

河流泥沙数学模型

郭庆超

中国水科院泥沙所
2007年10月



内容

1. 简介
2. 控制方程
3. 模型建立与使用



1. 简介

随着计算机技术的高速发展和河流泥沙基本理论的进步，水沙数学模型得到了快速发展，被广泛地应用于水利工程、江河治理和河口海岸与泥沙运动有关的领域中，解决了很多生产难题，发挥了巨大效益。



1. 简介

- 水沙数学模型：1D, 平面2D, 立面2D, 准3D, 完全3D;
- 能够严格总收物理原理;
- 能够严格遵守边界和初始条件;
- 节省时间、人力和成本;
- 方案比选与优化

1. 简介

模型的功能

解决实际问题：

- 河道演变
- 水库泥沙淤积
- 水利工程的下游冲刷
- 取水口稳定性
- 引航道及港池回淤
- 河口海岸工程泥沙问题

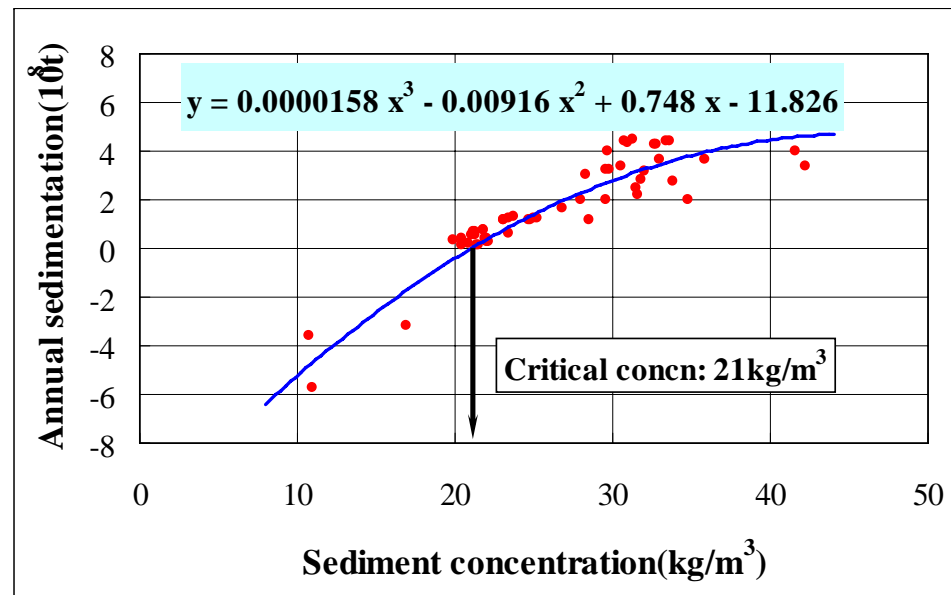


1. 简介

模型的功能

发现新的机理或规律

通过对比分析大量计算方案成果，有可能发现河道演变、水库泥沙淤积等的内在机理。这是模型试验和资料分析无法达到的，因为这些方法所反映的情况是有限的。





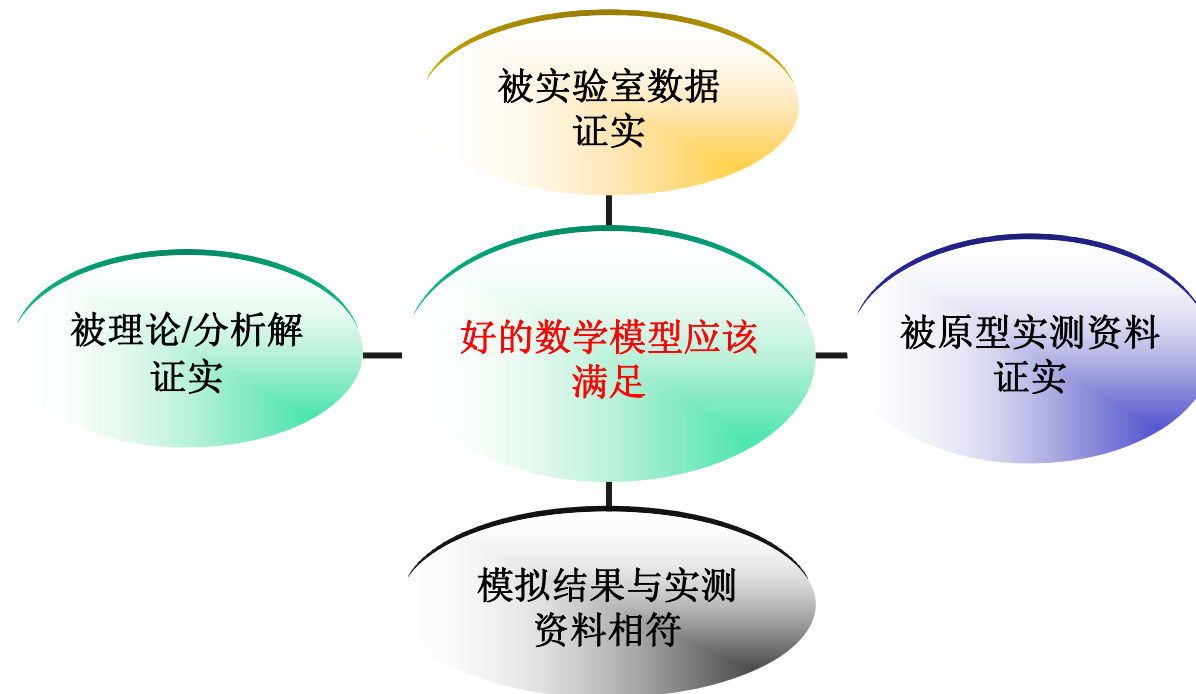
1. 简介

模型应满足以下基本要求:

- 满足物理的基本原理
- 被分析方法所检验:
 - 分析解 (线性)/人工解(非线性)
- 被实验和实测资料所检验
- 可以预测主要的物理过程
- 数值解是稳定的
- 数值解是收敛的
- 数值结果是可接受的
- 数值结果符合实际情况

