

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.015

近底泥沙通量的处理方法及适用性

罗 锋^{1 2 3}

(1. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101; 2. 国家海洋局海涂研究中心, 江苏 南京 210036;
3. 江苏省海涂研究中心, 江苏 南京 210036)

摘要: 为了正确理解悬沙运动方程底边界条件即近底泥沙通量的诸多处理方法的物理意义和适用性, 避免泥沙理论分析和数值计算带来的偏差, 归纳总结了近底泥沙通量的各种表达式, 对它们的适用性和合理性进行分析. 结果表明: 以挟沙力、切应力、参考浓度或临界速度等方法处理近底泥沙通量, 表达形式虽然多样, 或将临界切应力换成对应的临界速度表示, 或加入一些修正系数, 但其物理本质不变, 只是为了处理一些具体问题而做的简化或修正. 挟沙力方法和切应力方法的经典形式用于描述近底泥沙通量更具一般性, 这 2 种方法描述的物理过程有差别.

关键词: 泥沙; 悬沙输运; 近底泥沙通量; 挟沙力; 切应力

中图分类号: TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)03-0332-06

Near-bed sediment flux treatment methods and their applicability

LUO Feng^{1 2 3}

(1. *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;*
2. *Tidal Flat Research Center of SOA, Nanjing 210036, China;*
3. *Tidal Flat Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China*)

Abstract: In order to obtain a precise understanding of the physical meanings and applicability of various methods for treatment of the bottom boundary conditions of the suspended sediment motion equation, that is, the near-bed sediment flux, as well as to prevent the occurrence of the deviation between theoretical analysis and numerical calculation, the near-bed sediment flux equations are summarized and their applicability and rationality are analyzed in this paper. The results show that multiple approaches can be adopted to treat the near-bed sediment flux using the sediment carrying capacity, shear stress, and reference concentration. These approaches involve either replacing the critical shear stress with corresponding critical speed or adding some correction factors, whereas their physical nature remains unchanged, which is to deal with specific problems through correction simplification. The sediment carrying capacity and shear stress are commonly used to describe the near-bed sediment flux, and the two methods describe the physical process differently.

Key words: sediment; suspended sediment transport; near-bed sediment flux; sediment carrying capacity; shear stress

河口海岸、河流、湖泊、水库等水域的悬沙运动问题长期受到人们关注. 其产生的短期和长期效应包括生态区的水质问题、岸滩演变、河床冲淤、港口航道回淤, 以及河口拦门沙的形成等. 细颗粒泥沙通常表现出较强的吸附性, 既是营养盐和有机物的载体, 又吸附重金属元素和有毒废弃物, 其在底床形成的沉积物层富含各种污染物, 因而底沙及其再悬浮极易造成水体的二次污染, 并对污染物的迁移和循环起着重要作用. 悬沙还影响各种生态过程, 底沙再悬浮降低水体的透光程度, 影响初级生产力及浮游植物和底栖生物的种类、数量和分布, 对生态环境、生物和渔业生产具有一定影响. 上述问题的研究均以悬沙运动方程近底泥沙通量的正确描述为基础.

近底泥沙通量的真正含义即悬沙运动方程的底部边界条件^[1]. 悬沙运动方程本身是不封闭的, 求解离不

收稿日期: 2011-04-29

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201205005, 201005006); 中国博士后科学基金(20100481459)

作者简介: 罗锋(1979—), 男, 湖北黄石人, 博士, 主要从事河口海岸环境及物质运输研究. E-mail: lfuo@hhu.edu.cn

开水流控制方程及其定解条件,在研究河流、河口以及海岸悬沙运动时,常以自由表面处泥沙通量为零作为方程的水面边界条件,以悬沙和底沙的交换即近底泥沙通量作为底部定解条件,通过处理自由表面和水底定解条件来解决问题。由于定解条件确定方法不同,近底泥沙通量表达出现了目前常用的挟沙力方法和切应力方法,但形式多样,不同的近底通量表达形式应用上的多样化,对泥沙运动的基本理论、方法的理解出现了“百家争鸣”的局面,一方面对泥沙理论的研究具有重要意义,另一方面导致目前泥沙研究在某种程度上的混乱。笔者通过对现有文献资料的归纳、整理和分析,概括总结了 2 种方法在国内外的不同提法,并就各种处理方法的物理意义和适用性进行分析研究。

