西岸, 东至渤海海峡 (37°07'N~41°N, 117°35'E~123°14'E)。海底地形采用海军航保部 1983 年的实测水深数据, 经重采样分辨率 (网格大小) 修正为 0.05°, 垂向分成 5 个层。试验计算初始时间为 1983 年 1 月 1 日, 结束时间为 1984 年 12 月 31 日, 步长 621 秒。初始流场设为静止, 因为本研究是诊断计算, 所以温盐场设为定值。数值实验中把黄河入海径流与初始泥沙浓

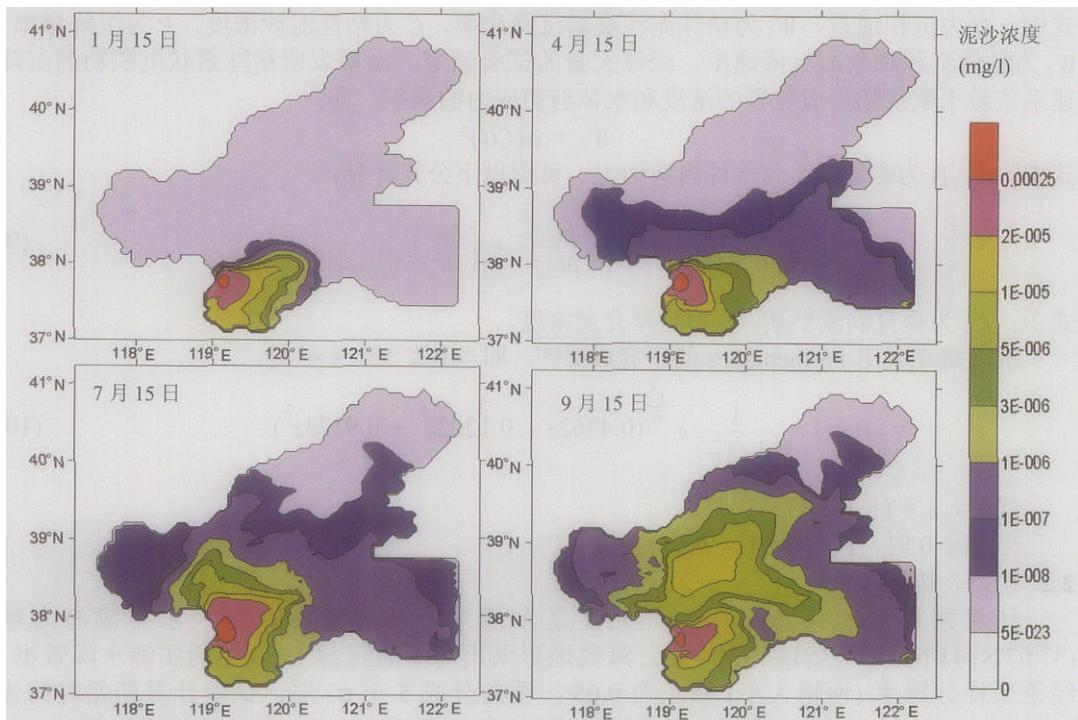
度作为边界条件处理,在黄河利津站 1983 年和 1984 年实测水沙数据的基础上作了一定的修正,即河口径流保持利津站径流量不变,但河口入海泥沙量取为利津站的 70%,开边界处设为无泥沙交换。泥沙容重取值 2.65 g/cm^3 。泥沙计算周期为 10 个时间步长。

对于渤海海峡开边界,本模式中并没有按照自然边界来设定,而是采用了 122.25°E 经线与理想化水平海岸线之间部分作为开边界来处理,这样避免了因为开边界上不精确的水位、速度和温度条件而产生不好的效果。开边界潮高和幅角由 S_2 、 M_2 、 N_2 、 K_1 、 P_1 、 O_1 等几个分潮参数计算得出,由南北两岸验潮站资料进行最优插值获取,在计算中需要进行相应的调整。开边界上温盐和流速采用无辐射边界条件,在侧边界和海底,温盐的法向梯度为零,因此在边界上没有热盐通量的平流和扩散。另外,取 Hellerman and Rosenstein 的全球风应力资料中多年月平均风场资料作为气象条件输入,插值到计算网格点上,忽略海气界面的热强迫。