1. 简介

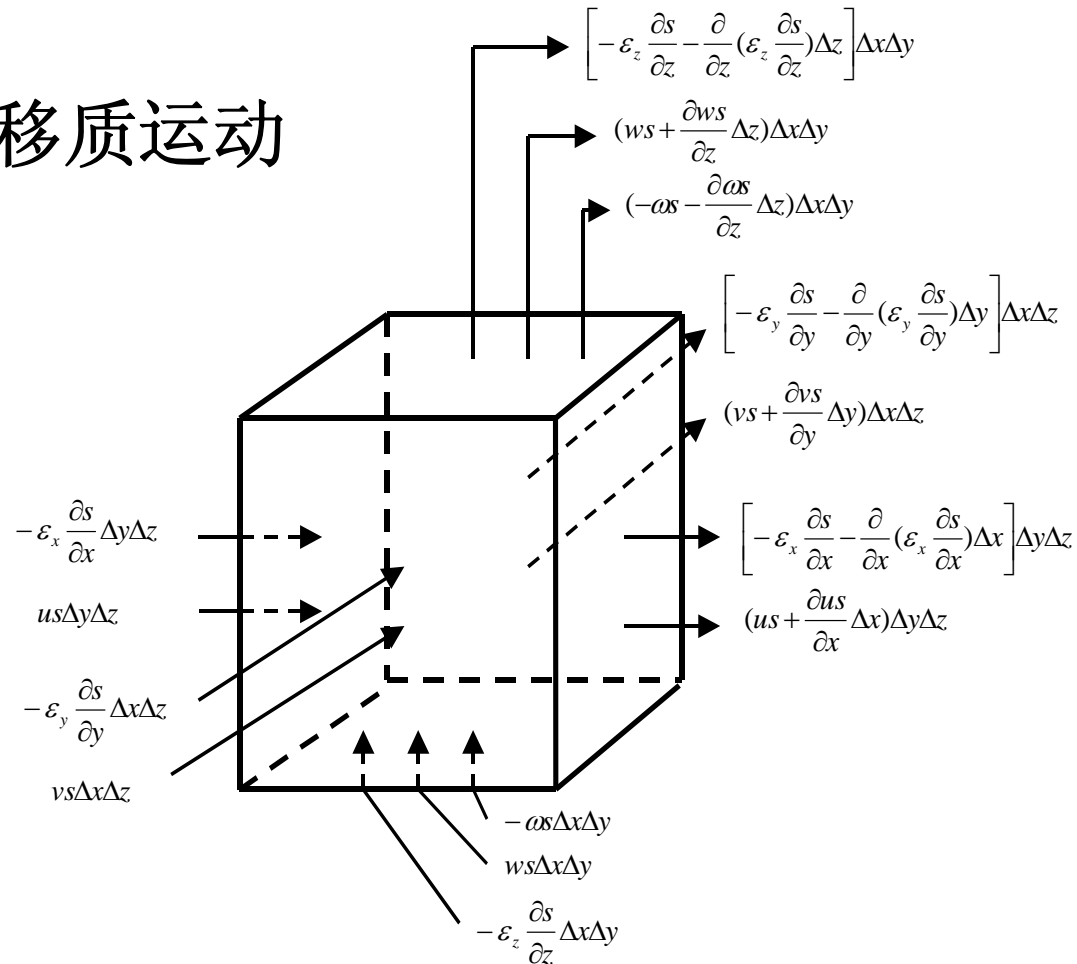
好的模拟成果还依赖于使用者的经验



模型使用者的经验对模型质量影响也很大

2. 控制方程

3D 悬移质运动



2. 控制方程

3D 悬移质运动扩散方程

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = \frac{\partial \omega s}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \right)$$

3D 水流运动方程

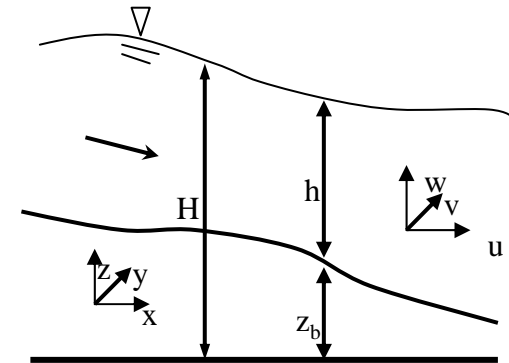
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] = 0$$

$$\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] = 0$$

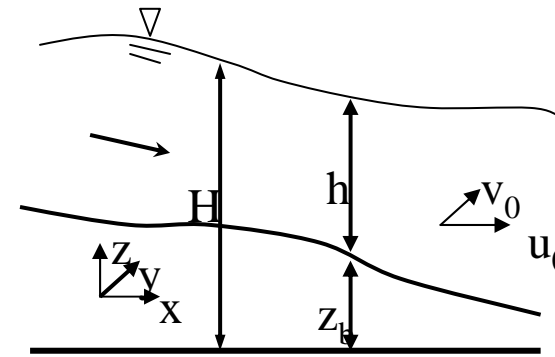
$$\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] = 0$$

$$\tau_{ij} = \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u'_i u'_j$$



2. 控制方程

平面2D水流泥沙运动方程



$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial hu_0}{\partial x} + \frac{\partial hv_0}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial hu_0}{\partial t} + \frac{\partial hu_0 u_0}{\partial x} + \frac{\partial hu_0 v_0}{\partial y} - \varepsilon h \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} \right) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{u_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2}}{C^2}$$

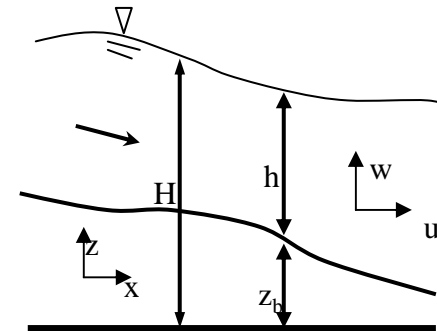
$$\frac{\partial hv_0}{\partial t} + \frac{\partial hu_0 v_0}{\partial x} + \frac{\partial hv_0 v_0}{\partial y} - \varepsilon h \left(\frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} \right) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - g \frac{v_0 \sqrt{u_0^2 + v_0^2}}{C^2}$$

$$\frac{\partial hs_0}{\partial t} + \frac{\partial hu_0 s_0}{\partial x} + \frac{\partial hv_0 s_0}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon h \frac{\partial s_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon h \frac{\partial s_0}{\partial y} \right) - \alpha \omega (s_0 - s^*)$$

$$\rho' \frac{\partial z_b}{\partial t} = \alpha \omega (s_0 - s^*)$$

2. 控制方程

立面**2D**水流泥沙运动方程



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - g$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial ws}{\partial z} = \frac{\partial \omega s}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial s}{\partial z} \right)$$

2. 控制方程

1D水流泥沙运动方程

水流连续方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_x = 0$$

水流动量方程

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 + \frac{1}{g} \frac{Q}{A^2} q_x + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} = 0$$

泥沙连续方程

$$\frac{\partial(AS)}{\partial t} + \frac{\partial(QS)}{\partial x} - s_x q_x + \alpha \omega B (S - S_*) = 0$$

t, x =时间和空间坐标; A =过水面积; Q =流量; q_x =测向单位长度进出河道流量 (进+, 出-); H =水位; g =重力加速度; n =曼宁系数; R =水力半径; S =含沙量; s_x =测向进出流含沙量; S_* =挟沙能力; ω =沉速; B =水面宽。

3. 模型建立与使用

数学模型建立流程

物理原理 – 控制方程 (主要是微分方程, 没有分析解)

