

317-324

三峡工程下游宜昌至沙市河段河床冲刷预测

陈远芳

(长江航道规划设计研究所, 武汉 430011)

高凯春

(长江航道局, 武汉 430011)

TV147.3

提要 在已建水库下游河床冲刷泥沙数学模型的基础上, 针对宜昌—沙市河段的河道特性, 修改并建立了能够反映该河段水沙运动特性的一维水流泥沙数学模型。在此基础上, 进行了三峡建库后, 前20年内宜昌—沙市河段的一维水沙运动及河床冲淤计算。计算结果表明, 三峡建库后, 在水库运用至第10年, 宜昌—沙市河段的沙层覆盖层几乎冲光, 之后主要以砾、卵石层面粗化下切为主。当水库运用到第5年以后, 芦家河以下河段逐渐出现了一些局部水面比降较陡的现象, 沙市水位下降的越多, 这一现象越为明显, 对于船舶航行条件将有一定的影响。

关键词 三峡工程, 冲刷, 泥沙

数学模型, 河床

随着三峡水库的兴建, 下游河道由于来水来沙条件的变化, 河床将失去原有的平衡。在重建平衡的过程中, 河道的水位、河床形态及航道条件等都将发生改变, 这些变化对生产将产生重大影响。在三峡水库运用初期, 卵石及粒径较粗的泥沙将被拦截在库内, 水库下泄悬移质含沙量仅为同期入库含沙量的30%左右, 且粒径较细。当水库运用到40年左右, 排沙比才达到40%左右, d_{35} 约为0.01mm左右。在相当长的时期内, 下游河道因来沙量过小及粒径较细而发生沿程冲刷, 细颗粒泥沙将不断被冲刷下移, 河床组成将逐渐粗化, 以致形成抗冲保护层。河床钻探资料表明, 宜昌—江口河段河床上层沙覆盖较薄, 下层为砾、卵石夹沙组成, 自然情况下其河床有卵石裸露, 江口以下河段沙层厚度逐渐增加(图1)。三峡建库后, 江口以上河段由于沙层较薄, 近期内将很快冲光, 江口以下河段逐渐增厚, 但也将发生较大幅度的冲刷, 这种河床冲刷将引起该河段的航道发生变化, 是航运中十分关注的问题。

1 基本原理

1.1 基本方程

(1) 水流连续方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

(2) 水流运动方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 U^2}{R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

(3) 悬移质输沙方程

$$\frac{\partial AS_t}{\partial t} + \frac{\partial QS_t}{\partial x} = \alpha \omega_s B (S_{s0} - S_t) \quad (3)$$

* 收稿日期: 1996-08-28; 收到修改稿日期: 1997-01-06。
作者简介: 陈远芳, 女, 1963年生, 工程师, 1983年8月毕业于杭州大学, 现在长江航道设计研究所工作, 长期从事河流演变分析、数值模拟等研究。

