

## 二、粘性沙河床演变模型(SEDTRANS05)

### 1、前言

三峡库区的浮泥运动仅发生在水沙界面附近有限区域，大部分水体的含沙量很低（除汛期外）。浮泥运动沿流向受水流剪切力作用，在横断面上受重力驱动，垂向上有再悬浮和固结过程。河床的浮泥浓度分布如图 4。目前，可用于实际天然河道计算的模型分为：（1）单向耦合模型；（2）Euler-Euler 双流体两相流模型。其他类型模型，如 DEM 模型、颗粒流模型等仅用于基础理论研究（研究单个或群体颗粒的力学及运动特性），由于计算量大，还不能用于天然河道模拟。

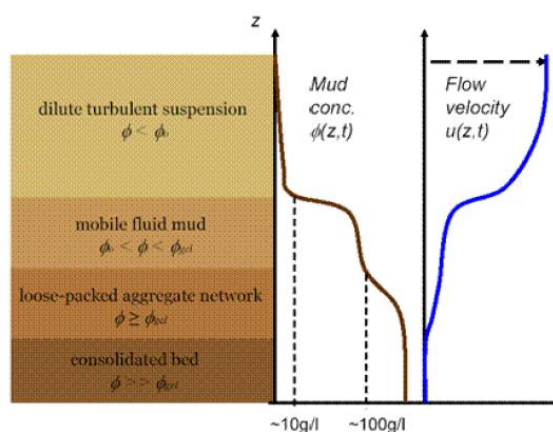


图 4 浮泥运动及分布（Winterwerp&Van Kesteren,2004）

本研究首先考虑单向耦合的粘性沙模型。

粘性沙模型的理论基础目前并不成熟，因此，粘性沙模型的应用较非粘性沙模型则少很多。本研究考虑应用 SEDTRANS05 模型(Urs Neumeier et al., 2008)与 SELFE 模型耦合计算，是一个垂向 1D 的泥沙模型，包含非粘性沙和粘性沙 2 个模块。SEDTRANS05 模型与 3D 水动力学模型 SHYFEM 耦合模拟了 Venice 港湾的波浪和潮汐流动与粘性沙输移(Umgiesser et al., 2006)。

SEDTRANS05 模型已经有近 30 年的研发历史，粘性沙模型主要功能：

- （1）反映粘性沙沿垂向的特性变化；
- （2）悬移质泥沙浓度分组计算；
- （3）考虑细颗粒泥沙絮凝沉降；
- （4）可模拟多次冲淤过程。

模拟限制：

- (1) 不能模拟非粘性沙和粘性沙混合物；(理论不成熟)
- (2) 不能模拟由于重力驱动引起的浮泥的侧向运动；(三峡库区深槽淤积主要是重力驱动)
- (3) 不能模拟波浪作用下的浮泥再悬浮过程；
- (4) 不能模拟水沙界面处的不稳定现象 (Helmholtz 不稳定性)；(两相流模型)

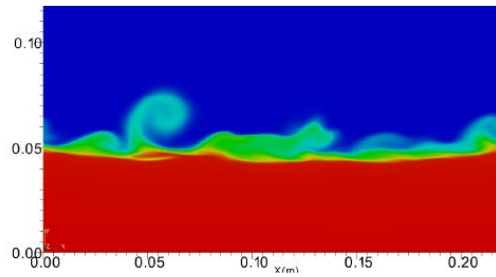


图 5 两相流模拟的水沙界面不稳定现象(Hsu T.J., 2008)

- (5) 不能模拟水流对泥沙固结过程的影响。
- (6) 絮凝沉降公式适用范围：盐度 10-15PSU，因此，不能用于淡水或低盐度水体。(絮凝沉降速率公式要结合三峡水库研究成果)
- (7) 没有考虑底栖生物的扰动(Bioconsolidation or Bioturbation)；
- (8) 不能正确预测大计算时间步长 (TIMEDR>5min) 的冲刷率。

## 2、非粘性沙模块

- (1) 水的密度与粘滞系数

密度  $\rho$  与粘滞系数  $\eta$  与温度和盐度有关。

$$\begin{aligned} \eta = & 1.802863 \times 10^{-3} - 6.1086 \times 10^{-5}T + 1.31419 \times 10^{-6}T^2 \\ & - 1.35576 \times 10^{-8}T^3 + 2.15123 \times 10^{-6}S \\ & + 3.59406 \times 10^{-11}S^2 \end{aligned} \quad (1)$$

