

# 渤海悬浮颗粒物的三维输运模式\*

## I. 模式

江文胜 孙文心

(青岛海洋大学物理海洋研究所 青岛 266003)

**提要** 为了长时间、大范围研究渤海中悬浮物的输运规律,研究应用并改造了德国汉堡大学的粒子追踪悬浮物输运的三维模式。模式中考虑了风、气压等气象要素及外海传入的潮流作用下的三维正压海流对悬浮颗粒物的输运;同时考虑了悬浮颗粒物的沉降及再悬浮机制和底质中的细颗粒物的运动,将风浪的作用引入了悬浮物输运的计算。数值模式应用的是粒子追踪方法,能较好地反映悬浮物浓度的迅速变化。

**关键词** 悬浮物 输运 海流 风浪 数值模式

**学科分类号** P731

由于生态动力学的发展及沉积动力学本身的需要,悬浮颗粒物(以下简称悬浮物)在海水中的输运问题越来越受到人们的重视。在渤海,早期的工作有 Emery 等(1978)对海水中悬浮物的简略报道,秦蕴珊等(1982)对渤海海水中悬浮体的来源、分布等问题的讨论是迄今为止渤海中较为详细的研究成果。

曾有人从动力学角度出发利用数值方法对渤海的悬浮物等进行过研究(曹祖德等,1993),这些数值研究,对于了解渤海中悬浮物及沉积物的输运及分布有很大帮助,但是在渤海较全面研究悬浮物长期输运过程的数值模式并不多见。Jiang 等(1997)曾对黄河输出的悬浮物的运移做了初步研究,但其中只简单考虑沉积与再悬浮过程。本文研究利用德国汉堡大学的悬浮物输运的三维粒子追踪模式,注意充分考虑悬浮物的沉积与再悬浮效应和底质中细颗粒物的运动,对渤海中的悬浮物输运进行长期模拟,以期对悬浮物的分布趋势及它与水动力特征和气象状况的关系有一定了解。

### 1 模式的结构

悬浮物三维粒子追踪模式(以下简记 SPM 模式)的核心共由三部分组成,即:(1)悬浮物在水中输运部分;(2)海底界面处发生的过程;(3)底质中沉积物的运动。悬浮物的运移及沉降模式的驱动力是流及海浪。海流将推动悬浮颗粒物在海中运动,而海流和海浪等运动产生的湍流效应促进了颗粒物的扩散。当颗粒物沉降到海底时,海底界面处的一些过程将起作用,如果颗粒物沉积下来,那么将受模式的第三部分控制。而在底质中的细颗粒沉积物又可由第二部分判断是否会再悬浮起来,再次进入海水之中。这样的模式对悬浮

\* 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: wsjiang@ouql.edu.cn

收稿日期:1998-03-24;收修稿日期:1999-04-23

颗粒物的输运及分布以及底质中细颗粒物质的分布可以进行较细致的模拟。

## 2 悬浮颗粒物在海水中的输运

### 2.1 控制方程及边界条件

模式中考虑一种保守的悬浮颗粒物(如泥沙)在水中的运动,它有对流、扩散、沉降三个过程。

#### 2.1.1 控制方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

其中,  $C$  为悬浮物浓度;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为海水的流速;  $w_s$  为颗粒物沉降速度;  $A_h$ 、 $A_v$  为颗粒物的湍扩散系数。

#### 2.1.2 边界条件

海洋表面: 尽管大气沉降物是海水中悬浮物的一个重要来源之一, 本文只取海面的净通量为 0 条件, 即:  $q_{surf} = A_v \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{surf} + (w_s - w) C \Big|_{surf} = 0$ , 其中,  $q_{surf}$  为通过海洋表面单位时间内的悬浮物通量。

海底界面: 在海底处, 由于悬浮物的沉积及沉积物的再悬浮, 这里是重要的源汇。 $q_{bot} = A_v \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{bot} + (w_s - w) C \Big|_{bot} = q_{sed} + q_{ero}$ , 其中,  $q_{bot}$  为通过海底界面的单位时间内的悬浮物通量;  $q_{ero}$  和  $q_{sed}$  分别是在海底的侵蚀通量和沉积通量(在单位时间内)。