采用数值方法 (如FDM和FEM) 离散微分方程, 获得代数方程。

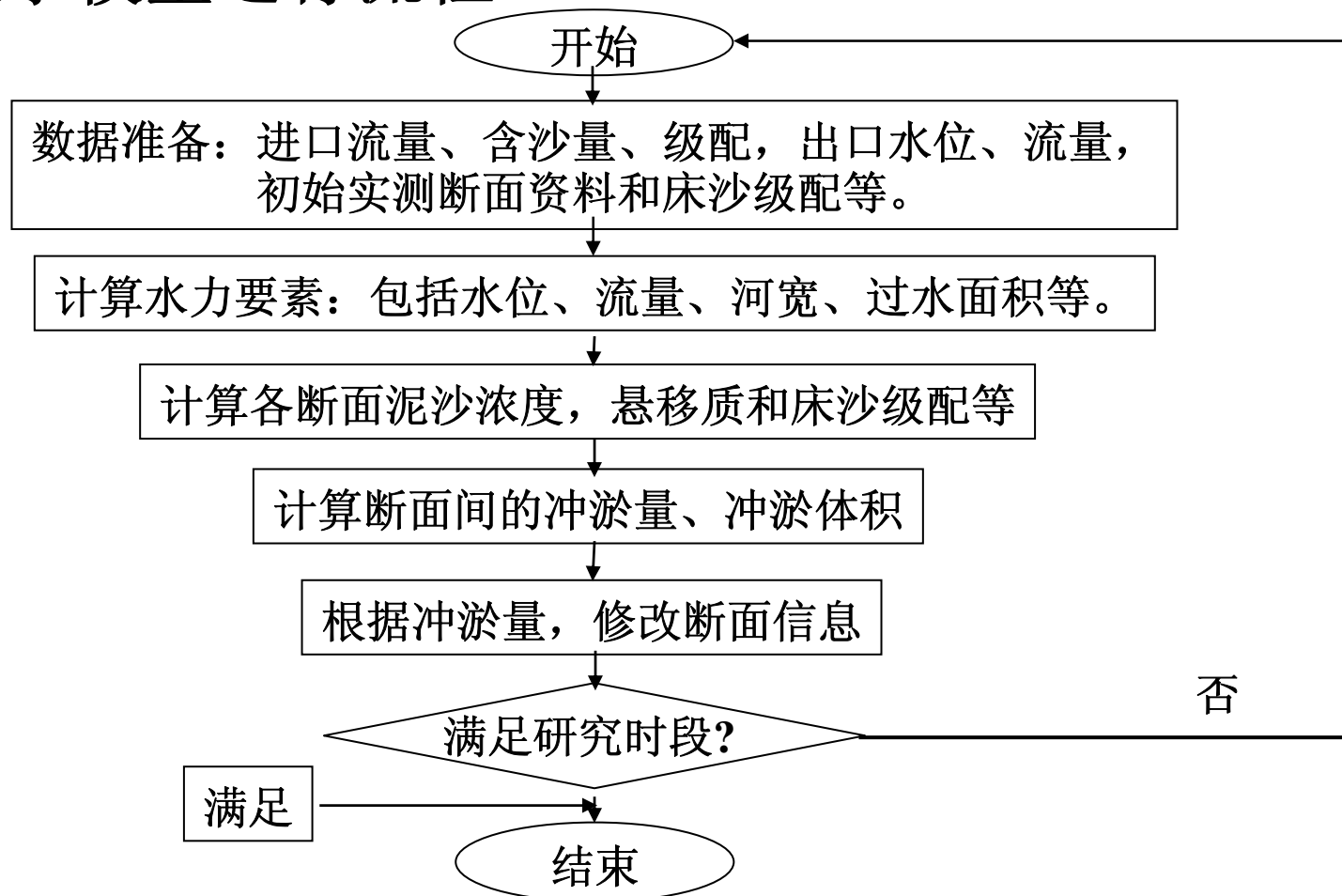
编写调试计算程序

用实测数据检验模型的合理性和模拟能力, 率定模型参数。

根据要求解决实际问题, 进行方案比较和优化。

3. 模型建立与使用

数学模型运行流程



3. 模型建立与使用

1D 恒定水流泥沙运动方程

$$\text{Flow,} \quad \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{U^2}{C^2 R} = 0$$

$$\text{Sediment,} \quad \frac{\partial hUS}{\partial x} = -\alpha\omega (S - S^*)$$

$$\text{Bed Deformation,} \quad \rho' \frac{\partial Z_b}{\partial t} = \alpha\omega (S - S^*)$$

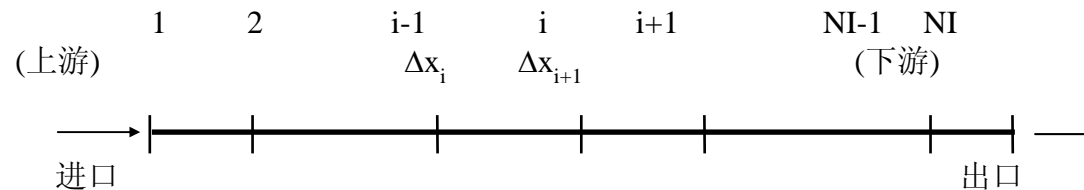
H=水位; **U**=流速; **S**=含沙量; **S***=挟沙能力; **ω**=沉降速度;
R=水力半径; **C**=Chezy 系数; **ρ'**=干容重; **h** = 水深; **Z_b**=河床高程.

3. 模型建立与使用

微分方程离散

连续方程: $Q = UA$

动量方程:
$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{U^2}{C^2 R} = 0$$



采用FDM离散动量方程:

$$H_i = H_{i+1} + \frac{\Delta x_i n^2}{2} \left(\frac{B_i^{4/3} Q_i^2}{A_i^{10/3}} + \frac{B_{i+1}^{4/3} Q_{i+1}^2}{A_{i+1}^{10/3}} \right) + \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_{i+1}^2}{A_{i+1}^2} - \frac{Q_i^2}{A_i^2} \right)$$

通过试算, 求解各断面的水位、流量、流速、河宽、过水面积等。

3. 模型建立与使用

微分方程离散

$$\text{Sediment transport, } \frac{\partial hUS}{\partial x} = -\alpha\omega(S - S^*)$$

尽管该方程也可以用FDM求解，但通过简单假定可以得到分析解。
假定： $q = hU$ ：

$$\frac{d(S - S^*)}{dx} = -\alpha \frac{\omega}{q} (S - S^*) - \frac{dS^*}{dx}$$

微分方程通解：

$$S - S^* = e^{-\int \alpha \frac{\omega}{q} dx} \left(\int -\frac{dS^*}{dx} e^{\int \alpha \frac{\omega}{q} dx} dx + c \right)$$

积分常数 c 可以由进口的边界条件确定，因此特解为：

$$S - S^* = (S_0 - S_0^*) e^{-\frac{\alpha\omega L}{q}} - e^{-\frac{\alpha\omega L}{q}} \int_0^L e^{\frac{\alpha\omega x}{q}} \frac{dS^*}{dx} dx$$

