

三维泥沙数学模型的研究进展

陈国祥 陈界仁 沙捞·巴里

(河海大学水文水资源及环境学院 南京 210098)

TV142

摘要 对国内外近年来在三维水流泥沙数学模型的研究应用情况进行总结和评述,指出三维泥沙数学模型研究的必要性和重要性,对数学模型的基本方程、边界条件,泥沙扩散系数,泥沙沉降速度,数值计算方法等进行讨论,介绍模型的验证和应用情况,最后提出改进和完善三维泥沙数学模型研究、应用的途径。

关键词 泥沙运动 数学模型 边界条件 三维分析

早期,工程中的泥沙问题大都采用原型观测和物理模型试验方法加以解决。物理模型具有理论基础成熟、可靠性高等优点,但在经济性和灵活性等方面有很大的不足,因而限制了它的广泛应用。

随着大容量、高速度计算机的发展,泥沙数学模型正成为研究泥沙问题的重要手段。一维泥沙数学模型用来解决长河段长时段的泥沙运动和河床变形问题,研究较早,应用广泛,比较成熟,已经可以替代物理模型试验。二维泥沙数学模型,尤其是平面二维泥沙数学模型用来解决泥沙运动和河床变形在平面上的分布问题,近年来也得到了迅速发展,建立了为数众多的平面二维泥沙数学模型^[1],在生产上得到了广泛应用,并能部分替代物理模型试验。但是,一、二维泥沙数学模型只能反映断面平均及垂线平均水流泥沙运动情况,不能反映它们沿水深的变化,而实际工程中的水流泥沙运动大都具有高度的三维性,尤其是泥沙沿垂线几乎均为非均匀分布,因此只有三维泥沙数学模型才能完全满足要求。近年来,三维泥沙数学模型发展却比较缓慢,其主要原因有三个方面。

a. 认为泥沙基本理论还不成熟,三维泥

沙数学模型意义不大。诚然,泥沙运动基本规律仍不成熟,有许多问题有待进一步研究,这些问题目前还难以突破。但是,开展三维泥沙数学模型研究,一方面是满足生产的需要,另一方面也是为了促进泥沙运动基本理论的研究和发展。

b. 认为三维泥沙数学模型结构复杂,节点多,计算工作量大,不易进行研究和应用。随着现代计算机技术迅速发展,这一问题已不再是研究三维泥沙数学模型的障碍。

c. 认为工程中的泥沙问题,一、二维数学模型已经够用,不需要三维数学模型。这种看法是不全面的,因为实际工程中遇到的水流均为复杂的三维流动,水流输送的泥沙也是三维的。

因此笔者认为,有必要进一步开展三维泥沙数学模型研究和应用。为了了解三维泥沙数学模型研究的现状、存在的问题和发展的趋势,本文拟对近年来三维泥沙数学模型研究状况作一简要回顾和展望。

1 基本方程

1.1 水流运动方程

水流运动遵循 N-S 方程:

第一作者简介:陈国祥,男,教授,从事水文及泥沙研究,曾发表《冲积河流数学模拟的进展》等论文。

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (2)$$

式中 ρ 为水流密度; u_j 为 X, Y, Z 方向的流速; $j=1, 2, 3$; P 为压力; ν 为水流运动粘性系数; t 为时间; x_j 为坐标; g 为重力加速度。

实际工程中所遇到的水流均为紊流, 对 N-S 方程作时均演算, 方程(1), (2)变为连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

动量方程

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + g_i \quad (4)$$

式中 字母上方的横线表示时均值; τ_{ij} 是由于紊动产生的附加作用力, 对于不可压缩流体, 利用 Boussinesq 假设, 方程(3), (4)写成各分量形式有:

连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

X 方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \\ & \frac{\partial}{\partial x} (2\epsilon_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} [\epsilon_H (\frac{\partial u}{\partial y} + \\ & \frac{\partial v}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial z} [\epsilon_v (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] \end{aligned} \quad (6)$$