侧边界: 陆地边界, 采用自然的没有悬浮物通量的条件:  $q_{陆} = 0$ ; 开边界, 采取法向浓度梯度为 0 的条件:  $\partial C / \partial n = 0$ ,  $n$  为开边界外法向; 在河口, 采用第一类边界条件, 即给定该点处悬浮物浓度。

## 2.2 数值方法

模式采用 Lagrange 框架下的粒子追踪方法来数值求解方程(1), 这是一种 PIC( particle in Cell) 方法, 即将每个网格中的悬浮物分成许多粒子, 然后追踪这些粒子, 从而得到悬浮物浓度分布。详细推导见江文胜(1997)<sup>1)</sup>, 这里仅给出结果。

以  $x$  方向为例, 悬浮物粒子在下一时刻的位置有如下表示:

$$x_2 = \frac{[u_w + x_1(\partial u / \partial x)] e^{\frac{\partial u}{\partial x} \Delta t} - u_w}{\partial u / \partial x} + \sqrt{6A_h \Delta t} \quad (2)$$

式中,  $u_w$  是流速  $u$  在网格西侧面的值;  $A_h$  是悬浮物扩散系数; 均匀分布随机数  $\forall \in [-1, 1]$ 。

根据(2)式可以确定所有粒子的新位置, 新一时刻的悬浮物浓度由以下公式计算:

$$C_j = \frac{\sum_{\text{第}i\text{个颗粒在网格中}} M_i}{j \text{ 网格中水的总体积}}$$

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

其中,  $M_i$  是第  $i$  个粒子的质量。

### 3 沉积与侵蚀过程

#### 3.1 沉积过程

海底界面处的沉积有两种机制,一种是物理沉积,其沉积速率为  $q_{d,phy}$ ;另一种是生物沉积  $q_{d,bio}$ 。两者综合起来是总的沉积速率,即,  $q_{sed} = q_{d,phy} + q_{d,bio}$ 。这两种沉积都与近海底处的悬浮物浓度有密切关系。假定在海底附近的一段水体中,悬浮物的沉降与湍扩散达到一种平衡,那么方程(1)简化为:  $-w_s \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( A_v \frac{\partial C}{\partial z} \right)$ 。于是,  $C = C_{bot} \cdot e^{-\frac{w_s}{A_v} z}$ ,

$$\text{从而, } C_{bot} = \bar{C} \frac{w_s H}{A_v} \left( 1 - e^{-\frac{w_s}{A_v} H} \right)^{-1}$$

这里,  $z = 0$  表示在海底;  $H$  是距离海底的一定深度;  $\bar{C}$  是在这层海水之内的平均浓度。

**3.1.1 物理沉积** 悬浮颗粒物沉积的临界速度 ( $V_{cr,d}^*$ ) 的观测并不多,在渤海未见实测报道,这里取 Pohlmann 等(1994) 的值(单位: m/s)

$$V_{cr,d}^* = \begin{cases} 0.008 & w_s \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \\ 0.008 + 0.02 \cdot (\log w_s + 4.3) & 5 \cdot 10^{-5} < w_s < 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \\ 0.028 & \text{其它} \end{cases}$$

而一个时间步长内的沉积物总量如下式所示:

$$q_{d,phy} = \begin{cases} w_s C_{bot} \left( 1 - \left( \frac{V^*}{V_{cr,d}^*} \right)^2 \right) & V^* < V_{cr,d}^* \quad (V^* \text{ 是海底摩擦速度}) \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

**3.1.2 生物沉积** 由于底栖生物滤食而将海水中的颗粒物吸入底质中的过程称为生物沉积。它与单位面积内的底栖生物在单位时间内的滤水量有关,这是一个具有速度量纲的量,相当于沉降速度。所以一个时间步长内沉降在一个网格内的悬浮颗粒物总量为:

$$q_{d,bio} = W_{bio} \cdot C_{bot} \cdot A_{rea}$$

其中,  $W_{bio}$  是生物沉积过程中的沉降速度(m/s);  $A_{rea}$  是该网格的底面积( $m^2$ )。

#### 3.2 侵蚀过程

根据 Pohlmann 等(1994) 的研究,取侵蚀的临界剪切速度  $V_{cr,e}^* = 0.028 \text{ m/s}$ 。根据底质的不同,模式中侵蚀过程是不一样的。如果海底剪切速度大于临界速度,沉积在海底的泥层将被全部侵蚀,而对于底质本身则分以下两种情况。