3. 模型建立与使用

微分方程离散

假定 S^* 沿水流方向线性变化, 即: $dS^*/dx = \text{常数}$,

$$\frac{dS^*}{dx} = -\frac{S_0^* - S^*}{L}$$

特解可写为:

$$S = S^* + (S_0 - S_0^*)e^{-\frac{\alpha\omega L}{q}} + (S_0^* - S^*)\frac{q}{\alpha\omega L}\left(1 - e^{-\frac{\alpha\omega L}{q}}\right)$$

对于非均匀泥沙运动, 群体含沙量可由均匀沙叠加而计算:

$$S_{i+1,j} = S_{i+1,j}^* + (S_{i,j} - S_{i,j}^*)e^{-\frac{\alpha\omega_j\Delta x_i}{q_i}} + (S_{i,j}^* - S_{i+1,j}^*)\frac{q_i}{\alpha\omega_j\Delta x_i}\left(1 - e^{-\frac{\alpha\omega_j\Delta x_i}{q_i}}\right)$$

$$S_{i+1} = S_{i+1}^* + (S_i - S_i^*)\sum_{j=1}^L P_{i,j}e^{-\frac{\alpha\omega_j\Delta x_i}{q_i}} + (S_i^* - S_{i+1}^*)\sum_{j=1}^L P_{i+1,j}\frac{q_i}{\alpha\omega_j\Delta x_i}\left(1 - e^{-\frac{\alpha\omega_j\Delta x_i}{q_i}}\right)$$

i - 断面编号, j - 泥沙颗粒分组数

3. 模型建立与使用

挟沙能力

无论对于低含沙水流还是高含沙水流，其挟沙能力公式的一般形式均可用下式表达：

$$S^* = K \rho_s \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right)^m \left(\frac{U^3}{gh\omega} \right)^m$$

这里， K 是系数， ρ 和 ρ_s 分别是浑水和泥沙容重。

3. 模型建立与使用

挟沙能力

对于低含沙水流，其浑水容重和泥沙在浑水条件下的沉降速度分别近似等于清水容重和清水时的泥沙沉降速度，因此低含沙水流挟沙能力公式可写为：

$$S_0^* = K\rho_s \left(\frac{\rho_0}{\rho_s - \rho_0} \right)^m \left(\frac{U^3}{gh\omega} \right)^m = k_0 \left(\frac{U^3}{h\omega_0} \right)^m$$

这里， S_0^* 为低含沙水流挟沙能力，而 ρ_0 和 ω_0 分别为清水容重和清水时的泥沙沉速。

3. 模型建立与使用

挟沙能力

对于高含沙宾汉体，公式是不能搬用的。这时不仅要考虑水流中泥沙含量对浑水容重的影响，也要考虑其对沉降速度的影响。浑水容重和泥沙在浑水中的沉降速度公式可分别写为：

$$\rho = S + \left(1 - \frac{S}{\rho_s}\right) \rho_0$$

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{S}{\rho_s}\right)^k$$

这里， k 为沉降速度修正指数，一般情况下 $k = 7.0$ 。

3. 模型建立与使用

挟沙能力

将浑水容重和浑水中沉速修正关系代入挟沙能力一般公式，得到高低含沙水流统一的挟沙能力公式：

$$S^* = k_0 \left[1 + \left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0 \rho_s} \right) \frac{S}{\beta} \right]^m \frac{1}{\left(1 - \frac{S}{\rho_s \beta} \right)^{(k+1)m}} \left(\frac{U^3}{h \omega_0} \right)^m$$

这里， β 为考虑泥沙颗粒周围一层难以分离的薄膜水对泥沙颗粒体积影响修正系数。含沙量较低时，可取为**1.0**，高含沙水流可取**0.5**左右，当含沙量很高时， β 有减小趋势，但最小值不低于**0.3**。



3. 模型建立与使用

挟沙能力

从高低含沙量统一公式可以看出：（1）含沙水流的挟沙能力不仅与水力因子（如 U, h ）和泥沙因子（如 ω_0 ）有关，而且也受上游来流含沙量的影响；（2）对于低含沙水流（如 $S < 100\text{kg/m}^3$ ），挟沙能力受上游含沙量影响甚微，然而，随着含沙量的进一步增加，挟沙能力受上游来流含沙量的影响渐趋明显，而且来流含沙量越高，水流挟沙能力越大，这正是高含沙水流多来多排的缘故。

3. 模型建立与使用

恢复饱和系数

恢复饱和系数 α 是模型重要参数之一，利用悬移质泥沙运动基本理论，对 α 的取值进行了研究，推导了系数 α 的理论表达式（郭庆超）：

$$\alpha = \frac{\left(\frac{1}{\eta_a} - 1\right)^{z_1}}{\left[\left(1 + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C}\right) \int_{\eta_a}^1 \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^{z_1} d\eta + \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \int_{\eta_a}^1 \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^{z_1} \ln \eta d\eta \right]}$$

η 是相对水深， η_a 是参考相对水深， κ 是卡曼常数，取0.4， $z_1 = \omega / \beta \kappa u_*$ ， β 是表征清水和浑水扩散差异的物理量，当含沙量较低时，可取1.0。



3. 模型建立与使用

恢复饱和系数

恢复饱和系数 α 是模型重要参数之一，从理论上讲它可表达为床面泥沙浓度与垂线平均泥沙浓度之比，因此，系数的理论数值应该大于**1.0**。

表达式表明，对于一般天然河道， α 的理论值非常接近于**1.0**，这与在实际计算时取**0.25~1.0**是很相近的，这说明以前对 α 的经验取值是有根据的。而对于实验室的水槽资料， α 的理论值可以远远大于**1.0**。



3. 模型建立与使用

挟沙能力系数

随着模型在河道和水库应用的机会越来越多，对系数 k_0 的认识也越来越清楚。一般情况下系数 k_0 值的变化范围在**0.01~0.05**之间。在南方少沙河流中 k_0 取值较小，如长江和汉江下游 k_0 可取为**0.014~0.02**；在北方多沙河流中，系数 k_0 应该大一些，如黄河下游的 k_0 可取为**0.025~0.033**；水库取值大于河道，粒径细的大于粒径粗的，滩槽差明显的大于不明显的。根据这些基本原则可以基本上估计某一河流或水库的挟沙能力系数 k_0 取值范围。

3. 模型建立与使用

挟沙能力系数

根据**Bagnold**和**Rubey**等人的研究成果，郭庆超推导了估算 k_0 的半理论表达式：

$$k_0 = \frac{\rho_0 \rho_s}{\rho_s - \rho_0} \frac{B_r}{C^2}$$

对于实验室资料，**Bagnold**认为 B_r 可取为**0.01**，而对于天然河道，**Rubey**建议， B_r 应为**0.025**。

对于天然河道而言，谢才系数 C 一般介于**30~60**，因此，利用上述公式计算的挟沙能力系数 k_0 的半理论值为：**0.011~0.045**。这一半理论计算值在一定程度上支持了以前的经验取值。



3. 模型建立与使用

挟沙能力指数

模型在众多的河道和水库冲淤计算应用中表明，系数 m 非常稳定，围绕着**0.92**做微小波动，为了便于模型应用和减少可调系数的个数，系数 m 在模型中被取为定值**0.92**，这样，在整个模型中只有一个不太确定的系数 k_0 ，使模型使用起来变得简单方便。