- (2) 悬移质泥沙沉速

Soulsby(1997)公式

- (3) 床沙再悬浮的临界剪切流速

采用 Van Rijn(1993)方法：

$$\begin{aligned} 1 < D_* \leq 10 : \frac{u_{*crs}}{W_s} &= \frac{4}{D_*} \\ D_* > 10 : \frac{u_{*crs}}{W_s} &= 0.4 \end{aligned}$$

(4) 摩阻系数与粗糙高度

非粘性沙的摩阻系数和粗糙高度  $z_0$  根据沙粒粒径和床面地形计算。

粘性沙的摩阻系数和粗糙高度  $z_0$  设置为常数值 (Soulsby, 1983)。CCONST  
粘性沙模型不计算床面地形变化。

(5) 泥沙输移计算公式

表 1 非粘性沙推移质输沙计算公式

Method	Transport mode	Grain-size (mm)
Engelund–Hansen (1967)	Total load	$> 0.15^a$
Einstein–Brown (1950)	Bedload	$0.3\text{--}28.6^b$
Bagnold (1963)	Total load	$0.18\text{--}0.45^b$
Yalin (1963)	Bedload	$> 0.2^a$
Van Rijn (1993)	Bedload	$0.05\text{--}29.1^a$

3、粘性沙模块

粘性沙算法计算一个包含冲刷-淤积-固结的循环过程。涉及到 2 组变量：床沙和悬移质泥沙浓度。设置初始值，经 SEDTRANS05 循环计算后，输出最终值，冲刷-淤积-固结计算过程中泥沙质量守恒。

粘性沙计算中涉及的经验公式均没有广泛接受的计算式，需要根据实测资料率定验证。

推荐的最优计算时间步长为 5min，增加时间步长会降低计算精度，特别是絮凝过程明显或临界剪切应力随水深变化梯度较大的情况。

每一步循环计算过程，计算步骤如下：

- (1) 计算有效床面剪切应力  $\tau_0$ （考虑高浓度泥沙引起的剪切力减小和泥沙输移引起的拖拽力）；
- (2) 计算河床泥沙的冲刷侵蚀通量（冲刷的第 1 部分）；
- (3) 计算淤积通量（考虑絮凝作用）、每组泥沙的淤积速率、悬移质泥沙输移减小的淤积泥沙量、最新淤积到床面的泥沙量增加；
- (4) 冲刷泥沙质量加到悬移质输沙部分（冲刷的第 2 部分）；
- (5) 床沙层的固结计算。

**输入：**床沙特性、泥沙级配、有效床面剪切应力  $\tau_0$ 、淤泥活动层占床沙的比例、计算时间步长  $\Delta t$ 。

**输出：**最终的床沙特性、泥沙级配、悬移质泥沙浓度、平均冲刷-淤积速率、

床面高度变化、河床低密度物体（如水藻）运动引起的剪切力  $\tau_{solid}$  和有效剪切力（考虑减阻作用的修正）。

### 3.1 床沙特性

SEDTRANS05 采用干密度  $\rho_{dry}$  表述床沙，一般测量得到的湿密度  $\rho_{wet}$  可采用下式转换为干密度：

$$\rho_{dry} = (\rho_{wet} - \rho) \frac{\rho_{clay}}{\rho_{clay} - \rho}$$

式中， $\rho_{clay}$  为床沙的矿物粘土密度。

床沙特性沿深度的变化采用  $\rho_{dry}$  和  $\tau_{ce}$  剖面描述。信息存储在一个 2D 矩阵中，包含深度、 $\rho_{dry}$  和  $\tau_{ce}$ 。床沙层分为若干分层（**建议<50 层**），各层特性在  $\rho_{dry}$  和  $\tau_{ce}$  之间线性变化，矩阵（3×分层数）中第一行为表层，假设床沙特性在最低层以下保持不变（如图 6）。如果某一层完全冲刷，该层将从矩阵中删除，剩余各层向上移动。如果某一层仅部分冲刷，该层表层的  $\rho_{dry}$  和  $\tau_{ce}$  按上一层的值线性变化。如果是淤积的情况，新的一层将插入到矩阵的第一行，但最顶一层的泥沙特性接近于新淤积的泥沙，仅增加最顶一层的厚度（图 6C）。参考水深以河床表面为准，每一轮冲刷计算完成后，所有的床沙层深度都相应地更新。