底质是泥的情况,侵蚀随时间而逐步进行,侵蚀率  $P_{ero} = M (V^{*2} - V_{cr,e}^{*2})$ ,  $V^{*2} > V_{cr,e}^{*2}$  其中,  $M$  是侵蚀常数,根据 Rodger<sup>1)</sup> 等(1985) 的实验,  $M = 10^{-4} \text{ t/(s} \cdot \text{m}^4)$ 。

砂质底质的情况,如果发生侵蚀,那么到深度  $D_e$  之内的所有细颗粒物物质将被侵蚀掉。侵蚀深度  $D_e = 0.014 \cdot \frac{V^{*2} - V_{cr,e}^{*2}}{V_{cr,e}^{*2}}$ ,  $V^{*2} > V_{cr,e}^{*2}$

这些侵蚀出来的物质形成新的粒子,在离海底 1m 高度以该网格为底的水体中随机

分布,并再次成为悬浮物进行运移,这样完成对侵蚀过程的模拟。

## 4 细颗粒物在底质中的过程

### 4.1 细颗粒物质在垂直方向上的扩散

底质中有生物部分的细颗粒物质(指能够再悬浮的颗粒物)由于底栖生物的作用,不断缓慢地进行运动,这种作用称为生物扰动(bioturbation),在短时间尺度上从单个粒子看这是颗粒物的一种微尺度上的对流作用,而从长时间大量粒子角度来看,就是一种扩散作用。这里只考虑垂直方向。

$$4.1.1 \text{ 控制方程} \quad \frac{\partial C_{\text{bm}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( A_v^{\text{sed}} \frac{\partial C_{\text{bm}}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

其中,  $C_{\text{bm}}$  是有生物部分底质中细颗粒物质的浓度;  $A_v^{\text{sed}}$  是底质中细颗粒物质的垂直扩散系数,取  $A_v^{\text{sed}} = 3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

4.1.2 边界条件 底栖生物并不是均匀分布的,在垂直方向上,参照 Officer 等(1989)的结果,将生物扰动影响范围取为海底以下 20cm 内,即模型中所考虑的底质厚度。在底质的上下表面(上表面即海底表面,而下表面是海底表面向下 20cm 处),细颗粒物质的通量为 0,这似乎与沉积和侵蚀过程不符,但实际上这里只处理在一个时间步长内,发生沉积侵蚀之后,底质中细颗粒物分布的一种调整。因此在底质的上表面:  $A_v^{\text{sed}} (\partial C_{\text{bm}}/\partial z)_{\text{surf}} = 0$ ; 下表面:  $A_v^{\text{sed}} (\partial C_{\text{bm}}/\partial z)_{\text{bot}} = 0$ 。

对方程(3)采用差分法求解。这是一个垂直一维的扩散方程。采用全隐式格式,离散式(3)得一个三对角方程,易用追赶法求出。

### 4.2 有生物部分与无生物部分的交换

在水平方向上,有生物部分与无生物部分也可以由于生物的作用进行混合,这里用水平移来模拟,即每个时间步长内,有生物影响存在的部分将移动  $V_{\text{ns}} \cdot \Delta t$  距离,进入非生物部分,同样地没有生物影响的部分也移动相同的距离。这样就起到了一种混合的作用,取  $V_{\text{ns}} = 3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。