Y 方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \\ & \frac{\partial}{\partial x} [\epsilon_H (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})] + \frac{\partial}{\partial y} (2\epsilon_H \frac{\partial v}{\partial y} + \\ & \frac{\partial}{\partial z} [\epsilon_v (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})] \end{aligned} \quad (7)$$

Z 方向动量方程

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} =$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} [\epsilon_H (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} [\epsilon_H (\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z})] + \frac{\partial}{\partial z} (2\epsilon_v \frac{\partial w}{\partial z}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 u, v, w 分别为 X, Y, Z 方向的流速; ϵ_H, ϵ_v 分别为水平方向和垂直方向的水流紊动粘性系数。如垂直方向作用力远小于重力, Z 方向动量方程可简化为

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (9)$$

1.2 泥沙输送方程

根据泥沙运动特性, 其输送模式可分为下面三类。

a. 泥沙主要以悬沙方式输送, 推移质所占比例很小。悬移质泥沙运动遵循对流扩散基本规律, 其数学方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uS) + \frac{\partial}{\partial y} (vS) + \frac{\partial}{\partial z} (wS) = & \\ \frac{\partial}{\partial x} (\omega_s S) = \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_s \frac{\partial S}{\partial x}) + & \\ \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_s \frac{\partial S}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_s \frac{\partial S}{\partial z}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中 S 为悬沙浓度; ω_s 为悬沙沉速; ϵ_s 为泥沙扩散系数。通过对方程(10)的数值解, 得到泥沙浓度分布, 计算输沙率。该模式的主要缺点是近床面泥沙浓度边界条件不易确定, 在推移质不可忽略时, 输沙率误差较大。

b. 泥沙输送由悬沙和推移质两部分组成。悬沙运动方程仍为(10)式, 推移质运动由经验关系确定。该模式的关键是经验公式及其系数要用实测资料进行率定。

c. 不分悬沙和推移质, 泥沙以全沙方式输送。只需选择一个合适的全沙输送经验公式, 该模式的关键仍是经验公式的选择和公式中的系数确定。

1.3 河床变形方程

河床变形方程为

$$\gamma' \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial G_x}{\partial x} + \frac{\partial G_y}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

式中 γ' 为泥沙干容重; Z_b 为河床高程; $G_x = G_{sx} + G_{bx}$, $G_y = G_{sy} + G_{by}$, G_s 和 G_b 分别为

悬移质和推移质输沙率。

2 初始条件和边界条件

三维水流泥沙数学模型需要在一定的初始条件和边界条件下求解。边界条件又分为自由面条件、岸边界条件、进出口边界条件及床面边界条件等。

2.1 初始条件

初始条件为计算初始时刻的水位、流速、含沙量和初始地形条件。

2.2 边界条件

a. 自由面(水面)条件。在自由表面,边界条件为

$$\rho \epsilon_v \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_{xz}, \quad \rho \epsilon_v \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{yz} \quad (12)$$

其中 τ_{xz}, τ_{yz} 分别为自由表面上沿 X 和 Y 方向的风切力。风切力用下式表示

$$\tau_i = \rho_a C_d |W_d| W_d \quad (13)$$

式中 W_d 为风速; C_d 为风阻力系数; ρ_a 为空气密度。无风时, $\tau_i = 0$, 自由水面垂向流速分量为

$$W_d = \frac{\partial Z_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial Z_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial Z_i}{\partial y} \quad (14)$$

式中 u_i, v_i 为自由面的水平运动速度, Z_i 为自由面高程。泥沙条件为

$$\omega_s S + \epsilon_s \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

b. 岸边界条件。岸边界条件为垂直于边界流速为零, 即 $V \cdot n = 0$, 纵向流速 u 采用不可滑动条件 $u = 0$ 。泥沙采用通量为零, 即 $\partial S / \partial n = 0$ 。

c. 进口边界条件。进口选择在流动较平顺处, 采用条件为

$$u = u_{in}, \quad S = S_{in}, \quad v = w = 0 \quad (16)$$

其中 u_{in} 和 u_{in} 为进口纵向流速和含沙量。

d. 出口边界条件。出流边界尽量选择流动平顺之断面, 出流条件为流速梯度为零, 即 $\partial u / \partial x = \partial v / \partial x = \partial w / \partial x = 0$, 悬沙浓度梯度为零, 即 $\partial S / \partial x = 0$ 。