1 近底泥沙通量的常用处理方法

近底泥沙通量是不平衡输沙的一个关键问题,其确定对于含沙量的正确计算至关重要,李瑞杰等^[1]从悬沙运动方程的推导出发阐明了近底泥沙通量的物理本质,可表示为

$$F_s = \int_{z_b}^H \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\omega s + \epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) \right] dz = -\omega_b s_b - \left(\epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \right)_b \quad (1)$$

式中: F_s ——近底泥沙通量(也称源汇项或冲淤函数); H ——水面变量;下标 b ——底床变量; ω ——泥沙沉降速度; s ——水体含沙量(泥沙质量浓度); ϵ_z —— z 方向的扩散系数。

国内外目前常用的近底泥沙通量的描述方法有挟沙力方法和切应力方法。

挟沙力方法常用的一般形式为^[2-3]

$$F_s = \alpha \omega (s^* - s) \quad (2)$$

式中: α ——泥沙沉降几率(恢复饱和系数); s^* ——流水挟带的泥沙质量浓度。

挟沙力方法一般认为,当悬沙质量浓度 s 大于水体的挟沙能力 s^* 时,发生淤积;反之,底床冲刷;两者相等时处于微冲微淤的平衡状态。

切应力方法描述近底泥沙通量的一般形式为^[4-7]

$$F_s = \begin{cases} a\omega s \left(\frac{\tau_b}{\tau_d} - 1 \right) & \tau_b \leq \tau_d \\ 0 & \tau_d < \tau_b < \tau_e \\ M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) & \tau_b \geq \tau_e \end{cases} \quad (3)$$

式中: a ——沉积系数; M ——冲刷系数; τ_b, τ_d, τ_e ——水体底部切应力、临界冲刷切应力、临界淤积切应力。

切应力方法虽源于实验,但其物理意义清晰:当 $\tau_b > \tau_e$ 时,底床冲刷;当 $\tau_b < \tau_d$ 时,底床淤积;当 $\tau_d \leq \tau_b \leq \tau_e$ 时,则不冲不淤。

2 近底泥沙通量的研究进展及表达形式

2.1 研究进展

韩其为等^[2]对二维悬沙运动方程的底部边界条件即近底泥沙通量进行了总结,将底边界的不同提法归纳为 6 类并做了分析和对比,认为各种边界条件在推导过程中并未详细分析泥沙交换的机理,而是颇为直观地给出其公式,有的也引进了某个概率,式(2)和式(3)已被广泛引伸和采用,目前最为常用,式(2)与式(3)的差别是式(2)各项参数均能被确定。张修忠等^[8]相应于 Dirichlet、Neumann 和混合边界条件,将近底泥沙通量分为浓度型、梯度型和通量型,认为浓度型边界条件假定近底悬沙浓度等于平衡参考浓度,是一种平衡条件,只能用来处理一些特殊问题,而梯度型边界条件则是混合边界条件的一种特例,梯度型和通量型边界条件的物理意义更加明确,被更普遍地用作泥沙的近底边界条件,而此 2 类描述近底泥沙通量的边界条件就是式(2)和式(3)。陈国祥等^[9]对三维水沙数学模型的研究和应用情况进行了总结和评述,认为底部泥沙边界条件有 5 类,其所总结的边界条件与韩其为的归纳类似,不同之处在于其底部边界布设在床面以上参考高度处,而韩其为归纳的底部边界则布设在近底处。李孟国^[10]对平面二维泥沙运动方程及床面泥沙源汇函数(床面冲淤函数)即近底泥沙通量的若干种表达形式进行了回顾,但对各种形式的内在关系和适用情况并未进行详

细探讨.

近底泥沙通量诸多以经验关系给出的表达形式缺乏普遍性,也有不甚合理之处.从悬沙运动方程的推导可以清楚地看出近底泥沙通量的真正含义,即悬沙运动方程的底部边界条件^[1].床面附近泥沙交换现象极为复杂,泥沙交换机理至今仍不十分清楚,即便近底泥沙通量都为悬沙运动方程的近底边界条件,不同研究者的提法也不尽相同,这在某种程度上使泥沙研究和泥沙工作者的认识产生混乱.