（注意与非粘性沙分层计算算法的不同！）

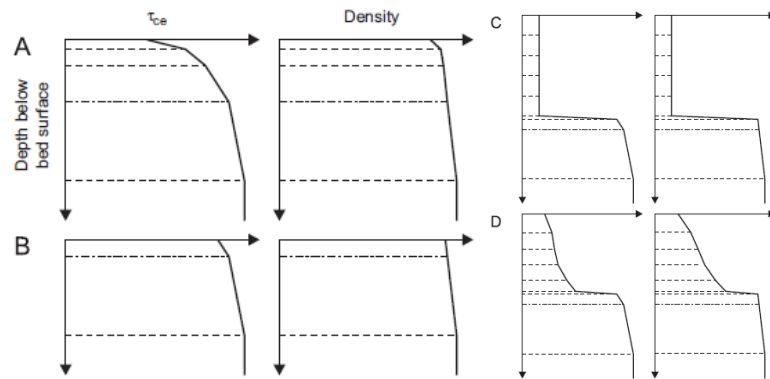


图 6 一个循环的粘性床沙特性变化（A 初始密实床沙；B 冲刷后床沙；C 新的泥沙淤积后的床沙；D 固结后的床沙）

### 3.2 悬移质泥沙

悬移质泥沙分组计算，需要计算各组悬移质泥沙的沉速  $w_{si}$  和浓度  $C_i$ 。进行

3D 模拟时，建议分组数为 5 组。悬移质泥沙沉速考虑絮凝修正。

每一部冲刷计算后床沙成为悬移质泥沙，颗粒沉速  $w_s$  服从对数正态分布(图 7A)。分布函数的中值与冲刷条件有关。不同条件的连续冲刷将产生复杂的沉速分布形式(图 7B)。每一组泥沙的淤积速率根据冲刷量单独计算，最粗的泥沙颗粒淤积最快(图 7C)。

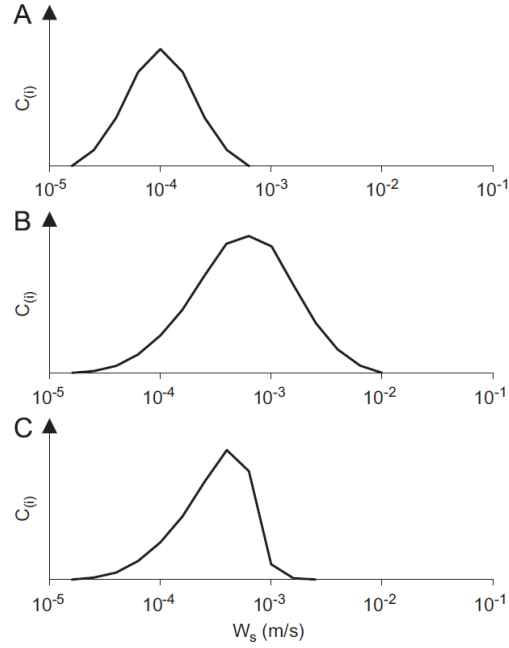


图 7 悬移质泥沙的沉速分布形式 (A 悬移质泥沙对数正态分布的沉速; B 经过连续冲刷过程后的沉速分布; C 较粗颗粒沉降后的沉速分布)

### 3.3 床面剪切应力

对于粘性沙(细颗粒泥沙)河床，床面剪切力  $\tau_0$  需要考虑可能发生的 2 种物理现象进行修正：(1) 高浓度浮泥引起的减阻现象；(2) 其他物体(如水藻)引起的剪切力  $\tau_{solid}$ 。

首先，考虑减阻现象对水动力模型计算的表面摩擦力  $\tau_0$  作修正。然后，采用修正的  $\tau_0$  计算  $\tau_{solid}$ 。最终床面剪切应力为  $\tau_0 + \tau_{solid}$ 。

高浓度的混合水沙流体为非牛顿流体，将产生减阻现象，SEDTRANS05 模型引入一个修正因子，该因子通过实测数据的幂函数拟合获得(Li and Gust, 2000):

$$\tau_{0 \text{ corrected}} = \exp(C_{dr} SSC) \tau_{0 \text{ uncorrected}}$$

式中， $C_{dr}$  为常数 ( $-0.0893 \text{ m}^3/\text{kg}$ )。

实验数据为单向流的水槽实验数据。上式计算的 $\tau_0$ 在  $SSC=7.8\text{kg/m}^3$  时将减小一半。（上式可参考王兆印等的研究？）

SEDTRANS05 模型中的 $\tau_{mudflow}$  计算是基于 Venice Lagoon 海床覆盖水藻的水槽实验数据，用到了 2 个临界剪切力参数（水藻起动的 $\tau_{mUlva}$  和水藻完全悬浮的 $\tau_{resUlva}$ ）。上述参数值存储在 CCONST。（对于三峡水库来说可忽略该剪切力）