3 黄河入海泥沙季节—年尺度悬移输运过程的时空特征

为弄清楚黄河泥沙进入渤海海域后的长周期悬浮输运过程情况,研究中根据上述数值模拟模式和边界条件,在忽略泥沙再悬浮作用条件下,对渤海海域 1983~1984 年入海泥沙的逐月扩散过程和各海域的泥沙浓度变化状况进行了数值模拟分析。

在忽略海底再悬浮作用条件下,模拟获得的渤海海域 1983-1984 年 1 月、4 月、7 月、10 月的悬浮泥沙的输运过程与分布变化(图 1 和图 2),分别代表了 4 个季节海洋中层 ($z = 3$) 的泥沙浓度分布,设定初始泥沙投放时间为 1983 年 1 月 1 日,结束时间为 1984 年 12 月 31 日。从中可以发现,在忽略再悬浮作用情况下,黄河入海泥沙的输运扩散过程具有明显的季节变化趋势,且这种变化具有年相似性:从 1983 年 1 月 1 日泥沙投放到 1 月 15 日,入海泥沙主要集中在黄河口及莱州湾地区,并且具有向渤海海峡输运的趋势;



© 1994-2009 China Academic Electronic Journal Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 1 黄河入海泥沙扩散过程及沉积通量模拟结果(1983 年)(单位: mg/l)

Fig. 1 Diffusion of suspended sediment in offshore area of the Bohai Sea and the simulation of deposition in 1983 (mg/L)

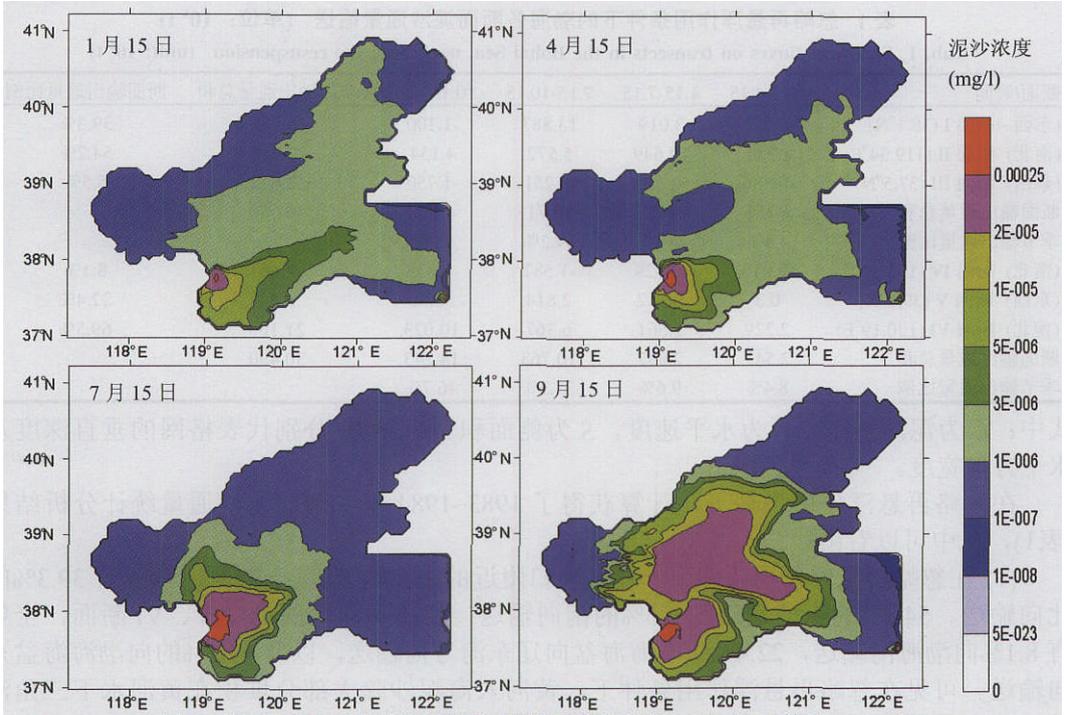


图2 黄河入海泥沙扩散过程及沉积通量模拟结果(1984年)(单位: mg/l)

Fig. 2 Diffusion of suspended sediment in offshore area of the Bohai Sea and the simulation of deposition in 1984 (mg/L)