e. 床面边界条件。水流计算中通常采

用壁函数法, 将边界布置在离床面一定距离 y_p 处, 且 y_p 满足 $30 < y_p u_* / \nu < 100$, 在 y_p 处, 横向及壁面流速 $v = w = 0$, 而纵向流速 u_p 满足条件

$$u_p = \frac{u_*}{\kappa} \ln(E \frac{y_p u_*}{\nu}) \quad (17)$$

式中 κ 为卡门常数; E 与壁面粗糙程度有关, 对于光滑壁面 $E = 9.793$ 。文献[2]认为近床面阻力大小为

$$\tau_{bx} = \rho C_f u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (18)$$

$$\tau_{by} = \rho C_f v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

式中 τ_{bx}, τ_{by} 分别为沿 X, Y 方向的床面切力; u_b, v_b 分别为近床面流速; C_f 为摩阻系数。在泥沙计算中, 边界布设在床面以上高度 a 处, a 满足条件 $a = \max(K, 0.01H)$, K 为床面粗糙高度, H 为水深。底部泥沙边界条件有五类。第一类是底部含沙量为常数, 该常数有的认为是底部泥沙挟沙力, 有的采用平衡浓度。第二类是

$$\omega_s S_a^* + \epsilon_s \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=a} = 0 \quad (19)$$

式中 ϵ_s 为泥沙扩散系数; ω_s 为泥沙沉速。它表示底部泥沙扩散项等于平衡条件下的下沉项。第三类是

$$\frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=a} = 0 \quad (20)$$

它表示没有紊动作用使泥沙上浮。第四类是

$$\omega_s S_a + \epsilon_s \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=a} = \alpha \omega_s (S_a - S_a^*) \quad (21)$$

式中 α 是泥沙恢复饱和系数, 该边界条件通用性强。第五类是

$$\omega_s S_a + \epsilon_s \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=a} = B \omega_s S_a \quad (22)$$

此边界适用于纯淤积情况。

3 数值求解方法

三维水流泥沙数学模型的基本方程不能直接求解, 必须用数值求解方法。基本方程离散求解方法分为有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)和有限分析法。常用的数值计算

方法有垂向分层法、函数展开法、破开算子法、边界拟合坐标法、二三维耦合法等。

a. 垂向分层法(分层模型)^[3,4]。早期的三维模型是建立在平面二维模型基础之上的,将三维水流沿垂向分成若干层,每层均按平面二维来处理,层与层之间的交界面是不可入的,即没有质量交换,只有动量交换,每层的计算厚度由连续方程来确定。该法的优点在于简单实用,有利于计算实际分层流。缺点是引入人为交界面,交界面上必须引入摩擦系数,而摩擦系数选用往往带有经验性。

b. 函数展开法。函数展开法是将流速、密度的垂向变化用一组随水平位置和时间变化的函数来表示。函数由一系列基函数的加权余量法确定,常用的基函数有三角函数,B样条和线性积分函数。如 Davies^[5,6]采用四阶样条展开的速度垂直分布,其缺点是工作量大,此后,他又提出了正交函数展开法,其系数方程仍为耦合的。文献[7]用三次多项式构成函数来描述垂向水流结构。

c. 破开算子法^[8]。破开算子法(或称分步法)的基本思想是引进一个或多个中间变量,微分方程中的时间微商破开成两个或更多部分,根据各部分特性,分别选用合适的计算方法。其优点是对各部分能用最合适的数值方法求解,省时省内存。其不足之处是时间分裂后,对时间离散只有一阶精度,边界条件提法复杂。

d. 边界拟合坐标法。有限差分法不足之处是不能很好地处理不规则边界,为克服这一缺点,Thompson等提出了边界拟合坐标法^[9]。在三维计算中的处理方法是采用复合变换法,平面用边界拟合坐标,垂向用伸缩坐标。另一种方法是将不规则边界组成的立方体变换成正方体,然后在正方体内求解。

e. 二三维耦合方法^[10]。先对全场进行二维计算,再在特定的区域进行三维计算,三维计算中利用二维结果作为三维的边界条件。该法灵活简便,缺点是交界面附近可能产生阻力不连续。