3. 模型建立与使用

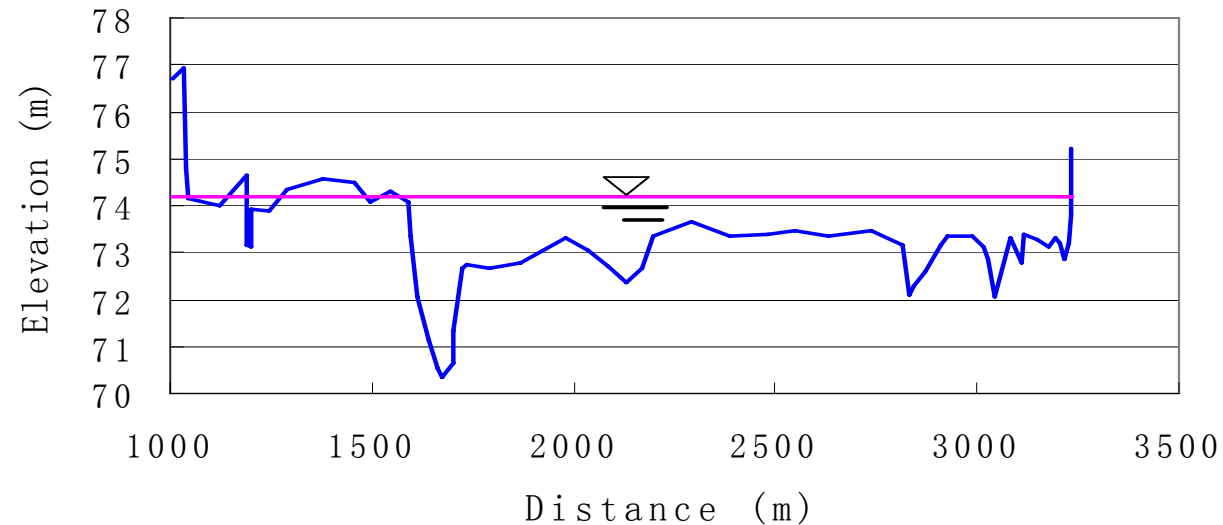
边界和初始条件

边界条件：进口断面给定流量、含沙量过程，以及悬移质级配，出口断面给定水位和流量过程，区间应该考虑支流入汇和取引水等。

初始条件：计算开始时需要一套实测断面资料作为河道初始形态，需要对河床的床沙进行分层，并给出床沙分层级配。

3. 模型建立与使用

断面信息提取



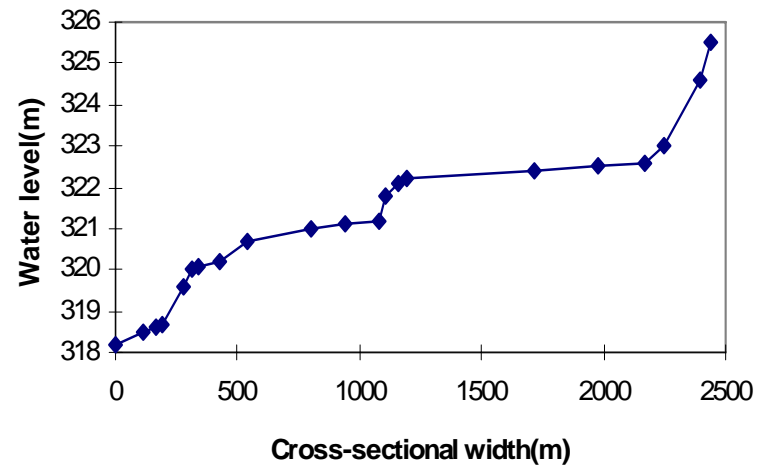
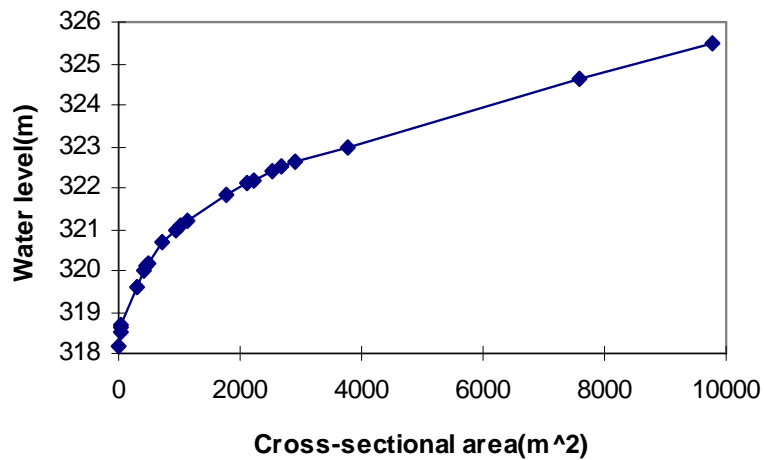
根据断面实测资料，计算不同水位对应的河道断面面积(A)和河宽(B)，建立面积/河宽与水位函数关系：