1月15日~4月15日,黄河入海泥沙除了继续向莱州湾方向扩散外,有少量泥沙流出了渤海海峡进入黄海北部,同时也有一部分泥沙向渤海湾南岸扩散;4月15日到7月15日,泥沙通过渤海湾湾口沿渤海西海岸向北扩散,并且部分向辽东湾东岸扩散;7月15日到10月15日,辽东湾地区的泥沙浓度没有明显变化,但是渤海中部海盆地区出现了一个泥沙浓度的高值区,形成黄河口和渤海海盆两个扩散中心,并继而在10月15日到来年的1月15日形成一个贯穿南北的条形泥沙浓度带。综合分析两年的计算结果可以看出,只考虑沉积作用下的渤海泥沙扩散在不同年份具有明显的季节变化趋势:冬季渤海北部、辽东湾、渤海湾和渤海海盆泥沙扩散减弱,黄河口泥沙明显向莱州湾西岸扩散;春季莱州湾泥沙扩散面积继续扩大,并且部分扩散到渤海湾南岸和渤海海峡南部;夏季泥沙通过渤海湾湾口沿渤海西海岸向北扩散,并且部分向辽东湾东岸扩散;秋季在渤海海盆中扩散率比较大,形成了黄河口和渤海海盆两个扩散中心。到来年1月,渤海湾与辽东湾浓度整体升高,而渤海海盆与莱州湾的泥沙浓度明显降低,而且向辽东湾扩散的泥沙重心从东部移向西部,来年的4、7、10月浓度变化与上年十分类似,说明在经历1年的泥沙扩散以后,渤海湾内泥沙已经达到了一种稳定状态。另外发现,黄河泥沙在24个月内总体朝向辽东湾西侧海岸扩散,随着距离增大,沉积通量呈指数减少。

4 黄河入海泥沙的悬移输沙率与输送通量

为研究黄河泥沙进入渤海后在不同方向的运输扩散强度及季节变化,本研究选取6个断面进行长周期悬沙输送通量的定量分析,计算各断面在1983年1月15日至1984年1月15日一年中的水平输沙净通量。泥沙输送通量定义为单位时间内通过某个截面的泥沙量(kg/s)的矢量值,矢量方向定义北向和东向通量为正,南向和西向通量为负。即:

$$\phi = CVS = CVH \cdot H_1 \quad (11)$$

表 1 忽略再悬浮作用条件下的渤海各断面泥沙通量输送 (单位: 10^6 t)Tab. 1 Sediment fluxes on transects in the Bohai Sea, neglecting the resuspension (unit: 10^6 t)

断面/时间	1.15-4.15	4.15-7.15	7.15-10.15	10.15-1.15	全年输出通量总和	断面输出通量比例
(东西)断面 I (38.1°N)	-0.076	3.019	13.887	-1.100	15.730	39.3%
(南北)断面 II (119.34°E)	1.341	10.649	5.572	4.154	21.716	54.2%
(东西)断面 III (37.5°N)	-0.486	-0.125	-0.251	-1.750	2.612	6.5%
断面输出通量总和	1.751	13.793	19.71	4.804	40.058	
季节输出通量比例	4.4%	34.4%	49.2%	12%		
(南北)断面 IV (118.79°E)	-0.018	-0.029	-1.582	-0.838	2.467	8.1%
(东西)断面 V (39.1°N)	0.3	0.347	2.814	3.382	6.843	22.4%
(南北)断面 VI (120.19°E)	2.229	2.561	6.367	10.023	21.180	69.5%
断面输出通量总和	2.547	2.937	10.763	14.243	30.490	
季节输出通量比例	8.4%	9.6%	35.3%	46.7%		

式中: C 为泥沙浓度, V 为水平速度, S 为侧面积。 H 和 H_1 分别代表格网的垂直深度及水平方向宽度。

在忽略再悬浮作用条件下, 计算获得了 1983~1984 年各断面泥沙通量统计分析结果(表1), 从中可以看出:

(1) 在忽略再悬浮作用条件下, 在黄河口附近的 I、II、III 三个断面, 全年有 39.3% 的北向输送、54.2% 的东向输送和 6.5% 的南向输送; 远离黄河口的 IV、V、VI 断面, 全年有 8.1% 向渤海湾输送, 22.4% 从渤海海盆向辽东湾方向输送, 以及 69.5% 的向渤海海盆东向输送。可见在忽略再悬浮作用条件下, 黄河入海泥沙除大部分堆积在黄河水下三角洲外, 其余悬移运输部分存在着东向和北向的最大通量运输。其中, II、VI 断面总存在一个东向通量, 向东泥沙通量全年分别达到 2171.6 万 t 和 2118 万 t; 断面 I 的各季度净输移为南向, 基本上代表了一个恒定的向莱州湾西岸的输运过程, 南向年泥沙通量为 261.2 万 t; 在 I、V 断面, 向北泥沙通量全年分别达到 1573 万 t 和 684.3 万 t; 而在 IV 断面, 长年存在着向着渤海湾的西向通量, 年输沙通量达到了 246.7 万 t。在整个 I、II、III 断面以及 IV、V、VI 断面相连封闭的海域, 向该海域之外输送的悬浮泥沙通量, 全年分别达到 4005.8 万 t 和 3049 万 t。