此外还有三维有限元法^[11],有限差分和有限元相结合方法^[12]。

4. 有关问题的处理

4.1 阻力计算

阻力问题处理得好坏,直接关系到水流计算结果的精度,并影响到河床变形的计算。在一维和二维模型中,水流阻力出现在运动方程中,作为其中一项参加方程的离散和求解,阻力项一般用谢才公式或曼宁公式来表示。

在三维问题中,阻力项不出现在运动方程中,而是以边界条件形式出现,如式(17)中 E 随床面形态和床沙条件变化而变化。式(18)中用阻力系数 C_f 来表示,文献[13]用近底厚度参数 Z 来反映底部阻力大小,文献[14]考虑沙波形态阻力,有

$$K_s = 3D_{90} + 1.1\gamma_p H [1 - \exp(-25H/L)] \quad (23)$$

式中 D_{90} 为床沙粒径; γ_p 为泥沙形状系数; H 为沙波高度; L 为沙波长度。

4.2 自由面处理

实际问题多为含自由面的水流输送问题。自由面的位置在计算中是运动变化的,如非恒定流中自由面随时间变化。早期对自由面处理采用静水压力假定和刚盖假定。目前对自由面的处理方法主要有下面几种:

a. 标记质点法(MAC)^[15]。在整个流动区域中附加一组标记质量,以表示流体所在的位置。

b. 空隙比方法(VOF)^[16]。设定计算域内能表示每一个单元含有多少流体体积的函数 F , $F=1$ 时,单元充满流体, $F=0$ 时,单元为空。单元函数反映自由面的外法线方向。

c. 标高函数法。用水位高度函数 H 描述自由面的位置,要求水面高度函数必须是单值的。

文献[17]在N-S方程基础上,增加了两个描述自由面变化的方程。将连续方程沿水深积分,得

$$\frac{\partial Z_s}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}H)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}H)}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

式中 Z_s 为自由面高程; $\bar{u}, \bar{v}$ 分别为沿 X, Y 方向的垂线平均流速; H 为水深。自由面运动方程为

$$W_s = \frac{\partial Z_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial Z_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial Z_s}{\partial y} \quad (25)$$

利用上述两个水位方程,即可追踪自由面,避免刚盖假设。

4.3 紊动粘性系数和泥沙扩散系数确定

紊动粘性系数大多采用经验关系式。文献[18]认为水平方向和垂直方向的紊动粘性系数不同,垂向

$$\epsilon_v = L_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|$$

$$\frac{L_m}{H} = 0.14 - 0.08 \left(\frac{Z}{H} \right)^2 - 0.06 \left(\frac{Z}{H} \right)^4 \quad (26)$$

水平

$$\epsilon_H = L_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$$

$$\frac{L_m}{B} = 0.14 - 0.08 \left(\frac{Y}{B} \right)^2 - 0.06 \left(\frac{Y}{B} \right)^4 \quad (27)$$

当有密度分层时,引入 Richardson 数,有

$$\epsilon_H = \epsilon_H (1 + 10 R_i)^{-0.5}$$

$$R_i = - \frac{E}{\bar{\rho}_m} \cdot \frac{\partial \bar{\rho}_m}{\partial z} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^{-2} \quad (28)$$

文献[19]用 $K-\epsilon$ 方程紊流模型确定紊动粘性系数。

处理泥沙扩散系数的方法一般是建立扩散系数与紊动粘性系数的关系,并且认为三个方向值相等。文献[20]采用 $\epsilon_s = \beta \epsilon_H, \beta = 1 + 2(\omega_s/u_*')^2, 0 < \omega_s/u_*' < 1, \beta$ 与泥沙特性有关。