$$A = f_A(z) \quad B = f_B(z)$$

3. 模型建立与使用

断面信息提取

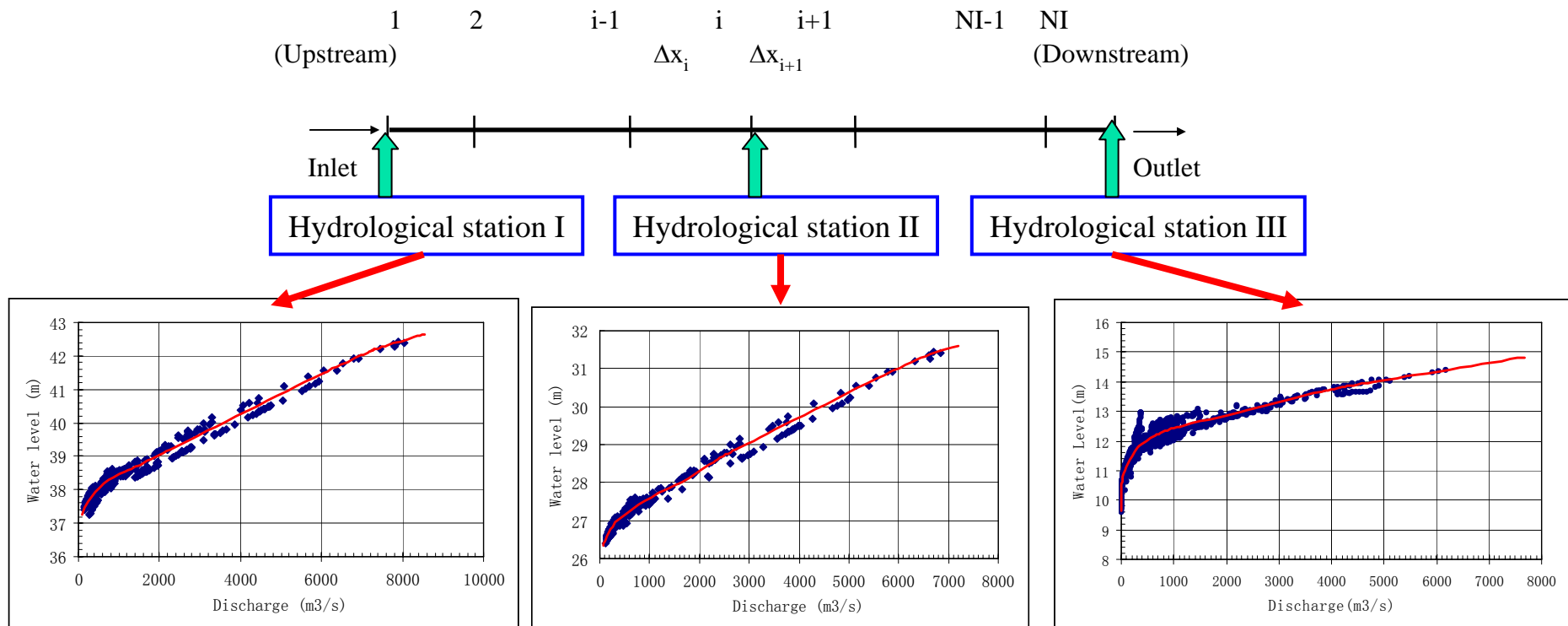
某断面的面积/河宽与水位关系



3. 模型建立与使用

曼宁糙率系数

(1) 根据研究河段的水文站资料，绘制水位流量关系 (Q~Z)





3. 模型建立与使用

曼宁糙率系数

(2) 根据水位流量关系，列表同流量下不同水位站的水位

Q	Station I	Station II	Station III
500	38.2	27.3	12.1
1000	38.5	27.6	12.45
2000	39.0	28.3	12.8
5000	40.8	30.3	14.1
.....



3. 模型建立与使用

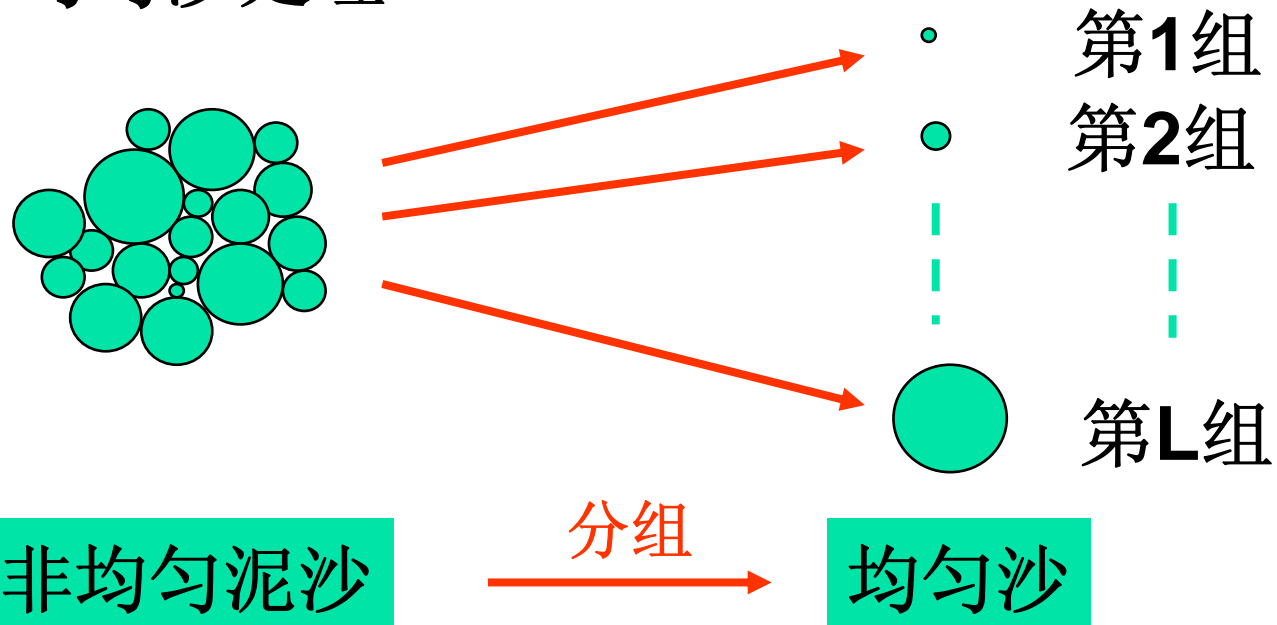
曼宁糙率系数

(3) 根据下面公式，计算相邻水文站之间河段不同流量下的曼宁糙率系数。

$$H_i = H_{i+1} + \frac{\Delta x_i n^2}{2} \left(\frac{B_i^{4/3} Q_i^2}{A_i^{10/3}} + \frac{B_{i+1}^{4/3} Q_{i+1}^2}{A_{i+1}^{10/3}} \right) + \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_{i+1}^2}{A_{i+1}^2} - \frac{Q_i^2}{A_i^2} \right)$$

3. 模型建立与使用

非均匀沙处理



非均匀沙按照粒径大小分为若干组，并认为每组泥沙是均匀的，这样均匀沙运动理论就可以运用到非均匀沙中。

3. 模型建立与使用

悬移质级配

当淤积时，出口断面的悬移质级配可由进口断面级配及河段内冲淤百分比来确定。

$$P_{l,j+1} = P_{l,j} \left(1 - \lambda_j\right) \left(\frac{\omega_l}{\omega_{r,j+1}}\right)^{\theta} \quad \text{其中:} \quad \lambda_j = \frac{S_j Q_j - S_{j+1} Q_{j+1}}{S_j Q_j}$$

式中， λ_j 为冲淤百分数， θ 为反映悬沙沿河宽分布不均匀系数，对于条状水域取3/4，对湖泊型取为1/2， $\omega_{r,j+1}$ 为代表沉降速度，可由

$$\sum_{l=1}^L P_{l,j+1} = 1 \quad \text{试算确定。}$$

3. 模型建立与使用

悬移质级配

冲刷时，出口断面的悬移质级配由进口断面级配、冲刷百分比、上一计算时段的床沙级配等共同确定。

$$P_{i+1,j} = \frac{1}{1-\lambda_i} \left(P_{i,j} - \frac{\lambda_i}{\lambda_i^*} R_{i,j} \lambda_i^* \left(\frac{\omega_j}{\omega_{c,i}} \right) \right) \quad \text{其中：} \quad \lambda_i^* = \frac{\Delta h_i'}{\Delta h_0 + \Delta h_i'}$$