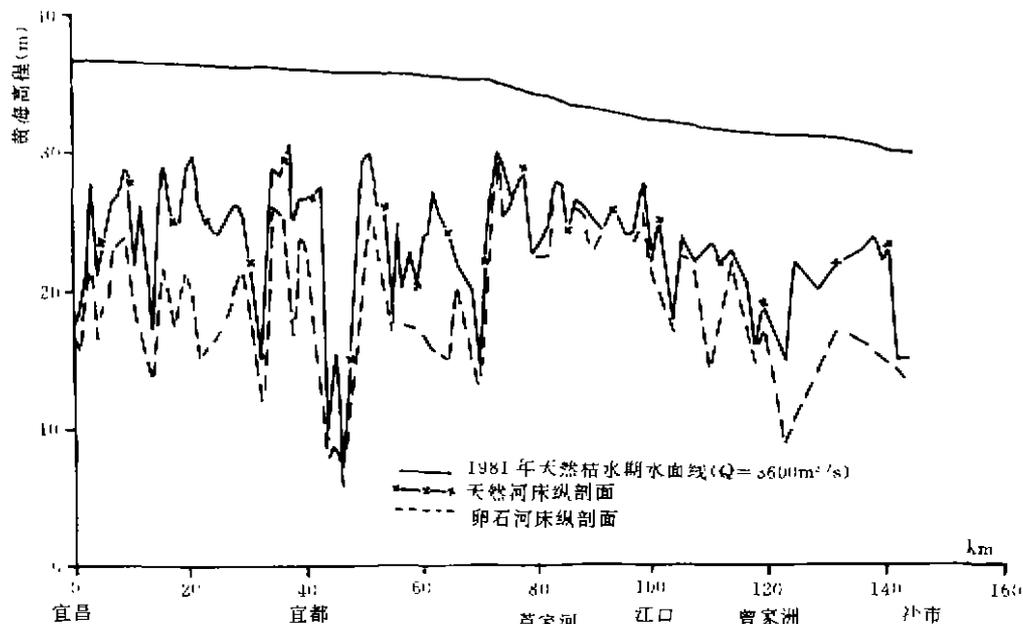


图1 宜昌—沙市河段天然及卵石河床深泓纵剖面图

Fig. 1 The longitudinal section of talweg on the natural and pebble bed of the river search between Yichang and Shashi

(4) 悬移质河床变形方程

$$\rho_s B \frac{\partial \eta_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

(5) 推移质河床变形方程

$$\rho_b B \frac{\partial \eta_b}{\partial t} - \frac{\partial Q_b}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

(6) 水流挟沙力公式

$$S_s = S_s(U, H, \omega, \dots) \quad (6)$$

(7) 推移质输沙率公式

$$Q_{bi} = Q_{bi}(U, H, d, \dots) \quad (7)$$

式中, A 为过水面积; Q 为流量; U, H 分别为断面平均流速及水深; B 为河宽; Z 为水位; η_s, η_b 分别为悬移质和推移质冲淤厚度, 河床变形总厚度为 $\Delta Z_n = \sum_{i=1}^N \eta_s + \eta_b$; n 为曼宁系数; R 为水力半径; g 为重力加速度; ω 为泥沙沉速; S, S_s 分别为断面平均含沙量及挟沙力; Q_s 为悬移质输沙率; Q_{bi} 为推移质输沙率; i 表示第 i 粒径组泥沙; ρ_s, ρ_b 分别为悬移质及推移质淤积物的密度; d 为床沙粒径。

1.2 有关公式的确定

1.2.1 阻力系数的确定 河床在冲刷过程中, 其床面不断粗化, 阻力系数也将发生变化。天然河道的阻力现象非常复杂, 其阻力包括沙粒阻力, 沙波阻力, 河道平面形态阻力及河道中的成

型堆积体阻力,对于沙粒阻力及沙波阻力有可能通过室内水槽来试验模拟和确定,对于平面形态及成型堆积体产生的阻力是无法在室内模拟和率定的,因此对于冲积河道的阻力,较为可靠的办法是用具体河段的实测资料率定,长江中下游河段属平原河流性质,河道糙率主要反映在床面糙率变化上,边壁糙率处于次要地位,在三峡建库后,宜昌—沙市河段将发生较大幅度的冲刷,河床不断粗化,其阻力也将发生变化,这种变化将主要反映在床面阻力的变化方面,按照长江科学院根据大量野外及室内实测资料得到的经验关系式

$$\frac{U}{(gDJ)^{1/2}} = k \left(\frac{R}{D} \right)^2$$

式中, U 为断面平均流速; R 为水力半径; D 为床沙中值粒径; J 为比降; g 为重力加速度; k 为经验系数,对于床面平整的卵石河床, $k=7.3$,床面略有沙纹的卵石河床, $k=6.3$,对于一般沙质河床, $k=4.0$,沙波充分发育的沙质河床, $k=3.65$ 。

将曼宁公式 $U = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2}$ 代入上式可得

$$n = D^{1/6} k^{-1} g^{-1/2} \quad (8)$$

由式(8)可得建库前后的糙率系数关系为:

$$n = n_0 \frac{k_0}{k} \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1/6} \quad (9)$$