4.4 挟沙力处理

在前述泥沙边界中,第一类边界适用于输沙平衡情况,第二类实质上是第四类中 $\alpha = 0$ 的特例,第四类边界既适用于冲刷,也适用于淤积。

泥沙边界条件中含有底部泥沙挟沙力,

即挟沙力以边界条件形式出现,只有确定了该挟沙力,泥沙边界条件才能应用。目前一、二维模型中所用的水流挟沙力大都采用经验公式,公式中的系数用实测资料来率定。底部泥沙挟沙力与床面泥沙运动有关。由于近床面泥沙运动规律复杂,测量比较困难,对底部泥沙挟沙力研究还不多。其解决的关键在于对床面泥沙运动和交换机理进行分析,探讨挟沙力公式,从而解决床面泥沙边界条件问题。

对第一类边界条件中的常数,文献[21]采用平衡浓度表达式:

$$S_{ae} = 0.015 D_{50} T^{1.5} / (a D_*'^{0.3}) \quad (29)$$

式中 D_{50} 为床沙中值粒径; D_* 为颗粒参数; T 为输送参数。

4.5 泥沙沉速公式

泥沙数学模型中采用的泥沙沉速应为群体泥沙沉速,文献[22]用下式:

$$\omega_s = 10 \frac{\nu}{D} \left\{ [1 + 0.01(\gamma_s - 1) \cdot \frac{g D_*'^3}{\nu}]^{0.5} - 1 \right\} \quad (30)$$

式中 ν 为水流运动粘性系数; γ_s 为泥沙比重; D_s 为泥沙代表粒径,考虑含沙量影响,用下式修正:

$$\omega = \omega_0 (1 - \beta S_s)^n \quad (31)$$

式中 ω_0 为单颗粒泥沙沉速; S_s 为泥沙体积浓度; β 为沉速修正系数; n 为与泥沙粒径有关的指数,对于细颗粒泥沙应考虑其絮凝作用。

4.6 非均匀沙计算

泥沙数学模型的难点之一是冲淤过程中悬沙级配和床沙级配变化的模拟。这些在一、二维泥沙数学模型中已有很多研究[23]。

5 模型验证和应用

已建立的三维水流泥沙数学模型获得了初步验证和应用[23~28],如沉沙池设计,河口浑浊带运动,弯道水流泥沙运动及海岸泥沙运动等。

文献[29]应用沉沙池试验资料来验证三维模型计算结果。模型计算用两组网格 $41 \times 11 \times 11$ 和 $96 \times 11 \times 11$, 进口流速为均匀分布, 糙率单元侧壁为 1 mm , 底壁为 5 mm , 模型用控制体积法离散求解, 紊动粘性系数用 $K-\epsilon$ 模型确定。模型计算的垂向流速分布和含沙量分布与实测资料吻合, 回流区大小接近实测值, 模型中还用四组均匀沙计算分析沉沙池的拦截效率。

文献[30]对长江口浑浊带进行了三维数值模拟, 网格划分为 $43 \times 23 \times 10$, 垂向网格为非均匀, 水流计算的 $\Delta t = 30 \text{ s}$, 泥沙计算 $\Delta t = 300 \text{ s}$, 初始时刻含沙量采用指数分布, 即 $C(\eta) = \exp[-2(1 - \eta)]$, 经过四个潮周期, 基本上达到动态稳定。模型计算得到的南北槽最大浑浊带的时空变化与实测资料基本相符^[27], 数学模型再现了河口最大浑浊带的运动过程。

文献[31]进行了弯道水流泥沙运动的三维数值模拟, 弯道进口为长 6 m 的直段, 出口为 3 m 的直段, 网格为 $31 \times 11 \times 13$, 阻力系数 C_f 取 0.037 , 首先进行了水流计算, 结果表明, 三维数学模型计算的水面纵向分布及垂线平均流速出现的位置比二维结果更接近实测资料, 三维模型计算的河床变形精度更高。