### 3.4 床面冲刷

如果床面剪切力 $\tau_0$ 超过床面冲刷的临界剪切力 $\tau_{ce0}$ ，冲刷将会发生。

冲刷速率 $r_e$ 根据变量 $\tau_{ce}$  计算（Van Rijn, 1993）：

$$r_e = \frac{\partial m}{\partial t} = E_0 \exp[P_e(\tau_0 - \tau_{ce(z)})^{0.5}]$$

式中， $E_0$ 为限制冲刷量的经验系数， $P_e$ 为冲刷的比例系数， $\tau_{ce(z)}$ 为沿冲刷深度方向变化的冲刷临界剪切力。

每一个计算步 $\Delta t$ 内，首先根据河床表层的 $\tau_{ce}$  计算 $r_e$ ，然后计算冲刷深度 $\Delta z$ （考虑 $\rho_{dry}$ 在垂向上的线性变化）。如果 $\Delta z$ 大于第一层泥沙层厚度，则计算冲刷第一层的历时 $t1$ 。在剩下的时间（ $\Delta t - t1$ ）对下一泥沙层重复上述计算。如果 $\tau_{ce(z)} \leq \tau_0$ ，侵蚀过程在 $\tau_{ce(z)} = \tau_0$ 的分层处停止。

经验系数 $E_0$ 和 $P_e$ 依赖于局部条件。 $\tau_0$ 的计算值可能悬殊几个量级，直接影响 $P_e$ 取值。因此需要调整冲刷计算中的经验系数。

	$P_e$	$E_0$
Amos et al. (1992) <sup>a</sup>	1.62	$51 \times 10^{-6}$
Sea Carousel Venice 99 <sup>b</sup>	5.88	$19.5 \times 10^{-6}$
Miniflume Venice 99 <sup>b</sup>	4.68	$6.7 \times 10^{-6}$

### 3.5 冲刷泥沙的沉速计算

沉速 $w_s$ 符合对数正态分布。分布函数的均值根据冲刷情况计算，均方差使用 $\log_{10}(w_s)$ 计算。

床沙中粒径最细的颗粒悬浮。沉速分布由参数 WSCLAY 定义， $w_s$  分布向增大方向偏移是由于：（1）水流的升力；（2）冲刷泥沙粒径增大（由于逐渐增加

的密实过程)；(3) 湍流破碎悬浮絮凝团。

最大沉速  $W_5$  分组可以悬浮的值定义为  $W_{lift}$ ：

$$W_{lift} = (\tau_0 / (0.64\rho_{water}))^{0.5}$$

最大沉速  $W_5$  分组足以抵抗湍流的破碎作用时定义为  $W_{disruption}$ ：

$$W_{disruption} = D_t \tau_{ce} / \tau_0^{0.5}$$

式中， $D_t$  为经验系数 (0.004)。

最大沉速  $W_5$  取  $W_{lift}$  和  $W_{disruption}$  的最小值，放在分布函数粗粒径一边的位置，如果计算的最大沉速  $W_5$  小于粗粒径 (右边) 的沉速值，则原沉速保持不变。

### 3.6 絮凝沉速-淤积

#### (1) 絮凝沉速计算

使用 Whitehouse et al.(2000)的絮凝沉速  $W_{sFloc}$  公式， $W_{sFloc}$  是悬移质泥沙浓度  $C$  的函数。首先，计算有效絮凝密度  $\rho_{floc}$ 、水下絮凝团体积浓度  $C_f$ 、长度尺寸  $L$ 、有效直径  $d_e$  和无量纲絮凝团直径  $D^*$ ，然后中值絮凝体沉速  $W_{sFloc}$  按下式计算：

$$\rho_{floc} = \rho + C_{in}(\rho_{clay} - \rho)$$

$$C_f = \frac{(\rho_{clay} - \rho)C}{(\rho_{floc} - \rho)}$$

$$d_e = LC^{F_m/2}$$

$$L = \left[ \frac{19.8\rho v \rho_{clay}^{F_m} F_k}{g(\rho_{floc} - \rho)} \right]^{1/2}$$

$$D^* = d_e \left[ \frac{g(\rho_{floc} - \rho)}{\rho v^2} \right]^{1/3}$$

$$W_{sFloc} = v/d_e [(10.36^2 + 1.049(1 - C_f)^{4.7} D_*^3)^{0.5} - 10.36]$$

式中， $C_{in}$  为絮凝体内部体积浓度 (0.025-0.04，默认值 0.03)。 $F_k$  和  $F_m$  为絮凝计算经验系数，默认值 (0.001 和 1.0)，与泥沙特性有关。