式中, n 为建库后的糙率系数; n_0 为建库前的糙率系数; D_0 为建库前的床沙中值粒径; D 为建库后河床发生冲刷的床沙中值粒径; k 为冲刷过程中的系数; k_0 冲刷前的系数。

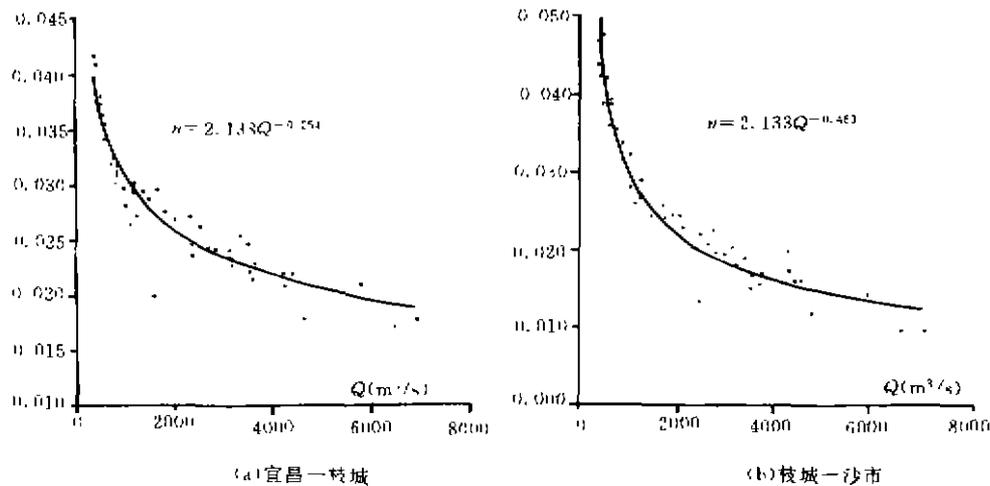


图2 宜昌—沙市河段流量—糙率关系曲线

Fig. 2 The plot of flow roughness to discharge in the river reach between Yichang and Shashi

在河床发生冲刷过程中,床面上有沙层覆盖时, $k=3.65-4.0$,由于目前还无法准确确定冲刷过程的沙波发育情况,沙质河床的 k 值的变化不大,为了计算方便,取 $k=3.83$,无沙层覆盖时,由于卵石河床不易形成沙波,因此可取 $k=7.3$,由此可估算冲刷过程中的糙率变化情况,关于建库前的糙率系数 n_0 ,通过整理大量实测资料得到如图2所示的流量与糙率系数关系曲线,据此可确定各级流量下的糙率系数 n_0 ,求出 n_0 后,将计算得到的建库前后床沙中值粒径

D_s 及 D 代入式(9)即可求出河床冲刷后的糙率系数 n 。

1.2.2 水流挟沙力公式 一维挟沙力按张瑞瑾公式^[1]计算

$$S_s = K \left[\frac{U^3}{gH\omega} \right]^m \quad (10)$$

在冲刷过程中挟沙力系数 K 与床沙密实程度有关,在丹江口水库下游冲刷计算中,冲刷初期 $K=0.02-0.025$,冲刷后期(即形成粗化层),床沙较密实, $K=0.016-0.018$, K 值大致减少 20% 左右,在本文中,沙层冲刷完前 K 、 m 按文献^[1]中 K 、 $m - \frac{U^3}{gH\omega}$ 关系曲线确定,沙层冲刷完后,由 $K - \frac{U^3}{gH\omega}$ 关系曲线查出 K 值后,再将 K 值乘以 0.8,作为实际计算采用的挟沙力系数。

1.2.3 推移质输沙率公式 现有推移质输沙率公式很多,但不同公式的计算结果差异很大,用川江及宜昌站的实测资料对现有的几家有代表性的公式进行了检验,结果表明,窦国仁、埃克斯-怀特公式相对较好,在本文中采用修正后的窦国仁公式

$$q_{bs} = \frac{k_1}{C_0^2} \frac{\rho_s \rho}{\rho_s - \rho} (u - u_c) \frac{\bar{u}^3}{g\omega} \quad (11)$$