文献[32]用建立的三维水流泥沙数学模型计算潮流输沙, 研究的区域是英国的 Humber 湾, 网格为 $84 \times 29 \times 9$, 平面均匀划分, $\Delta x = \Delta y = 500 \text{ m}$, 垂向非均匀, 模型计算的流速分布和含沙量分布与实测结果符合较好。用模型预测了海岸的床面形态和工程建筑物附近的冲刷情况。

6 结 语

工程问题中, 一、二维泥沙数学模型已不能满足要求, 必须开展三维泥沙数学模型研究。迄今为止, 三维水流数学模型已有不少研究, 而泥沙数学模型研究相对较少。笔者认为, 为推动其研究和应用, 应在以下几个方面开展工作:

a. 加强泥沙基本理论研究。泥沙数学模型水平的提高, 有赖于泥沙运动基本理论的研究和成熟, 如边界阻力问题, 紊动粘性系数和泥沙扩散系数, 底部泥沙挟沙力。泥沙基本理论研究应采用理论研究分析和试验研究相结合的方法。

b. 针对工程中的各种具体问题, 如弯道水流泥沙运动, 取水口附近水流泥沙运动, 水工建筑物附近水流泥沙运动, 河口海岸泥沙运动, 湖泊水库分层流动, 进行三维水流泥沙数学模型研究, 通过这些模型的研究和应用, 总结经验, 完善模型, 不断推广。

c. 高效数值计算方法的研究。三维水流泥沙数学模型结构复杂, 节点多, 计算工作量大, 寻求较好的计算方法有助于该泥沙数学模型的研究和应用。

d. 加强原型观测和研究。三维泥沙数学模型计算结果精度如何, 其标准主要是与实测资料进行比较。目前一、二维观测资料较多, 三维观测资料较少, 应进行更多的、更精确的三维资料测验。

e. 开展模型的后处理及软件的商品化研究, 方便用户使用和管理部门应用。

参考文献

- 1 陈国祥. 冲积河流数学模拟的进展. 河海大学科技情报, 1989(3): 50 ~ 63
- 2 Huang Wenrui, Spalding M. 3D model of estuarine circulation and water quality induced by surface discharges. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1995, 121(4): 300 ~ 311
- 3 王祥三. 河口污染综合预测模型. 水利学报, 1996(8): 51 ~ 58
- 4 Peter K Stansty, Peter M Lloyd. A semi-implicit lagrangian scheme for 3D shallow water flow with a two-layer turbulence model. International Journal for Numerical Method in Fluid. 1995, 20(2): 115 ~ 134
- 5 Davies A M. The numerical solution of the three dimensional hydrodynamic equations using a B-spline representation of the vertical current profiles. In: Bottom Turbulence. Elsevier Publication Corporation, 1997. 1 ~ 26
- 6 Davies A M. Formulation of a linear 3D hydrodynamic sea model using a Galerkin Eigenfunction method. In-