式中， $i-1$ 代表上一计算时段， R_i 为床沙级配， λ^* 为虚拟冲刷百分数， $\Delta h'$ 为虚冲厚度， Δh_0 为扰动厚度，相当于河床单位平方米面积内1吨重量的泥沙所对应的厚度，约0.8m左右， $\omega_{r,j+1}$ 仍然由

$$\sum_{j=1}^L P_{i+1,j} = 1 \quad \text{试算求得。}$$

3. 模型建立与使用

淤积物级配

淤积物级配是指本时段由悬移质淤积后形成新鲜床沙的级配，可由分组淤积量与总淤积量的比值计算，其方程可写为：

$$r_l = \frac{V_l}{\sum V_l} = \frac{(Q_j P_{l,j} S_j - Q_{j+1} P_{l,j+1} S_{j+1})}{(Q_j S_j - Q_{j+1} S_{j+1})}$$

式中， V_l 为第 l 组粒径淤积物重量。

3. 模型建立与使用

床沙表层级配

在有冲淤发生的情况下，河床表层的床沙会和悬移质发生交换，引起表层床沙级配的变化，其计算公式为：

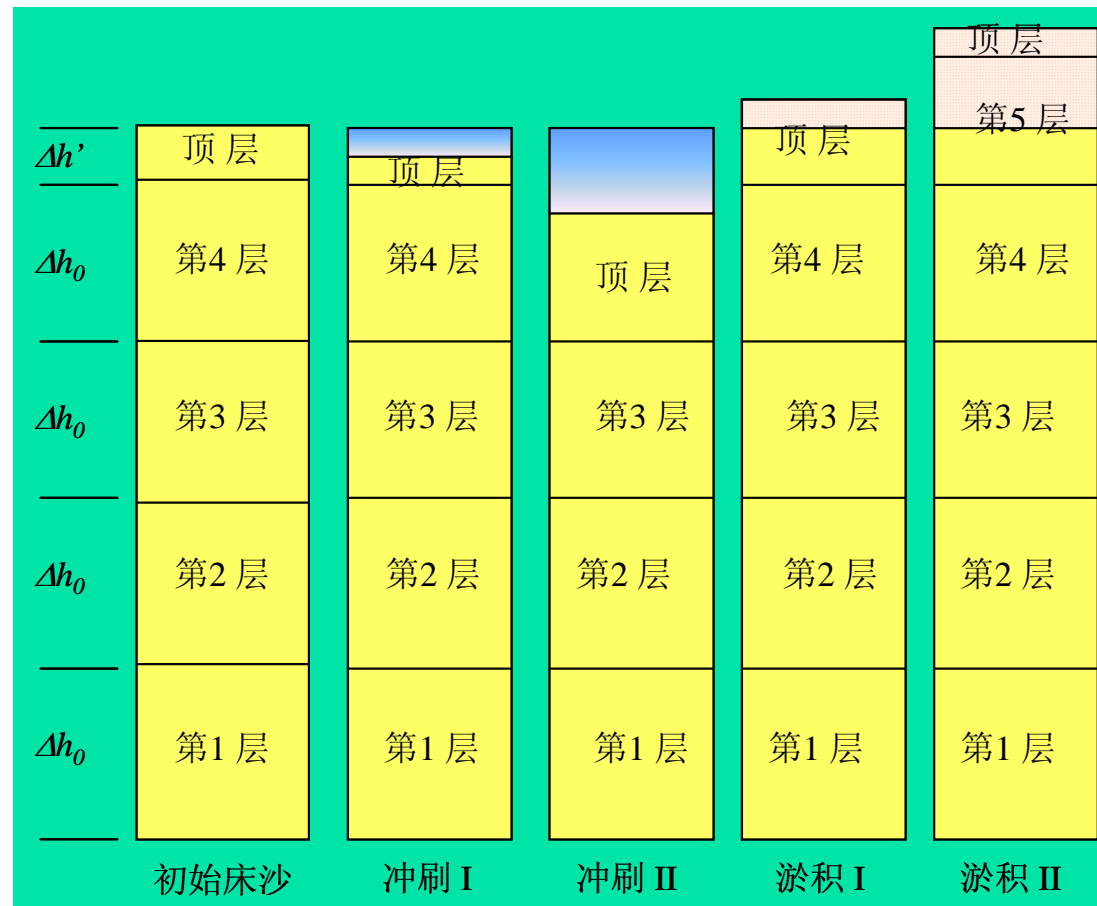
$$R_{l,j+1} = \frac{(Q_j S_j P_{l,j} - Q_{j+1} S_{j+1} P_{l,j+1}) \Delta t + 0.5 \Delta h'_j \rho' \Delta x_j (B_j + B_{j+1}) R_{l,i-1,j+1}}{(Q_j S_j - Q_{j+1} S_{j+1}) \Delta t + 0.5 \Delta h'_j \rho' \Delta x_j (B_j + B_{j+1})}$$

这里， R_l 是表层床沙级配， Δt 是计算冲淤变形的时间步长（s）， ρ' 是床沙干容重（ kg/m^3 ），其他符号意义同前。

3. 模型建立与使用

床沙柱状分层调整

在河床冲淤变形计算开始前，对可冲床沙厚度进行分层处理，并给定各层的床沙级配。当有冲淤发生时，床沙柱状分层将根据冲淤强度进行调整。





3. 模型建立与使用

床沙柱状分层调整

冲刷时，分两种情况调整柱状分层和顶层级配。当冲刷强度不大，顶层床沙够冲时，柱状层数不变，只需修正顶层级配，其他各层级配不变；当冲刷强度较大，顶层床沙不够冲时，次层床沙参与冲刷，柱层减少，顶层和次层床沙参与级配调整，其他各层级配不变。

淤积时，也分两种情况调整分层和级配。当淤积强度不大，新淤积物与前一时段末顶层厚度之和小于标准层厚度时，柱状层数不变，只需调整顶层床沙级配；当淤积强度较大时，新鲜淤积物与原顶层之和大于标准层厚度时，柱状层数增加，新增加的标准层及顶层级配需要调整，其他各层不变。

3. 模型建立与使用

河床变形

当没一个断面的含沙量计算出来以后，根据沙量平衡原理，可以计算相邻两个断面间的泥沙冲淤量、冲淤体积以及冲淤面积等。

$$\Delta w_{j+1} = 0.001(Q_j S_j - Q_{j+1} S_{j+1}) \Delta t$$

$$\Delta v_{j+1} = \frac{\Delta w_{j+1}}{\rho}$$

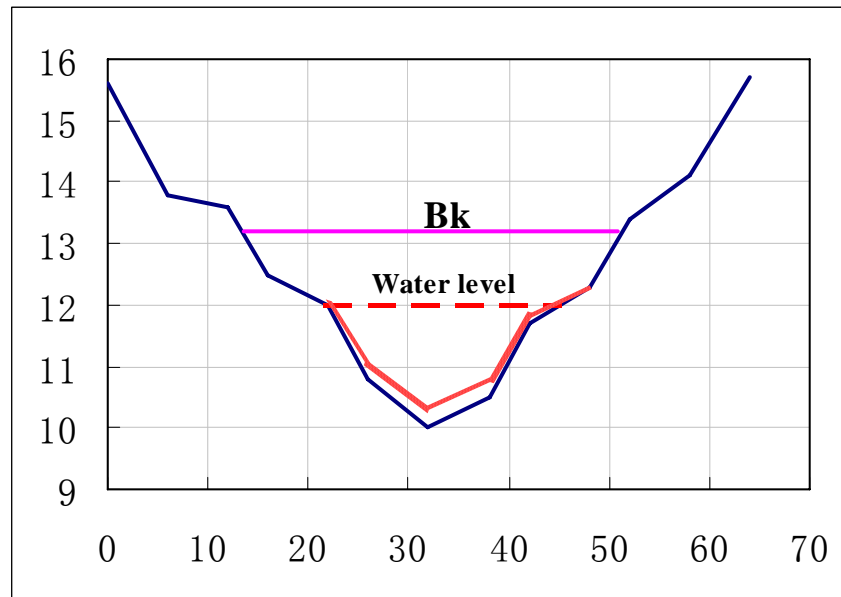
$$\Delta a_{j+1} = \frac{\Delta v_{j+1}}{\Delta x_j}$$