式中 ω 为推移质平均粒径对应的沉速; u_c 为推移质平均粒径对应的起动流速,考虑到床沙细颗粒受隐蔽作用,而粗颗粒受暴露作用等因素,起动流速采用了修正后的秦荣昱公式^[2]; $C_0 = k_1 n^{-1} g^{-1/3}$; k_1 为经验系数,由川江及宜昌实测资料修正的表达式为, $k_1 = 0.057 \theta^{0.61385}$, $\theta = \tau_0 (\rho_s - \rho)^{-1} D^{-1}$; τ_0 为床面切应力; D 为床沙中值粒径。

2 宜昌至沙市河段一维数学模型的验证

本模型采用长江水利委员会水文局 1980 年实测宜昌至沙市河段的 1:10 000 地形及 1981—1984 年实测水文过程和实测清江汇流、松滋分流情况,作为验证计算的依据,而宜昌(计算进口断面)悬移质级配则采用 1981 年以来多年平均级配。

在计算河段内,有枝城、陈家湾等水位站,图 3 为 1984 年实测水位与计算值的比较,图 4

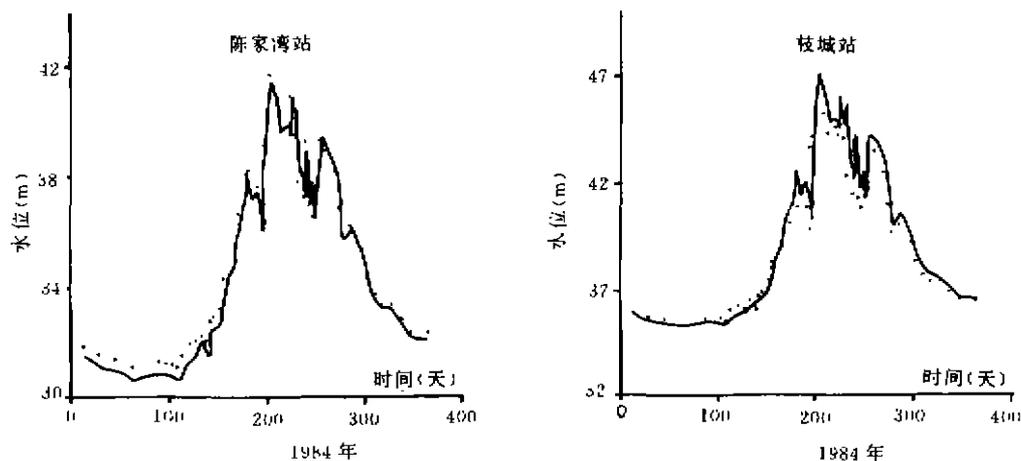


图 3 1984 年实测水位与计算值比较图

Fig. 3 The comparison of the observed water level with the calculated value

为芦家河水道实测冲淤量与计算值的比较图。由上述验证结果可见,本文中所采用的一维泥沙数学模型是能够反映计算河段内的水流泥沙运动特性的。

3 计算成果

3.1 基本资料及计算条件

三峡水库采用分期蓄水方案,即初期前10年采用156-135-140m(正常蓄水位-防洪限制水位-枯水期消落水位)方案,后期采用175-145-155m方案。本文采用的计算初始地形为长江水利委员会1980年施测的宜昌-沙市河段1/10000地形图;进口断面(宜昌)的水沙过程采用长江科学院一维模型计算的建库后前20年的出库流量、含沙量及级配过程成果;出口断面(沙市)水位采用天津水运科学研究所一维模型计算的建库后前20年水位过程成果。由于江湖关系的复杂性,计算河段内的分、汇流条件仍假定冲刷前后水位流量关系不变。计算中时段采用长江科学院划分的每年80个时段。