(1) 低于浓度  $C_{LM1}$  (0.1kg/m<sup>3</sup>) 不做絮凝计算

(2)  $W_{sFloc} = F_k C^{F_m}$  (0.1~2.0 kg/m<sup>3</sup>) (Van Rijn, 1993)



(3) Whitehouse et al.(2000)公式 (2.0~50 kg/m<sup>3</sup>)

(4)  $W_{sFloc} = 10^{-5} m/s$  (>50 kg/m<sup>3</sup>)

絮凝体沉速  $W_s$  是在一定范围内分布的数值，根据每组泥沙颗粒沉速  $W_{s(i)}$  计算得到新的  $W_{s(i)Floc}$ ：

$$W_{s(i)Floc} = W_{sFloc} \sqrt{W_{s(i)} / W_{sMean}}$$

式中， $W_{sMean}$  是原始沉速分布的对数平均值，采用下式计算：

$$\log(W_{sMean}) = \frac{\sum C_{(i)} \log(W_{s(i)})}{SSC}$$

式中， $C_{(i)}$  是各分组悬移质泥沙浓度， $SSC$  是总浓度。

(2) 淤积计算

当床面剪切力  $\tau_0$  小于淤积临界剪切力  $\tau_{cd}$  时将发生淤积， $\tau_{cd}$  采用下式计算 (Mehta and Lott, 1987)：

$$\tau_{cd} = k_{cd} W_s^{m_{cd}}$$

式中， $k_{cd}$  和  $m_{cd}$  是经验系数。

$k_{cd}$ ：1900~9000， $m_{cd}$ ：0.9~1.4。默认值 1.03, 2800

淤积计算分两部分：(1) 淤积速率  $r_d$ ；(2) 经过时间间隔  $t$  以后仍然悬浮的泥沙浓度  $C_t$ 。

淤积量等于对淤积速率作时间积分。

$$r_d = \partial m / \partial t = C W_s (1 - \tau_0 / \tau_{cd}) (1 - P_s)$$

$$C_t = C_0 \exp\left(-W_s (1 - \tau_0 / \tau_{cd}) (1 - P_s) \frac{t}{h}\right)$$

式中， $P_s$  为处于淤积状态中泥沙再悬浮的概率系数 (0~0.2，默认 0)。

悬移质泥沙分组淤积量单独计算。当含沙量低于 0.0001kg/m<sup>3</sup> 时，所有分组泥沙均为淤积泥沙。

### 3.7 新淤积泥沙特性

SEDTRANS05 模型中假设新淤积的泥沙均为浮泥，指定为恒定密度为 50kg/m<sup>3</sup>(RHOMUD)。冲刷临界剪切力  $\tau_{ce}$  按以下原则计算：(1)  $\tau_{ce} > 1.1\tau_0$  避免再



悬浮的即刻发生；（2） $\tau_{ce}$  的最小值为  $\tau_{ce} = T_a \rho_{dry}^{T_b} [1 + T_c (1 - \exp(T_d m_0))]$ ；（3）新淤积层的  $\tau_{ce}$  不能大于下一层的  $\tau_{ce}$ 。

### 3.8 固结过程（Consolidation）

新淤积的粘性沙由于自重会发生固结过程，增加河床的稳定性（抗冲刷），需要在泥沙输移中考虑。自重固结过程由泥沙渗透性决定，限制孔隙水的逃逸。自重固结过程由很多参数决定，如：矿物成分、孔隙水、泥沙特性等。很多固结过程模型比较复杂，计算量大，难以实际应用。SEDTRANS05 模型采用一个简化模型，计算原理如下：（1）控制固结过程的参数是上覆淤泥的浮力重量和掩埋深度；（2）无限长掩埋时间后会形成稳定的密度值；（3） $\tau_{ce(z)}$  与  $\rho_{dry}$  和上覆掩埋的泥沙质量相关。