(2) 在季节差异方面, 忽略再悬浮作用条件下, I、II、III 三个断面各季度的通量比例为 4.4% : 34.4% : 49.2% : 12%, 基本上呈现 1~3 季度逐渐上升、第 4 季度迅速下降的趋势; IV、V、VI 断面, 各季度通量比例为 8.4% : 9.6% : 35.3% : 46.7%, 基本呈现为 1~4 季度逐渐上升的趋势。I 断面泥沙通量结构的季节变化规律在两种情况下相同: 4 月~10 月发生北向的输运, 其中在 7 月~10 月泥沙输运达到最大值 1388.7 万 t, 10 月~翌年 4 月转而南向输运; II 断面在 4 月~7 月泥沙输运达到正值最大值, 为 1064.9 万 t。通过季节分量在全年中所占比例的分析可以发现, 在 I、II、III 断面上, 泥沙外向输运主要发生在 4 月~10 月之间, 占了全年的 83.6%。而在 IV、V、VI 断面上, 7 月~翌年 1 月的泥沙输运占了全年的 82%。这种季节性的差异主要受黄河径流、渤海环流季节变化差异的影响, 而且与断面位置也有一定的关系。

5 黄河入海泥沙悬移运输过程的沉积效应

为进一步研究黄河入海泥沙季节-年尺度悬移运输过程的侵蚀/沉积效应, 本文对忽略再悬浮作用条件下的黄河入海泥沙长期输运及沉积过程所造成的渤海海底地形变化进行了模拟。具体方法是利用 SED 模式方程中的沉积通量 D 和再悬浮通量 E 计算出单位时段 Δt 内每一个格网在单位面积上的垂向泥沙净通量 q ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$), 然后再除以泥沙的容重 ρ_s , 得出海底地形的变化量 $\Delta \zeta$ 。即 $q = D - E$, $\Delta \zeta = q \Delta t / \rho_s$ 。