3.2 宜昌-沙市河段一维数学模型计算成果

3.2.1 冲刷量及其分布 图5为三峡建库后前20年宜昌-沙市河段河床下切的变化过程,由图可见,前10年冲刷速度较快,沙层几乎冲光,之后主要是床沙粗化形成抗冲刷过程中产生的冲刷量,累计最大冲刷量为 $2.52 \times 10^5 \text{m}^3$ 。计算还表明建库后10年末计算河段沿程累计,较大冲刷量发生在枝城以上及大布街以下,在关洲-大布街河段内冲刷深度较小,最大冲刷深度发生在宜都附近,高达13.5m左右。

3.2.2 水面比降变化 图6给出了枯水期水位沿程变化的对比情况,参照图1可见,由于芦家河河段、枝江河段及江口河段卵石层面相对较高,河床下切较小,使得在枯水期水面线在该河段产生较为明显的陡比降,由于受其制约,枝城以上水位变化较为平缓,直接制约了宜昌水位的下降,同时,计算还反映宜昌-沙市中水期的水面线情况,随着流量的增加,水位的抬高,卵石层面制约水位的影响也随之减弱,水位的变化也较为平缓。

3.2.3 床沙粗化宜昌-沙市河段 经过约15年的冲刷,河床已经形成卵石粗化层,图7a、b分别给出计算河段内各段的床沙级配变化过程,宜昌-枝城河段大于10mm的砾、卵石占48%,芦家河河段大于100mm的砾、卵石占40%。

4 结论

本文在研究宜昌至沙市河段水沙运动特点的基础上对三峡工程坝下河道进行预测,为了适应计算的需要,在已建一维泥沙数学模型的基础上,对阻力计算、床沙粗化等方面进行了改进,用实测资料验证表明,计算值在水位、冲淤量等方面均与实测情况一致,说明改进后的模型能够较好地反映三峡工程坝下游河道水流泥沙运动特性,应用所建模型进行了三峡建库后前

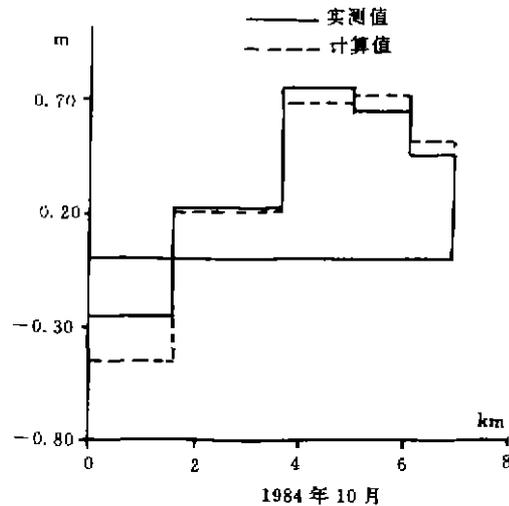


图4 芦家河水道实测冲淤比较图

Fig.4 The comparison on the observed siltation with the calculation for Lujiache water course