2.2 表达形式

悬沙运动方程的底部边界条件即近底泥沙通量存在多种表达形式,从理论上各种底部边界条件的推导过程并未详细分析泥沙交换机理,而是直观地给出公式,对公式表达的物理意义及其在悬沙运动方程求解过程中所起的作用不甚明确.下面对三维悬沙运动方程和二维悬沙运动方程的底部边界条件即近底泥沙通量在目前文献和书籍中出现的各种表达形式及其物理意义进行总结分析.

三维悬沙运动方程国外研究较多,除常用的式(3)形式,近底泥沙通量的处理常采用切应力方法和类似于挟沙力的平衡参考浓度方法^[11-15]:

$$F_s = \left(-\epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} - \omega s \right) \Big|_{z=z_b} = E - D = \begin{cases} a\omega s_b \left[\left(\frac{u_b}{u_d} \right)^2 - 1 \right] & u_b \leq u_d \\ 0 & u_d < u_b < u_e \\ M \left[\left(\frac{u_b}{u_e} \right)^2 - 1 \right] & u_b \geq u_e \end{cases} \quad (4)$$

$$F_s = \epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b} = E - D \quad (5)$$

$$F_s = \left(-\epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} - \omega s \right) \Big|_{z=z_b} = a\omega (s_{ae} - s_a) \quad (6)$$

$$\epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b} = -a\omega s_{ae} \quad (7)$$

$$\epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b} = -a\omega s_b \quad (8)$$

式中: E ——冲刷率(上扬通量); D ——淤积率(沉降通量); u_b ——水流近底流速; u_e ——泥沙起动流速(临界冲刷速度); u_d ——泥沙悬浮流速(临界淤积速度); s_{ae} ——平衡参考浓度.

目前二维悬沙运动方程底部边界条件(近底泥沙通量)的表达方式国内较多,除式(2)和式(3)外,还有一些不同的表达形式,归类如下^[2,10,16-23]:

$$F_s = a\omega (s_{ae} - s) \quad (9)$$

$$F_s = a\omega (a_1 s^* - fs) \quad (10)$$

$$F_s = a\omega (s^* - fs) \quad (11)$$

$$F_s = \omega (as^* - a's) \quad (12)$$

$$F_s = a\omega (\varphi - s) \quad (13)$$

$$F_s = -\omega s + E \quad (14)$$

$$s \Big|_{z=z_b+a_{ref}} = s_b = \text{常数} = s_b^* \text{ 或 } s \Big|_{z=z_b} = s_b = \text{常数} = s_b^* \quad (15)$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b} = 0 \quad (16)$$

$$-\epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b} - \omega s_b^* = 0 \quad (17)$$

$$\left[-\epsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} - \omega s \right]_{z=z_b} = -a\omega s_b \quad (18)$$

$$F_s = a\omega (\beta s^* - ks_0) \quad \beta = \begin{cases} 1 & u_b \geq u_e \\ 0 & u_b < u_e \end{cases} \quad k = \begin{cases} 1 & u_b \geq u_d \\ 0 & u_b < u_d \end{cases} \quad (19)$$

$$F_s = -A\alpha\omega s \left(1 - \frac{u_b^2}{u_d^2}\right) + BM \left(\frac{u_b^2}{u_e^2} - 1\right) \quad A = \begin{cases} 1 & u_b \leq u_d \\ 0 & u_b > u_d \end{cases} \quad B = \begin{cases} 1 & u_b \geq u_e \\ 0 & u_b < u_e \end{cases} \quad (20)$$

式中： φ ——泥沙冲淤函数； f, a', a_1 ——系数； s_b^* ——近底挟沙力。

3 近底泥沙通量不同提法及其适用性探讨

三维悬沙运动方程中近底泥沙通量的表达形式归类起来虽有式(3)~(8)的6种,但通过分析可知,式(4)其实是式(3)的另一种表达,只是将底部切应力及临界切应力改为对应的流速而已。式(3)的表达形式是目前三维悬沙运动方程中最常用的底边界处理方法。