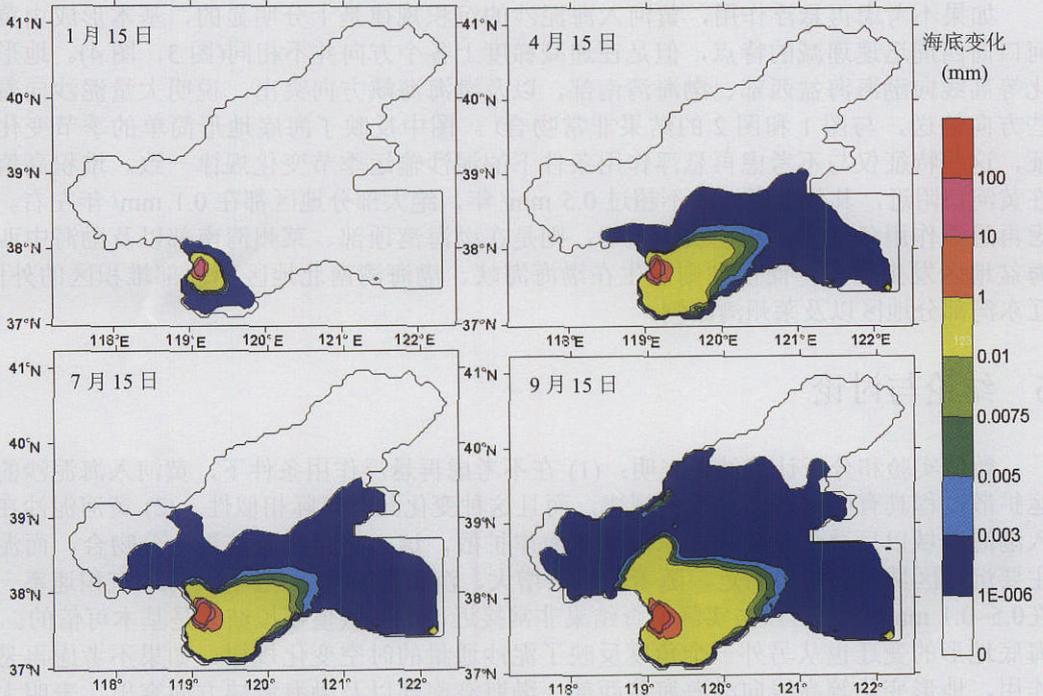


图3 忽略再悬浮作用条件下的海底地形模拟结果 (1983年) (单位: mm)

Fig. 3 Simulation of submarine topography in 1983 (neglecting the resuspension) (unit: mm)

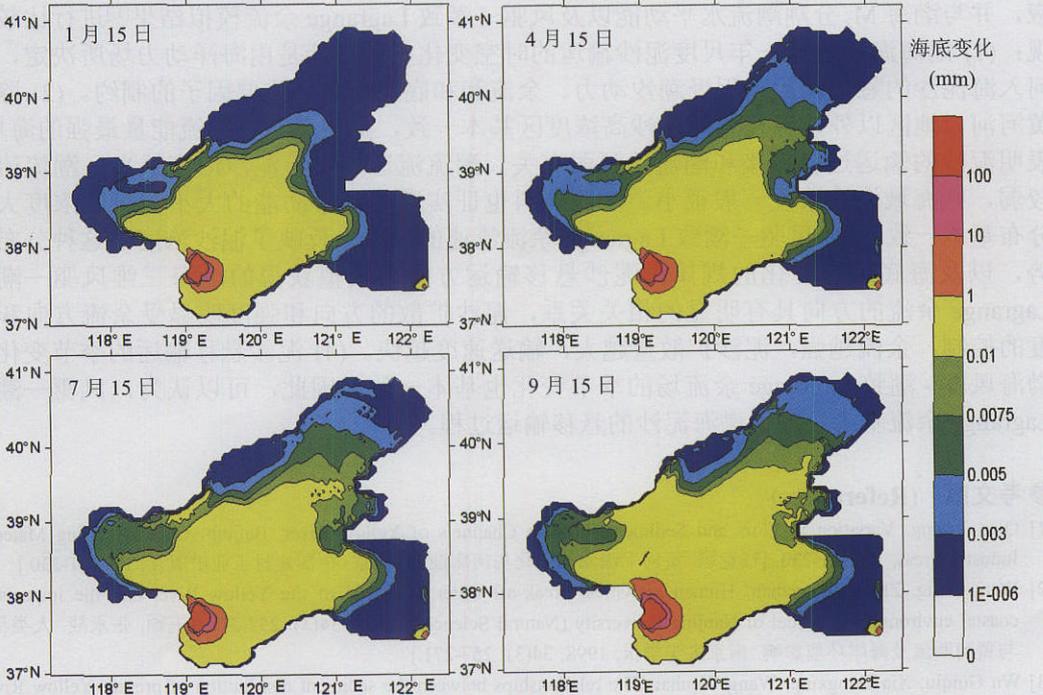


图4 忽略再悬浮作用条件下的海底地形模拟结果 (1984年) (单位: mm)

Fig. 4 Simulation of submarine topography in 1984 (neglecting the resuspension) (unit: mm)

如果不考虑再悬浮作用,黄河入海泥沙的沉积规律是十分明显的,基本形成由黄河河口向四周迅速递减的特点,但是在递减梯度上各个方向并不相同(图 3,图 4)。地形变化等高线向渤海海盆西部、渤海湾南部,以及渤海海峡方向突出,说明大量泥沙向着这些方向输送,与图 1 和图 2 的结果非常吻合)。图中反映了海底地形简单的季节变化特征,这些特征仅与不考虑再悬浮作用条件下的泥沙输运季节变化规律一致。堆积高值区在黄河口附近,其他地区一般不超过 0.5 mm/年,绝大部分地区都在 0.1 mm/年左右。考虑再悬浮作用条件下,初步实验表明,则是在渤海湾顶部、莱州湾南部以及渤海中西部海盆地区发生堆积,而侵蚀则发生在渤海海峡、渤海湾南北地区和顶部堆积区的外侧、辽东湾部分地区以及莱州湾西侧。