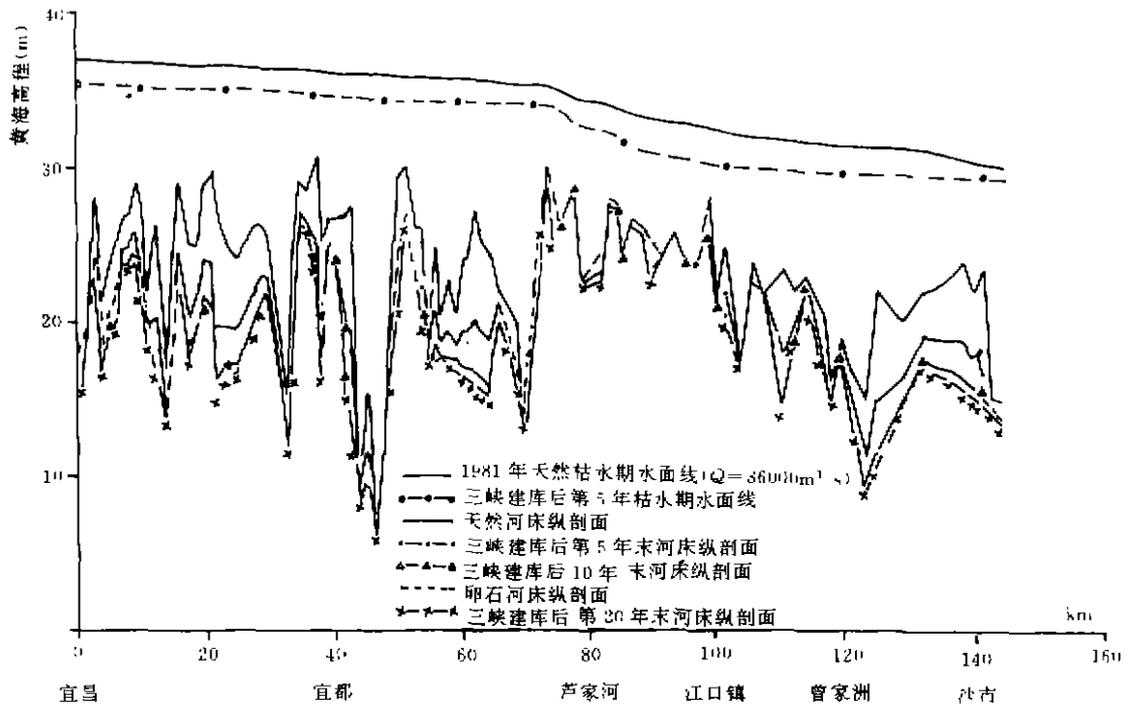


图 5 三峡建库后(前 20 年)宜昌—沙市河段纵剖面变化图
 Fig. 5 The change of longitudinal section of the river search between Yichang and Shashi during 20yr after TGP

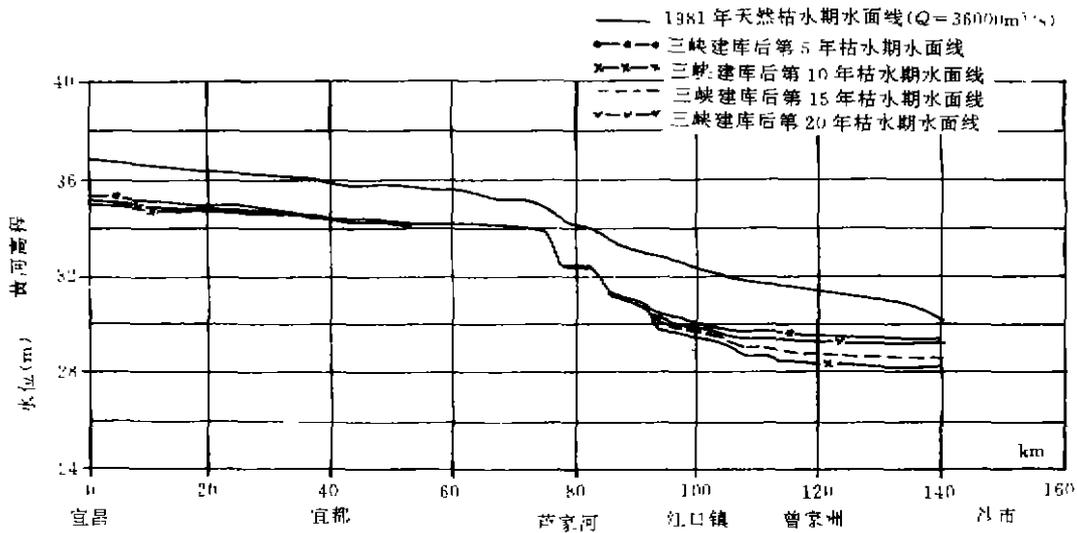


图 6 三峡建库后(前 20 年)宜昌—沙市枯水期水面线比较图
 Fig. 6 The comparison of water surface line in the low water period from Yichang to Shashi during 20yr period after TGP