## 5 其它相关模式

### 5.1 海底剪切速度

海流、海浪在海底产生的剪切速度与悬浮物的沉积和再悬浮有密切关系,因此在悬浮物输运模式中必不可少。

5.1.1 海浪产生的剪切速度 根据 Airy 波理论(Allen, 1984),海浪在海底产生的轨道速度为:  $u_b = 0.5 \omega H_s / \sinh(kh)$ , 其中,  $H_s$  是海浪有效波高;  $\omega$  是圆频率;  $k$  是波数;  $h$  是水深。在海底的剪切应力为  $\tau_b = 0.5 f_w \rho u_b^2$ , 其中,  $\rho$  是海水密度;  $f_w$  为摩擦系数, Jonsson<sup>1)</sup> (1966) 给出  $f_w = \exp[-6 + 5.2(A_\delta/k_s)^{-0.19}]$ , 其中,  $A_\delta = \frac{H_s}{2\sinh(kh)}$ ;  $k_s$  是海底粗糙度。

于是,海浪产生的海底剪切速度是:  $V_w^* = \sqrt{\tau_b/\rho} = \sqrt{0.5 f_w u_b^2}$

5.1.2 海流产生的海底剪切速度 Yalin(1977)给出下面的公式,

1) Jonsson I., 1966. Wave boundary layer and friction factors. Proc. 10th. Conf., Coastal Eng., Tokyo, Japan

$$\frac{u}{V_v^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k_s} + \begin{cases} \frac{1}{\kappa} \ln \frac{V_v^* \cdot k_s}{\nu} + 5.5 & \text{层流} \\ 8.5 & \text{充分发展的湍流} \end{cases}$$

其中,  $z$  为距离海底的高度;  $u$  为在  $z$  处的流速;  $\kappa$  是 Von Karman 常数;  $V_v^*$  是海流在海底剪切速度;  $\nu$  是分子粘性系数;  $k_s$  是海底有效糙率, 这是一个具有长度量纲的量, 它表示海底颗粒物高于该处平均海底的高度, Kamphuis (1975) 认为  $k_s = 2d_{90}$ ,  $d_{90}$  是 90% 以上颗粒具有的粒径。

5.1.3 浪和流共同作用下的剪切速度  $u^* = \sqrt{V_v^{*2} + V_w^{*2}}$

## 5.2 海浪对颗粒物扩散系数的影响

海流产生的颗粒物扩散系数由流的模式给出。但海浪的搅动作用对这一扩散系数的影响很大, 特别在垂直方向上。这里采用 Van Rijn (1986) 给出的一个三层的经验公式。

$$A_{r,w} = \begin{cases} A_{r,bed} = 6.5 \times 10^{-4} \alpha_b \delta D_*^2 u_b & z < \delta \\ A_{r,max} = 3.5 \times 10^{-2} \alpha_b \frac{hH_s}{T_s} & z > 0.5h \\ A_{r,bed} + (A_{r,max} - A_{r,bed}) \frac{z - \delta}{0.5h - \delta} & \text{其它} \end{cases}$$

其中,  $\delta$  是风浪的海底边界层厚度,  $\delta = \sqrt{\nu/2\omega}$ ;  $\omega$  是角频率;  $\nu$  是水的分子粘性系数;  $D_*$  是颗粒直径,  $D_* = D_{50}[(s-1)g/\nu_0]^{1/3}$ ,  $D_{50}$  是中值粒径,  $s = \rho_s/\rho$ ,  $\rho_s$  是颗粒物密度,  $\nu_0$  是运动性粘性系数;  $\alpha_b$  是波破碎因子,  $\alpha_b = \begin{cases} 5(H_s/h) - 2 & H_s/h \geq 0.6 \\ 1 & H_s/h < 0.6 \end{cases}$  这样得到的浪产生的扩散系数再加上流产生的, 就是悬浮颗粒物的扩散系数。

## 5.3 三维潮流、风海流模式及风浪模式

海流的模式用流的模式采用的是 Backhaus (1985) 及其合作者发展的 Hamburg Shelf Ocean Model (HAM SOM) 模式, 黄大吉等 (1996) 将这个模式用在了渤海。这个模式是一个三维斜压预报模式, 是分层平均计算的。在本研究中只考虑了正压的情况, 计算了风海流及包含了  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $N_2$  等 5 个分潮在内的潮流。而浪的模式由 U S Army Coastal Engineering Research Center (1984) 浅水海浪预报经验公式给出。