6 结论与讨论

数值实验和分析计算结果表明:(1)在不考虑再悬浮作用条件下,黄河入海泥沙的输运扩散过程具有明显的季节变化规律,而且这种变化具有年际相似性。(2)黄河泥沙在进入渤海海域以后总体是朝向辽东湾西侧海岸扩散,这一点与实测结果十分吻合,而泥沙主要沉降区域是黄河口附近,随着距离的增大,沉积数量呈指数减少。(3)沉积速率一般在 0.5~0.1 mm/年左右,与实际调查结果非常接近,表明数值模拟结果是基本可信的。(4)海底地形的变迁也从另外一个角度反映了泥沙通量的时空变化规律,如果不考虑再悬浮作用,地形变化等高线向渤海海盆西部、渤海湾南部以及渤海海峡方向突出,表明大量泥沙向着这些方向输送。

综合分析黄河入海泥沙悬移扩散过程的季节变化特征及其相应的海底侵蚀/沉积效应,并与渤海 M_2 分潮潮流水平动能以及风驱—潮致 Lagrange 余流模拟结果^[39]进行比较发现:(1)渤海海域季节—年尺度泥沙输运的时空变化主要可能是由海洋动力场所决定,黄河入海泥沙的悬移输运过程受潮汐动力、余流和和底层流场等重要因子的制约。(2)除了黄河河口地区以外,各月悬浮泥沙高浓度区基本一致,集中分布在潮流能量最强的海域,表明泥沙的输运过程直接和潮流的强弱有关。潮流流速越大,泥沙浓度越高;潮流流速较弱,则海域泥沙浓度一般很小。实测资料也证实潮流水平动能的大小与悬沙浓度大小分布基本一致。(3)风驱—潮致 Lagrange 余流流速的大小也反映了泥沙浓度的这种分布趋势,以及海底地形变化的规律,泥沙悬移输运方向与模拟获得的渤海三维风驱—潮致 Lagrange 余流的方向具有明显的相关关系,泥沙扩散的方向和强度明显受余流方向和强度的控制,余流越强,泥沙扩散量越大,输送速度越快。(4)泥沙悬移输运的季节变化与渤海风驱—潮致 Lagrange 余流场的季节变化也基本一致。因此,可以认为,风驱—潮致 Lagrange 余流基本控制了渤海泥沙的悬移输运过程。

参考文献 (References)

- [1] Qian Yiyang. Variation in Flow and Sediment in Main Channels of Yellow River. Beijing: China Building Materials Industry Press, 1993. 1-230. [钱意颖. 黄河干流水沙变化与河床演变. 北京: 中国建材工业出版社, 1993. 1-230.]
- [2] Wang Ying, Zhang Yongzhan. Human activities, break-off water discharge of the Yellow River and the impacts on coastal environment. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1998, 34(3): 257-271. [王颖, 张永战. 人类活动与黄河断流及海岸环境影响. 南京大学学报, 1998, 34(3): 257-271.]
- [3] Wu Guiqiu, Xia Dongxing, Wang Wenhai. The relationships between the sediment distribution of present Yellow River's entrance to the sea and the ocean dynamic factors. Coastal Engineering, 1994, 13(1): 24-30. [武桂秋, 夏东兴, 王文海. 现行黄河入海泥沙分布与海洋动力要素的关系. 海岸工程, 1994, 13(1): 24-30.]
- [4] Martin J M, Zhang J, Shi M C et al. Actual flux of the Huanghe (Yellow River) sediment to the western Pacific Ocean. Netherlands Journal of Sea Research, 1993, 31: 243-254.
- [5] Milliman J D. Suspended matter regime in the Yellow Sea. Progress in Oceanography, 1986, 17: 215-228.