淤泥密度  $\rho$  由经验公式计算（SEDTRANS05 中未激活）：

$$\rho_1 = f(\rho_0, m_0, z, \Delta t)$$

式中， $\rho_0$  为初始密度， $\rho_1$  为经历  $\Delta t$  后的密度， $m_0$  为上覆淤泥质量。

河床表层泥沙的冲刷临界剪切力  $\tau_{ce}$  由下式计算(Van Rijn, 1993)：

$$\tau_{ce} = a \rho_{dry}^b$$

但河床以下泥沙随着埋深增加， $\tau_{ce}$  迅速增大，而  $\rho_{dry}$  增加缓慢。因此，采用考虑  $m_0$  沿埋深变化的  $\tau_{ce}$  计算式：

$$\tau_{ce} = T_a \rho_{dry}^{T_b} [1 + T_c (1 - \exp(T_d m_0))]$$

式中， $T_a, T_b, T_c$  和  $T_d$  均为经验系数(6.0e-10, 3, 3.47, -1.915)。

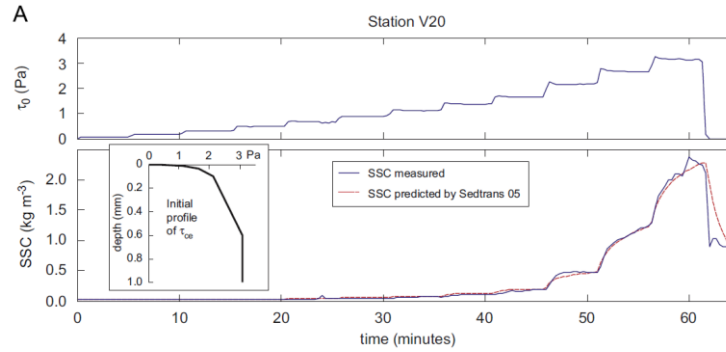
如果考虑固结过程后计算的  $\tau_{ce}$  小于之前的计算值，则  $\tau_{ce}$  值不变。模型中假设  $\rho_{dry}$  和  $\tau_{ce}$  在各分层中线性变化。

## 4 模型验证

粘性沙模型的验证项目。SEDTRANS05 模型计算结果与环形水槽实验数据对比。

SED1D 调用 COHESIVE 模块。

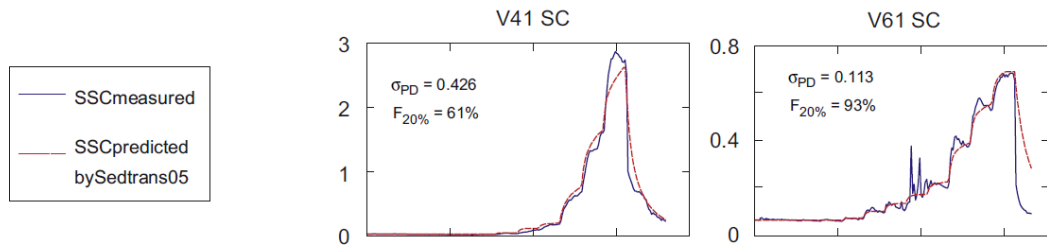
## （1）悬移质泥沙浓度 SSC 和床面剪切力



计算值  $SSC_{pred}$ ，实测值  $SSC_{meas}$

相对误差(Proportional difference):  $PD = SSC_{pred} / SSC_{meas} - 1$

$PD$  的标准差:  $\sigma_{PD}$



率定参数  $E_0$  和  $P_0$

## （2）沉速、冲刷量和床沙特性

缺少实验数据。

## 5 评价

由以上模型原理的总结可见，SEDTRANS05 模型上存在的不足是：

- （1）絮凝沉降、冲淤量计算等需要改进；
- （2）固结过程模拟需要深化；
- （3）需要考虑坡度的淤泥流变运动；
- （4）生物活动、固结历史、泥沙矿物成分等对河床冲刷的影响；
- （5）需要率定冲刷过程与悬移质泥沙之间的关系。

## 6 改进

参考 SEDFLUX 模型的原理。

### 6.1 固结过程模拟

由于覆盖于淤积体上层的泥沙荷载，下层的淤积体将发生压实，淤积体将逐

渐压实到最小孔隙度为止。压实过程中的泥沙孔隙度变化由下式计算：

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = -c(\phi - \phi_0)$$

式中， $\phi$  为孔隙度， $\sigma$  为载荷， $c$  为经验常数， $\phi_0$  为压实极限的最小孔隙度（与泥沙骨料的材质和力学特性有关）。