## 6 结语

悬浮物输运的数值研究目前尚处于一个探索阶段, 它依赖于水动力的模式的完善与否和对悬浮物输运过程的理解。本文是以三维正压的流的模式为基础, 考虑了影响悬浮物输运的几个重要机制, 可以基本反映悬浮物输运的趋势。但是由于现在对水动力过程及悬浮物输运过程认识并不完善, 有些过程如絮凝未能反映在模式中, 这是下一步所要进行的工作。

## 参 考 文 献

黄大吉, 陈宗镛, 苏纪兰, 1996. 三维陆架海模式在渤海中的应用(1). 海洋学报, 18(5): 1-13

秦蕴珊, 李 凡, 1982. 渤海海水中的悬浮体的研究. 海洋学报, 4(2): 191-200

曹祖德, 王桂芬, 1993. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟. 海洋学报, 15(1): 108-118

- Allen J R L, 1984. Sedimentary structures, their character and physical basis (vol 1), *Development in Sedimentology*, 30. Amsterdam/Oxford/New York/Tokyo: Elsevier, 593
- Backhaus J, 1985. A three- dimensional model for the simulation of shelf sea dynamics. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 38: 165—187
- Emery K, Milliman J, 1978. Suspended matter in surface water: influence of river discharge and of upwelling. *Sedimentology*, 25(1): 125—140
- Jiang W, Mayer B, 1997. A study on the transportation of suspended particulate matter from Yellow River by using a 3D particle model. *青岛海洋大学学报*, 7(4): 439—445
- Kamphuis J, 1975. Friction factor under oscillatory waves. *Proc ASCE J Waterway and Harbor*, 101: 135—144
- Officer C, Lynch D, 1989. Bioturbation, sedimentation and sediment water exchanges. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 28: 1—12
- Pohlmann T, Puls W, 1994. Currents and transport in water. In: *Circulation and Contaminant Fluxes in the North Sea* (J S ndermann Ed.). Berlin: Springer Verlag Science, 555—605
- U S Army Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore protection manual (4th ed). Vicksburg, Miss: Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 337
- Van Rijn L, Meijer K, 1986. Three- dimensional mathematical modeling of suspended sediment transport by currents and waves. Report H461/Q250/Q422. Delft: Delft Hydraulic Laboratory, 121
- Yalin M, 1977. *Mechanics of sediment transport* (2nd ed). Oxford, New York: Pergamon Press, 298

# 3D SUSPENDED PARTICULATE MATTER TRANSPORTATION MODEL IN THE BOHAI SEA

## I. INTRODUCTION OF THE MODEL

JIANG Wen- sheng, SUN Wen- xin

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

**Abstract** Nowadays people pay more and more attention to the study of the transport of suspended particulate matter (SPM) because of the important role it plays in marine ecosystem and coastal engineering. In order to study the long term SPM transport pattern in the Bohai Sea a SPM model which is developed in Hamburg University in Germany is modified and applied. It is a 3D random tracer model which consists three parts: (1) the movement of the SPM in the water body, (2) deposition and erosion process at the seabed, and (3) the movement of the sediment fine fraction at the sea bottom.

SPM in the water is driven by the current which is calculated beforehand by using a three dimensional barotropic circulation forced by the meteorological factors such as wind, air pressure and tidal wave propagating from the deep ocean. It is assumed that the velocity of the SPM is equal to the water velocity minus the sinking velocity of itself. Thus the deposition process is included. The wind wave is considered in the resuspension process of the SPM. Its influence is stronger than current. The sea bottom is treated as a limited source of the SPM.

The numerical scheme is according to a PIC (particle in cell) method. The SPM in one grid is split into many small particles, which are traced according to the current field in the advection step, and a random walking is performed to simulate the diffusion process. Thus the new positions of all the particles can be determined and the SPM concentrations are obtained.

SPM transport is a very complicate process. In this study the major processes are included. This model can be used to study the SPM concentration pattern on a large time scale. Since at present not all the mechanisms concerning the SPM transport are fully understood, the numerical simulation need to be improved.

**Key words** Suspended particulate matter Transport Current \ Wind wave Numerical modeling

**Subject classification number** P731