- [6] Park Y A, Khim B M. Clay minerals of the recent fine-grained sediment on the Korean continental shelves. *Continental Shelf Research*, 1990, 10: 1179-1191.
- [7] Qin Yunshan, Li Fan. The influence of Yellow River sediment into the sea on sedimentation in Bohai and Huanghai seas. *Study Marina Sinica*, 1986, 27: 124-134. [秦蕴珊, 李凡. 黄河入海泥沙对渤海和黄海沉积作用的影响. *海洋科学集刊*, 1986, 27: 124-134.]
- [8] Nittrouer C A, Wright L D. Transport of particles across continental shelves. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 85-113.
- [9] Qin Yunshan, Li Fan. Study on suspended matters in Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 4(2): 191-200. [秦蕴珊, 李凡. 渤海海水中悬浮体的研究. *海洋学报*, 1982, 4(2): 191-200.]
- [10] Jiang Wensheng. The relationship between SPM concentration and hydrodynamic condition in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(suppl.): 212-217. [江文胜. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系. *海洋学报*, 2002, 24(增刊): 212-217.]
- [11] Hu Chunhong. Characteristics of ocean dynamics and sediment diffusion in the Yellow River estuary. *Journal of Sediment Research*, 1994, (4): 1-10. [胡春宏. 黄河河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散. *泥沙研究*, 1994, (4): 1-10.]
- [12] Alexander C R, Demaster D J, Nittrouer C A. Sediment accumulation in a modern continental shelf setting: the Yellow Sea. *Marine Geology*, 1991, 98: 51-72.
- [13] Li Fengye, Shi Yulan. Accumulation rates of sediment and sedimentary environment in the south Bohai Sea. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1995, 13(2): 33-37. [李凤业, 史玉兰. 渤海南部现代沉积物堆积速率和沉积环境. *黄渤海海洋*, 1995, 13(2): 33-37.]
- [14] Li Fengye, Gao Shu, Jia Jianjun et al. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bohai and Yellow seas. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4): 364-369. [李凤业, 高抒, 贾建军等. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率. *海洋与湖沼*, 2002, 33(4): 364-369.]
- [15] Feng Shizuo. A three-dimensional weakly nonlinear dynamics on tide-induced Lagrangian residual current and mass transport. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1986, 4(2): 129-158.
- [16] Feng Shizuo, Cheng Ralph T, Xi Pangen. On tide-induced Lagrangian residual current and residual transport. *Water Resources Research*, 1986, 22(12): 1623-1646.
- [17] Feng Shizuo. A three dimensional weakly nonlinear model of tide-induced Lagrangian residual current and mass transport, with an application to the Bohai Sea. In: Nihoul J C J, Jamart B M (eds.), *Three Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics*. Amsterdam - Oxford - New York: Elsevier Oceanography Publishers, 1987. 471-488.
- [18] Wang Kai, Feng Shizuo, Shi Xinhui. A 3-D baroclinic model of summer circulation in the Bohai, Yellow and East China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(5): 551-560. [王凯, 冯士祚, 施心慧. 渤、黄、东海夏季环流的三维斜压模型. *海洋与湖沼*, 2001, 32(5): 551-560.]
- [19] Qin Yunshan. *Geology of the Bohai Sea*. Beijing: Science Press, 1985. 232. [秦蕴珊. *渤海地质*. 北京: 科学出版社, 1985. 232.]
- [20] Zhao Baoren. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 466-473. [赵保仁. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 466-473.]
- [21] Yanagi T, Inoue K. A numerical experiment on the sedimentation processes in the Yellow Sea and the East China Sea. *Journal of Oceanography*, 1995, 51(5): 537-552.
- [22] Jiang W, Mayer B. A study on the transportation of suspended particulate matter from Yellow River by using a 3D particle model. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1997, 27(4): 439-445.
- [23] Jiang W, Pohlmann T, Sundermann J et al. A modelling study of SPM transport in the Bohai Sea. *Journal of Marine Systems*, 2000, 24(3/4): 175-200.
- [24] Jiang Wensheng. 3D suspended particulate matter transportation model in the Bohai Sea: I. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 682-688. [江文胜. 渤海悬浮颗粒物三维运输模式的研究—I. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 682-688.]
- [25] Jiang Wensheng. 3D suspended particulate matter transportation model in the Bohai Sea: II. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(1): 94-100. [江文胜. 渤海悬浮颗粒物三维运输模式的研究—II. *海洋与湖沼*, 2001, 32(1): 94-100.]
- [26] Wang Guizhi, Gao Shu. Characteristics of Yellow-Bohai Sea water exchange and suspended sediment: their effects on sedimentation in the Bohai Strait. *Marine Science Bulletin*, 2002, 21(1): 43-48. [王桂芝, 高抒. 黄渤海水体交换、悬沙特征及其对渤海海峡沉积的影响. *海洋通报*, 2002, 21(1): 43-48.]
- [27] Wu Yongsheng, Wang Zhaoyin. Effect of Bohai Sea dynamics on sediment transport discharged from the Yellow River. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2002, 20(2): 22-30. [吴永胜, 王兆印. 渤海动力对黄河入海泥沙输移的影响. *黄渤海海洋*, 2002, 20(2): 22-30.]
- [28] Jiang Wensheng. An observation of current in Bohai Gulf and its analysis. *Journal of Ocean University of Qingdao*,