悬沙运动方程推导^[1] F_s 完整的表达形式为 $F_s = -\left(\omega s + \varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z}\right) \Big|_{z=z_b}$ 。若忽略沉积项 $\omega s \Big|_b$, F_s 应该表示为 $F_s = -\varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b}$ 。这样一来,当 $\tau_b > \tau_e$ 发生冲刷时,由式(4)可得 $F_s = \left(-\varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z}\right) \Big|_{z=z_b} = -E, E = M\left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1\right) > 0, F_s = -\varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b} = -E < 0$,悬沙浓度表现为减小的趋势,底床发生冲刷,泥沙浓度应该增加,而式(4)表达形式正好相反。当 $\tau_b < \tau_d$ 时情况也一样。

这种方法处理黏性泥沙时 $D = -\omega s P, P = \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}\right)$,即 $D = \omega s \left(\frac{\tau_b}{\tau_d} - 1\right) < 0$,处理非黏性泥沙时 $D = \omega s > 0$ 。因此式(4)作为边界条件用于冲淤计算时,可能会得到与实际相反的结果。

式(7)表达形式做一些变换即 $F_s = -\left(\omega s + \varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z}\right) \Big|_{z=z_b} = \alpha\omega s_{ae} - (\omega s)_b$ 。若 $s_b = as_a$,则式(7)即为式(6),说明式(7)其实就是式(6)表达形式的一种特例情况。

式(8)表达形式做一些变换即 $F_s = \left(-\varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} - \omega s\right) \Big|_{z=z_b} = \alpha\omega s_b - \omega s_b$ 。当 $\tau_b < \tau_e$ 时, $\alpha = \frac{\tau_b}{\tau_e}, F_s = \omega s_b \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1\right) = D < 0$ 。当 $\tau_b > \tau_e$ 时, $F_s = \alpha\omega s_b - \omega s_b = (\alpha - 1)\omega s_b = E$ 。当 $\alpha < 1$ 时, $F_s = (\alpha - 1)\omega s = E < 0$ 。当 $\alpha = 1$ 时, $F_s = 0$,表示底床处于平衡状态,其物理意义不符合实际情况。说明式(8)只适用于淤积计算,不具有一般性。

综上所述,式(3)和式(6)适用于三维悬沙运动方程的近底泥沙通量的一般处理,其他表达形式虽然可以用来处理一些特殊情况,但不具备一般性。

式(2)、式(9)~(14)描述的一般形式均为 $F_s = a_1\omega s^* - a_2\omega s$ (a_1, a_2 为系数),从挟沙力方法的简单推导可以看出,虽然这些公式的表达形式不一样,但物理本质都是一样的,只是处理挟沙力和含沙量垂向分布不均匀系数的方法有所不同。式(2)已被广泛接受和采用,其他形式并没有更广泛的验证,只是针对某些具体问题的变异形式而已,相应的文献中也没有给出参数的合理解释和确定方法,方便起见,式(9)~(14)的描述建议采用挟沙力方法的一般描述,即式(2)。

式(15)描述在清水条件下是一种纯冲刷的情况,浑水条件下表示底部含沙量 s_b 总是等于底部挟沙力 s_b^* ,或者说不论是否冲淤,底部含沙量立刻恢复到饱和,实际上是一种平衡条件,将其作为一般性条件是不符合实际情况的。式(16)描述底部没有紊动作用能使泥沙上浮,在摩阻流速 u_* 非常小的情况下有其合理性,但很局限。在一些实际问题中,底床的边界条件可以比较简单,例如在流速很小的水库与沉淀池中的淤积过程,在河床泥沙可以全部扬动情况下的清水冲刷等一些问题可以采用 $F_s = s \Big|_{z=z_b + a_{ref}} = s_b = \text{常数} = s_b^*$ (清水冲刷),以及 $F_s = \varepsilon \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=z_b} = \alpha$ (纯淤积)的底边界条件处理一些特殊问题,如水库不平衡输沙过程、沉淀池淤积计算等,但不具备普遍性。随着计算水平的提高,这种简化处理基本已不再被采用。