## 6.2 重力驱动使淤泥在横向上运动

分两部分计算：（1）判断淤泥的土体崩塌；（2）淤泥运动。

### （1）土体崩塌判断

淤积体前段坡度大于最大水下休止角时将发生土体崩塌，之后形成类似泥石流或浮泥的泥沙输移。淤积体的崩塌形状和崩塌位置采用土力学中的非圆弧滑动的条分法（Jabu 法）计算。

可能发生崩塌平面的稳定性可通过以下安全性因子表征：

$$F_{total} = \frac{\sum_{i=0}^n [b_i(c_i + (\frac{W_i}{b_i} - p_{ec}) \tan \phi_i) \frac{\sec \alpha_i}{1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi_i}{F_{total}}}]}{\sum_{i=0}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (17)$$

式中， $b$  为条带宽度， $c$  为泥沙的粘滞性系数， $W$  为垂向线性变化的泥沙重量， $p_{ec}$  为超孔隙水压， $\phi$  为泥沙颗粒水下休止角， $\alpha$  为崩塌土体的坡度， $F_{total}$  为整体崩塌破坏的安全因子。

超孔隙水压按照 Gibson 近似假设计算：

$$p_{ec} = \frac{\gamma' z_i}{a_i} \quad (18)$$

式中， $\gamma'$  为泥沙的水下容重， $z$  为崩塌点至河床的高度， $a$  由下式计算：

$$a = 6.4(1 - \frac{T}{16})^{17} + 1 \quad (19)$$

上式中的  $T$  由下式计算：

$$T = \frac{m^2 t}{c_v} \quad (20)$$

式中， $m$  为泥沙沉积率， $t$  为淤积历时， $c_v$  为泥沙的固结系数。

如果安全系数  $F_{total}$  小于设定的阈值（模型中取 1），淤积体前段将崩塌，形

成泥石流或浮泥运动，否则将视为稳定。式(17)两边均有  $F_{total}$  因子，需要迭代求解。

## (2) 淤泥运动(Lagrangian method)

A、微分方程模型。

Gary Park 的自加速理论模型（浊度流）和宾汉流体模型（泥石流）。均为 1D 模型。计算量增大。

**BANG1D for turbidity modeling and BING1D for Bingham debris flow modeling**

三峡水库底层浮泥应该属于重力驱动作用下的宾汉流体（debris flow），但颗粒均匀的细颗粒浮泥。

B、经验公式(类似于 Jabu 法)

假冬冬（2011）应用非粘性沙模型模拟三峡库区近坝区的河床淤积形态（深槽淤平现象）。计算网格：198×97×18，庙河入口流量边界条件（2003.3~2006.10）

典型流量（ $Q=6300\text{m}^3/\text{s}$ ，坝前水位 139m）

浮泥层坡度  $J_c$ ，当  $J_c > \frac{\tau_B}{\gamma_s} \Delta z$  时，浮泥在重力驱动下沿着坡度方向运动。若

泥沙淤积处的河床坡度大于  $J_c$ ，其上的浮泥向低处运动。淤积物向低处运动主要源于自重，而不是水流剪切力。

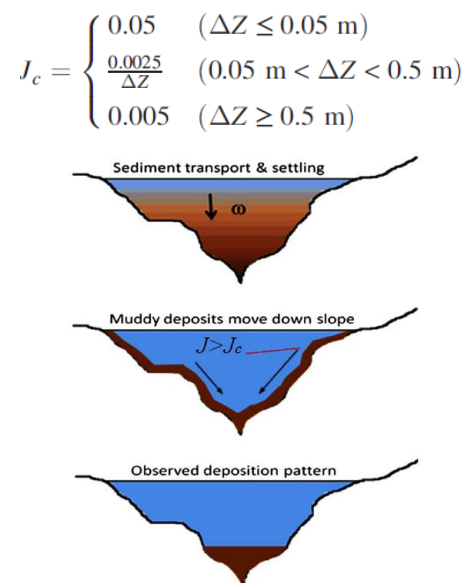


图 5 三峡水库河床淤积过程（Jia, 2013）

淤积泥沙的坡度直达到达到临界坡度才停止运动，采用下式(Jia et al., 2013):

$$\begin{cases} \Delta Z_n(I) = \Delta Z_c(I) \\ \Delta Z_n(I+1) = \Delta Z(I+1) + \frac{(\Delta Z(I) - \Delta Z_n(I)) \times L(I) \times B(I)}{L(I+1) \times B(I+1)} \end{cases}$$