- 1997, 27(1): 23-32. [江文胜. 渤海湾环流的一次观测和分析. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(1): 23-32.]
- [29] Jiang Wensheng, Wu Dexing, Gao Huiwang. The observation and simulation of bottom circulation in the Bohai Sea in summer. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(4): 511-518. [江文胜, 吴德星, 高会旺. 渤海夏季底层环流的观测与模拟. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(4): 511-518.]
- [30] Blumberg A F. A estuarine and coastal ocean version of POM. In: *Proceedings of the Princeton Ocean Model Users Meeting (POM 96)*, Princeton, NJ, 1996.
- [31] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N Heaps (ed.), *Three-dimensional Coastal Ocean Model*. American Geophys. Union, 1987. 1-16
- [32] Blumberg A F. A coastal ocean numerical model, In: *Mathematical Modeling of Estuarine Physics*. In: J Sundenmann, K P Holz (eds.), *Proceedings of an International Symposium, August 24-26, 1978*. Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- [33] Li Guosheng, Wang Hailong, Li Bailiang. A model study on seasonal spatial-temporal variability of the Lagrange residual circumfluence in the Bohai Sea. *Geographical Research*, 2005, 24(3): 359-370. [李国胜, 王海龙, 李柏良. 渤海风驱-潮致拉格朗日余流的数值模拟与季相时空变异. 地理研究, 2005, 24(3): 359-370.]
- [34] Van Rijn. Sediment transport (part II). *Journal of Hydrodynamic Engineering*, 1984, 110(11): 1613-1638.
- [35] Gailani J. The transport of sediments in the Fox River. *Journal of Great Lakes Research*, 1991, 17: 479-494.
- [36] Tsai C H, Lick W. Resuspension of sediments from Long Island Sound. *Wat. Sci. Tech.*, 1987, 21(6/7): 155-184.
- [37] MacIntyre S. Variability of entrainment of cohesive sediments in freshwater. *Biogeochemistry*, 1990, 9: 187-209.
- [38] Burban P Y. Settling speeds of flocs in fresh and sea waters. *J. of Geophysical Research*, 1990, 95(C10): 18213-18220.
- [39] Gailani. The transport of sediments in the Fox River. *J. Great Lakes Res.*, 1991, 17: 479-494.
- [40] Krone R B. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. *Hyd. Eng. Lab. and Sanit. Eng. Res. Lab.*, 1962, Univ of California, Berkeley, California.
- [41] Partheniades E. Estuarine sediment dynamics and shoaling processes. In: J Herbeck (ed.), *A Hand Book of Coastal and Ocean Engineering*, 1992, 3: 985-1071.

Numerical Simulations on Transportation and Deposition of SPM Introduced from the Yellow River to the Bohai Sea

LI Guosheng¹, WANG Hailong^{1,2}, DONG Chao^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A 3D diagnostic model including a suspended sediment transport module, ECOMSED, driven by the monthly discharge and sediment load of the Yellow River, was applied to the Bohai Sea during 1983-1984. The simulations on temporal-spatial variety of SPM (Suspended Particular Matter) concentration, sediment flux, and deposition rate were carried out. It could be discerned that, the SPM concentration presented distinctly seasonal variety, and the variability characteristic was similar in two years. Some of the fine sediment of the Yellow River extended to the western bank of the Liaodong Bay, but most of the sediment deposited around the estuary of the Yellow River, and the deposition flux progressively decreased with the distance to the estuary increasing. The deposition kept at a rate of 0.05-0.1 mm/a, which is close to the in situ data. There were two areas of high SPM concentration in the Bohai Sea, one of which can be attributed to the Yellow River discharge, and another one located at the seas with intensive resuspension power may be due to the tidal current energy. The sediment poured from the Yellow River was transported mainly along the track of the Lagrange residual circulations. In one word, the suspended load transport was basically attributed to the wind-driven and tidal-forcing Lagrange residual circulations. The resuspension flux was related to the bottom currents: the larger the current speed, the more the sediment resuspended.

Key words: the Yellow River; suspended load; 3-D numerical modeling; temporal-spatial variety; deposition