式(17)表示底部紊动扩散项始终等于平衡条件下的扩散项(下沉项),虽适用于淤积和冲刷情况,但实际上是式(2) $a = 1$ 的特例。式(18)描述 $-\alpha\omega s_b$ 为底部紊动扩散悬浮项与重力作用下沉项之差,即净淤积项,显然此边界条件只能用于淤积,忽略了冲刷。式(19)和式(20)对处理底边界条件表达形式的一般形式与式(3)相同,只是冲淤的判别参数有的采用底部切应力 τ_b 、临界淤积切应力 τ_d 和临界冲刷切应力 τ_e 的相互关系,有的则采用其对应的流速。这类表达形式和 $F_s = \alpha\omega(s^* - s)$ 比其他几类表达形式有所改进,物理意义更加

明确,既适用于冲刷情况,又适用于淤积情况。

4 结 论

泥沙运动研究已经取得了很大进展,但泥沙运动理论流派繁多,这给泥沙研究工作者带来诸多不便。笔者通过归纳总结悬沙运动方程底边界条件即近底泥沙通量的各种表达式,并对它们的适用性和合理性进行讨论,发现以挟沙力、切应力、参考浓度或临界速度方法处理近底泥沙通量,表达形式虽然多样,但物理本质不变,只是为了处理一些具体问题而做的一些简化或是修正,式(2)和式(3)作为挟沙力方法和切应力方法的经典形式用于描述近底泥沙通量更具一般性。

近底泥沙通量研究主要关注水体含沙量、挟沙力与切应力的关系,临界含沙量和临界切应力对底沙和悬沙交换起决定性作用,是近底泥沙通量研究的主要问题之一。水沙交界面冲刷和沉积是否同步发生,底沙与悬沙以何种方式进行交换,式(2)和式(3)有不同的物理意义,式(3)说明近底泥沙冲刷和沉积不会同时发生,而式(2)表达的是净通量,适用于冲刷和沉积可以同时发生的情况。

参考文献:

- [1] 李瑞杰,罗锋,朱文谨.悬沙运动方程及其近底泥沙通量[J].中国科学 E 辑:技术科学,2008,38(11):1995-2000.(LI Rui-jie, LUO Feng, ZHU Wen-jin. The suspended sediment transport equation and its near-bed sediment flux[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 38(11):1995-2000. (in Chinese))
- [2] 韩其为,何明民.论非均匀悬移质二维不平衡输沙方程及其边界条件[J].水利学报,1997,28(1):1-10.(HAN Qi-wei, HE Ming-min. 2D nonequilibrium transportation equation of nonuniform suspended load and its boundary condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(1):1-10. (in Chinese))
- [3] 窦国仁,董凤舞,窦希萍,等.河口海岸泥沙数学模型研究[J].中国科学 A 辑:数学,1995,25(9):995-1001.(DOU Guo-ren, DONG Feng-wu, DOU Xi-ping, et al. Mathematical modeling of sediment transport in estuaries and coastal regions[J]. Science in China Series A: Mathematics, 1995, 25(9):995-1001. (in Chinese))
- [4] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soil[J]. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 1965, 91(2):105-138.
- [5] ARIATHURAI R, KRONE R B. Finite element model for cohesive sediment transport[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1976, 102(3):323-338.
- [6] 罗锋,李瑞杰,朱文谨.银洲湖强潮河段悬沙输运模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):129-133.(LUO Feng, LI Rui-jie, ZHU Wen-jin. Suspended sediment transport model for strong tidal reach in Yinzhouhu waters[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(1):129-133. (in Chinese))
- [7] 周杰,周锋,江兴南,等.太湖风生环流及黏性泥沙输运的三维数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(5):489-494.(ZHOU Jie, ZHOU Feng, JIANG Xing-nan, et al. 3D numerical simulation of wind-driven flows and cohesive sediment transport in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(5):489-494. (in Chinese))
- [8] 张修忠,王光谦.浅水流动及输运三维数学模型研究进展[J].水利学报,2007,38(7):1-7.(ZHANG Xiu-zhong, WANG Guang-qian. Recent development in 3-D mathematical modeling of shallow water flow and sediment transportation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7):1-7. (in Chinese))
- [9] 陈国祥,陈界仁.三维泥沙数学模型的研究进展[J].水利水电科技进展,1998,18(1):13-19.(CHEN Guo-xiang, CHEN Jie-ren. Review of development of 3D sediment mathematical model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1998, 18(1):13-19. (in Chinese))
- [10] 李孟国.海岸河口泥沙数学模型研究进展[J].海洋工程,2006,24(1):139-154.(LI Meng-guo. A review on mathematical models of sediment in coastal and estuarine waters[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(1):139-154. (in Chinese))
- [11] 江文胜,孙文心.渤海悬浮颗粒物的三维输运模式[J].海洋与湖沼,2000,31(6):682-688.(JIANG Wen-sheng, SUN Wen-xin. 3D suspended particulate matter transportation model in the Bohai Sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2000, 31(6):682-688. (in Chinese))
- [12] BLUMBERG A F. A primer for ECOMSED user manual: version 1.3[R]. New Jersey: HydroQual Inc, Mahwah, 2002:33-48.
- [13] 李瑞杰,严以新,宋志尧.太平水道悬移质输运数学模型[J].泥沙研究,2003(4):46-51.(LI Rui-jie, YAN Yi-xin, SONG Zhi-yao. Calculation of suspended sediment transport in Taiping waterway[J]. Journal of Sediment Research, 2003(4):46-51. (in Chinese))
- [14] 周发毅,陈璧宏.取水口附近水流泥沙运动的三维数值模拟[J].水利学报,1997,28(12):30-37.(ZHOU Fa-yi, CHEN Bi-hong. 3D simulation of the flow and sediment transport near a water intake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(12):30-37. (in Chinese))