- ternational Journal for Numerical Method in Fluid, 1983 (3): 110 ~ 126
 - 7 Wang Sam S Y. Finite element modeling of 3D hydrodynamic and sediment transport phenomena (research report). The University of Mississippi, 1987, 6
 - 8 刘子龙, 王船海. 长江口三维水流模拟. 河海大学学报, 1996(5): 108 ~ 110
 - 9 Thompson J F. Numerical solution of flow problem using body fitted coordinates system. In: Computation Fluid Dynamics. Hemisphere Publishing Corporation, 1980: 183 ~ 256
 - 10 Chenin Modojorich M I. Numerical problems in coupling two- and three-dimensional models and turbulence measurements. In: The 2nd Symposium on refined flow modeling and turbulence Measurement, 1988, 302 ~ 305
 - 11 Sornmeijer B P, Kok J. Implementation and performance of the timeintegration of a 3D numerical transport model. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995, 21(4): 349 ~ 367
 - 12 Xu Zhigang. A transport approach to the convolution method for numerical modeling of linearized 3D circulation in shallows seas, International Journal for Numerical Method in Fluid, 1995, 20(5): 363 ~ 392
 - 13 李芳君, 陈士荫. 疏浚引起的泥沙三维数值模拟. 泥沙研究, 1994(4): 68 ~ 75
 - 14 Frenti R, Dhat G, Tanguy J M. A three dimensional finite element sediment transport model. In: Proceeding of 5th ISRS, University of Karlsruhe, 1992
 - 15 Shen Liang, Steven Armfield. Simplified marker and cell method for unsteady flows on non-staggered grids. International Journal for Numerical Methods in Fluid, 1995, 21(1): 15 ~ 34
 - 16 马福喜. 三维含自由面紊流的数值模拟. 水利学报, 1996(8): 39 ~ 44
 - 17 周思平. 三维含自由水面紊流流动的数值模拟. [学位论文]. 南京: 河海大学, 1988
 - 18 陆永军, 赵连白. 航槽三维流动的数学模型. 水道港口, 1995(4): 24 ~ 31
 - 19 徐贵泉. 河口分层特性及其三维数值模拟. [学位论文]. 南京: 河海大学, 1991
 - 20 O'connor B A, Nicholson J. A 3D model of suspend particle sediment transport. Coastal Engineering, 1988 (12): 157 ~ 174
 - 21 Van Rijn. Field verification of 2D and 3D suspend sediment model. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1990, 116(10): 1270 ~ 1288
 - 22 Menis P, Holz K P. 3D model verification for a groyne and harbor experiment, Hydraulic. Engrg '94, 1994. 218 ~ 221
 - 23 Holly F M, Rheul J L. Numerical physical framewok for mobile bed Modeling. Journal of Hydraulic Research, 1994, 28(4): 635 ~ 647
 - 24 韩国其. 天然水流三维数值模拟的进展. 河海大学科技情报, 1989(1): 13 ~ 22
 - 25 王平义, 方铎. 弯道水流的三维解法. 水利学报, 1994(2): 57 ~ 61
 - 26 赵士清. 长江口三维潮流数值计算. 水利水运科学研究, 1985(1): 23 ~ 32
 - 27 林明森, 陶建华. 三维溃坝问题的数值模拟研究. 水利学报, 1996(7): 67 ~ 74
 - 28 Wu Jian, Tsanis I K. 3D numerical study of wind induced water currents. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1995, 121(5): 388 ~ 395
 - 29 Olsen N R B, Skoglund M. 3D numerical modelling of water and sediment flow in a sand trap. Journal of Hydraulic Research, 1994, 32(6): 833 ~ 844
 - 30 周华君. 长江口浑浊带特性研究和三维水流泥沙数值模拟. [学位论文]. 南京: 河海大学, 1992
 - 31 Shimizu Y, Yamagauchi H. 3D computation of flow and bed deformation. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 116 (9): 1090 ~ 1108
 - 32 Lin Bingliang, Roger A Falconer. Numerical modeling of three dimensional suspend sediment for estuarine and coastal waters. Journal of Hydraulic Research, 1996, 34(4): 435 ~ 456
- (收稿日期: 1997-03-18 编辑: 马敏峰)
-
- 新书介绍 ·
- 《Calibration and Reliability in Groundwater Modelling》**——Calibration and Reliability in Groundwater Modelling = 地下水模拟的率定与可靠性. — Karl Kovar & Paul van der Heijde 主编. — IAHS 出版社, 1996 年 9 月, ISBN 0-947571-94-9, 606 页。
- 近年来, 已进行的重要研究产生了可将建模的错误结合到模拟过程并可确定模型的决策不确定性的度的各种方法。逐渐地, 这些新技术开始用于各种问题和场合。正如以前的系列会议 ModelCARE 90 (举行于 1990 年), ModelCARE96 (于 1996 年 9 月在美国科罗拉多州 Golden) 会议的主要目的是为有关方法和技术的发表提供一个国际讲坛以便确定进一步发展的需要。此外, 会议旨在通过率定和可靠性评估的实例研究, 对各种技术的实用性进行论证。该论文集包括 59 篇论文, 涉及会议主办的 6 个议题。
- (摘自 IHP, 1997, 总第 9 期)