式中， Δw ， Δv 和 Δa 分别是冲淤重量（t）、冲淤体积（ m^3 ）和断面冲淤面积（ m^2 ）。当他们的计算值为正时，是淤积；为负时，是冲刷。

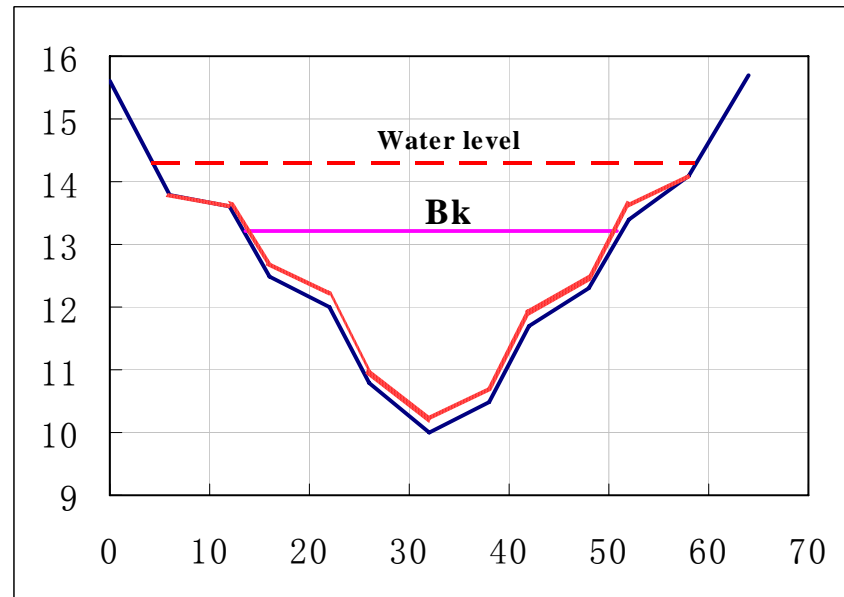
3. 模型建立与使用

断面修正

当淤积时，淤积物等厚沿湿周分布。



水位低于平滩河宽 B_k

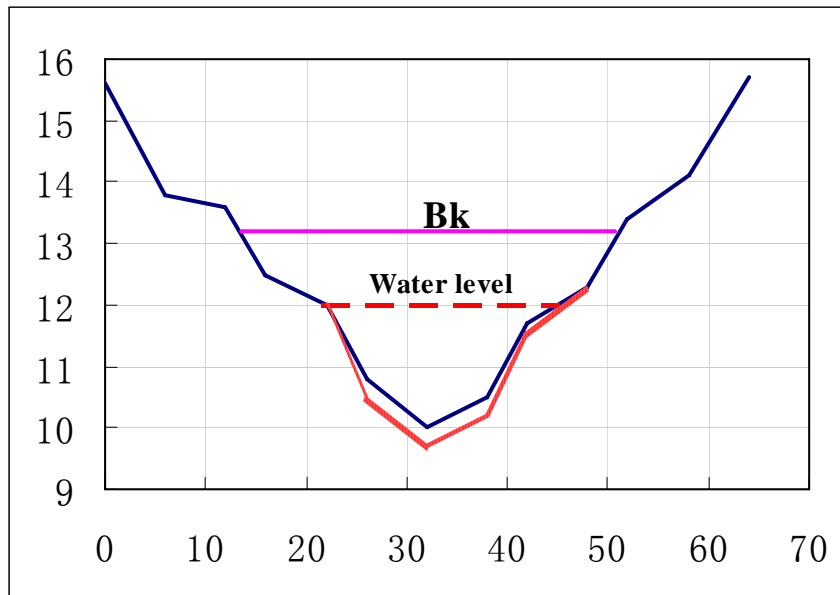


水位高于平滩河宽 B_k

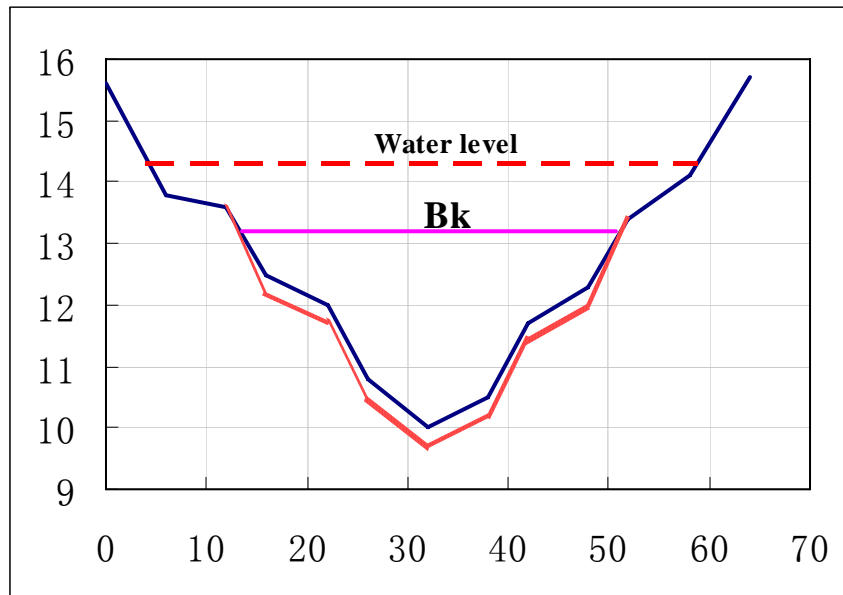
3. 模型建立与使用

断面修正

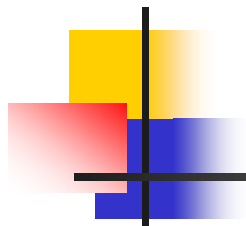
当冲刷时，分两种情况修正。当水面河宽小于稳定河宽时，断面按沿湿周等深冲刷进行修正；当水面宽度大于稳定河宽时，只对稳定河宽以下的河床进行等深冲刷修正，稳定河宽以上河床按不冲处理。



水位低于平滩河宽 B_k



水位高于平滩河宽 B_k



谢谢