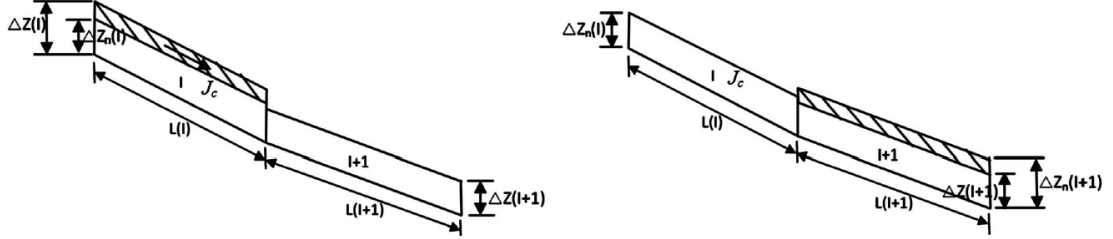


图 6 浮泥运动计算模式(Jia et al., 2013)

Jia(2013)的方法类似于 SED2D 模型中的临界坡度计算方法(Roelvink et al., 2009)。更新地形时考虑坡度超过临界坡度时发生崩塌的情况:

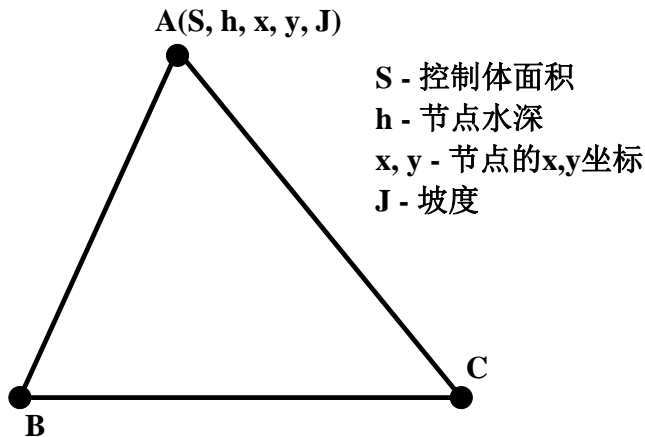
$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > S_{cr}$$

在  $y$  方向的表达式相同。对于地形和湿地地形考虑不同的临界坡度，分别是 1.0 和 0.3。当某一个计算节点的水下坡度超过临界坡度时，下一时刻即调整相邻两个节点间的地形直达到达到临界坡度，在随后的计算步将发生连锁反应，此时干地形的节点坡度又会超过临界坡度，最后的结果就是泥沙从干地形向湿地地形输移。

上述过程可以通过求解浮泥运动的微分方程实现（机理模拟），但上述的简化模型可方便应用于 2D 和 3D 河床演变模型。

地形的崩塌在调整过程需要结合土力学原理(黑鹏飞, 2016)，机理模拟将增加模型的复杂性和计算量。

非结构网格上的崩塌地形更新计算方法(MORSELEF):



---


$$m11 = S_A, m12 = S_B, m13 = S_C$$

$$m21 = y_B - y_C, m22 = y_C - y_A, m23 = y_A - y_B$$

$$m31 = x_C - x_B, m32 = x_A - x_C, m33 = x_B - x_A$$

$$vec1 = h_A m11 + h_B m12 + h_C m13$$

$$vec2 = \frac{J_{\max}}{J} (h_A m21 + h_B m22 + h_C m23)$$

$$vec3 = \frac{J_{\max}}{J} (h_A m31 + h_B m32 + h_C m33)$$

$$Det = m11(m22 \cdot m33 - m32 \cdot m23) -$$

$$m12(m21 \cdot m33 - m31 \cdot m23) +$$

$$m13(m21 \cdot m32 - m31 \cdot m22)$$

根据 Cramer 法则，计算各节点水深的更新：

$$h_{A\_new} = (vec1(m22 \cdot m33 - m32 \cdot m23) -$$

$$m12(vec2 \cdot m33 - vec3 \cdot m23) +$$

$$m13(vec2 \cdot m32 - vec3 \cdot m22)) / Det$$

$$h_{B\_new} = (m11(vec2 \cdot m33 - vec3 \cdot m23) -$$

$$vec1(m21 \cdot m33 - m31 \cdot m23) +$$

$$m13(m21 \cdot vec3 - m31 \cdot vec2)) / Det$$

$$h_{C\_new} = (m11(m22 \cdot vec3 - m32 \cdot vec2) -$$

$$m12(m21 \cdot vec3 - m31 \cdot vec2) +$$

$$vec1(m21 \cdot m32 - m31 \cdot m22)) / Det$$