Chinese))

- [15] 李芳君, 陈士荫. 疏浚引起泥沙扩散的三维数值模拟[J]. 泥沙研究, 1994(4): 68-75. (LI Fang-jun, SHEN Shi-yin. A three-dimensional numerical model of dredged sediment transport[J]. Journal of Sediment Research, 1994(4): 68-75. (in Chinese))
- [16] KHOSROWNEJAD A, NEISHABORI S A A. Numerical simulation of sediment release from reservoirs[J]. International Journal of Sediment Research, 2006, 21(1): 74-88.
- [17] ZHENG Lian-yuan, CHEN Chang-sheng, ALBER M, et al. A modeling study of the Satilla River estuary, Georgia II : suspended sediment [J]. Estuaries, 2003, 26(3): 670-679.
- [18] 赵明登, 李义天. 二维泥沙数学模型及工程应用问题探讨[J]. 泥沙研究, 2002(1): 66-70. (ZHAO Ming-deng, LI Yi-tian. Study on two-dimensional sediment mathematical models and problems in application[J]. Journal of Sediment Research, 2002(1): 66-70. (in Chinese))
- [19] 白玉川, 许栋, 王玉琦, 等. 二维溃坝波遇障碍物的水流泥沙数值模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 538-543. (BAI Yu-chuan, XU Dong, WANG Yu-qi, et al. 2-D numerical simulation for water flow and sediment transport of dam-break wave[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(5): 538-543. (in Chinese))
- [20] 张启舜. 明渠水流泥沙扩散过程的研究及其应用[J]. 泥沙研究, 1980(12): 37-52. (ZHANG Qi-shun. Diffusion process of sediment in open channel and its application[J]. Journal of Sediment Research, 1980(12): 37-52. (in Chinese))
- [21] 辛文杰. 潮流、波浪综合作用下河口二维悬沙数学模型[J]. 海洋工程, 1999, 15(1): 30-47. (XIN Wen-jie. Numerical model of 2D estuarial suspended sediment motion under the interaction of tidal flow and waves[J]. The Ocean Engineering, 1999, 15(1): 30-47. (in Chinese))
- [22] DHI. User guide and reference manual of Mike21 : sediment processes, mud transport module, release2.6[R]. Copenhagen : DHI, 1996 : 30-39.
- [23] 辛小康, 叶闽, 王凤. 河道疏浚工程悬浮物影响预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(1): 8-10. (XIN Xiao-kang, YE Min, WANG Feng. Prediction model for impact of river dredging projects on suspended substance[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2011, 31(1): 8-10. (in Chinese))