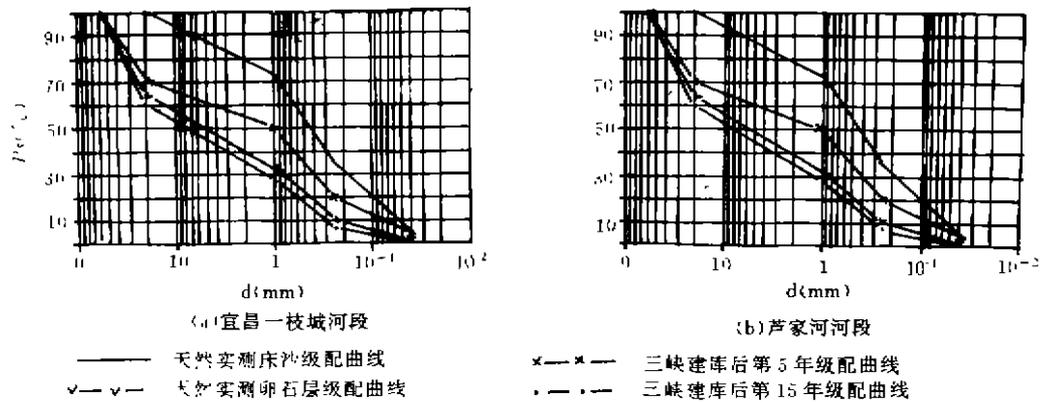


图7 三峡建库后(前20年)宜昌—沙市各河段床沙粗化过程图

Fig. 7 The roughing of bed sand at river search between Yichang and Shashi after TGP

20年宜昌—沙市河段的一维数学模型冲刷计算,在河床发生冲刷后可能形成水面陡比降,控制宜昌水位下降与改善芦家河以下河段的通航条件的关系等方面得到了新的认识.根据数值模拟结果得出主要结论如下:

(1) 三峡水库运用后前20年宜昌—沙市河段冲刷基本稳定,在运用至第10年,该河段沙层覆盖几乎冲光,随后以砾、卵石层面粗化下切为主,卵石层面下切幅度不大,床面相对卵石层最大下切深度为0.47m,发生在芦家河水道毛家花屋—昌门溪一带.

(2) 三峡水库运用第5年即发生明显的枯水期水面陡比降,水面陡降发生在枝城—七星台一带.

(3) 计算表明,宜昌—沙市河段累计最大冲刷量为 $2.52 \cdot 10^6 \text{m}^3$,前10年冲刷速度较快,沙层几乎冲光,平均冲刷深度约1.66m(平均河宽按1km)计算,最大冲刷深度为13.5m.

参 考 文 献

- 1 张瑞瑾等.河流泥沙动力学.北京:水利电力出版社,1989
- 2 高凯春.宽级配下非均匀石的起冲.铁道科技,1994,(2)

PREDICTION OF RIVER-BED SCOURING BETWEEN YICHANG AND SHASHI AT THE LOWER REACH OF THE THREE-GORGE PROJECT

Chen Yuanfang¹

Gao Kaichun²

(1: *Institute of Planning and Design of the Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010*;

2: *The Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010*)

Abstract

Based on the existing sediment mathematical model on the river-bed scouring at the lower reach of the Three-Gorge Project (TGP), an one-dimension mathematical model on the stream load is revised and set up after analysing the characteristics of the the river course from Yichang to Shashi. The revised model reflects the quality of water regime and sand transportation in the corresponding river course. The results given predict the river-bed scouring within 20 years that the Three-Gorge Reservoir is built. In the following ten years after building the Three-Gorge Reservoir, The overburden sand layer on the river bed between Yichang and Shashi will be almost washed away, resulting in a high roughed bed. The undercutting of the garvel and pebble bed will dominate. In the 5th year and later on when the Three-Gorge Reservoir is put into operation, the slope at some local surface of the river-bed beyond Lujiahe will be seen greater, the water level at Shashi dropped more. The more apparent phenomenona will inevitably affects the conditions for sbipping.

Key Words Three-Gorge Project, sediment, shipping