

# 孟加拉国布河河道泥沙数学模型 计算中几个问题的探讨

胡春宏 韩其为

(水利水电科学研究院 北京 100044)

**摘要** 针对布河游荡性河道上支汊众多、主流摆动不定、河道防洪能力较差等特性,基于断面输水和输沙相等的概念,将布河宽浅多汊的河道断面合并为等量的单一河道;在分析比较的基础上,确定了部分年份所缺的水沙资料,利用一维非均匀悬移质不平衡输沙数学模型进行验证计算,结果表明计算值与实测值相符较好。在此基础上,作了布河整治方案计算。对一些影响计算结果的因素进行了敏感性分析,指出了其中一些较为敏感的影响因素。

**关键词** 布河 泥沙 数学模型

## 1 布河基本情况及数学模型简介

布河(Brahmaputra River)由孟加拉国的北部流入该国境内,至与恒河交汇处以上约200km,属于平原冲积性河流。根据布河上巴站(Bahadurabad水文站)的实测资料分析表明<sup>①</sup>,布河来水来沙量年内分布不均匀,主要集中在7月~9月份,其中1965年~1975年7月~9月份的水量占年水量的64%,沙量占年沙量的65%;1976年~1988年7月~9月份的水量为年水量的65%,沙量为年沙量的68%;布河悬沙中径 $d_{50}$ 为0.03~0.06mm,我国长江中下游为0.03~0.04mm,黄河下游为0.02mm。可见布河悬沙中径的下限值比黄河粗,与长江接近。布河悬沙中有15%~35%属于床沙质,参与泥沙运动与床沙的交换。在1838年以前,布河是一条典型的弯曲性河道,以后随着来水来沙量的增加,布河才逐渐向游荡性河道发展。现在其河道断面形态是宽浅型的,最宽处达10多公里,断面上支汊众多,主流摆动不定,而两岸又缺乏必要的堤坊等工程措施,河道的防洪能力较差,严重影响了两岸人民的生产和生活。因此,对布河河道进行水沙预报和提出整治方案有着重要的实际意义。

本文采用一维非均匀悬移质不平衡输沙模型进行布河河道泥沙计算<sup>[1,2]</sup>,其中,也考虑了推移质的计算。该模型既可以计算水库冲淤,又可以计算河道的河床演变,具有理论严谨、体系完整、计算详细、考虑全面及适用性强的特点,并且先后经过国内外十几个大范围、长河段水库和河道实测资料的检验。模型采用划分时段和河段的方法,对每个河段和时段按非均匀恒定流进行。对每个河段和时段的计算分4个环节,即水面线计算;悬移质含沙量及级配计算;淤积面积及淤积物级配计算;河床变形计算。

本文于1992年3月6日收到,1993年4月5日收到修改稿。

① 中孟联合专家组。布拉马普特拉河河道形态及河床变形预报(摘要)。水利水电科学研究院,1990

## 2 计算中几个问题的处理

### 2.1 多汊河道的并汊处理

布河河道支汊众多,各汊分别计算将花费很多时间,并且游荡性河道某些支汊的变化对于研究整个河道的冲淤趋势并不是很重要,因而这种计算没有必要。另一方面,对于分汊河道如简单地将各汊横剖面的面积迭加,则过水面积和河宽较之相应的单一河道为大,水深则小。如按这些数据计算,则输沙规律(至少对某些参数)将有别于单一河道,不符合一般规律。因此,采用等量的单一河道的原则,将其汊道并成单一河道来计算。并汊时应满足在同样坡降条件下,输水能力和输沙能力与分汊河道相同的原则。按照输水能力相同,由曼宁公式各支汊流量之和为

$$Q = \sum_{i=1}^{m_1} \frac{B_i h_i^{5/3} J_i^{1/2}}{n_i} = \sum_{i=1}^{m_1} \frac{\xi_i^2 h_i^{11/3} J_i^{1/2}}{n_i} \quad (1)$$

而相应的单一河道流量为

$$Q = B h^{5/3} J^{1/2} / n = \xi^2 h^{11/3} J^{1/2} / n \quad (2)$$

式中  $h$  为水深,  $J$  为水面坡降,  $\xi$  为河相系数,  $\xi = \sqrt{B}/h$ ,  $i$  表示支汊的序号,  $m_1$  为支汊数, 加角标  $i$  的参数表示相应的支汊的值, 不加角标的参数表示等量的单一河道的值。按照输水量相等有

$$h^{11/3} = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} \xi_i^2 h_i^{11/3} J_i^{1/2} / n_i}{\xi^2 J^{1/2} / n} \quad (3)$$

在坡降相等  $J = J_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m_1$ ) 的条件下, 上式变为

$$h^{11/3} = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} \xi_i^2 h_i^{11/3} / n_i}{\xi^2 / n} \quad (4)$$

按照输沙量相等有

$$\frac{B^{11/6} (3m+1)^{-5m} J^{3m+1/2}}{\xi^{5/3} (3m+1)^{-4m} n^{3m+1}} = \sum_{i=1}^{m_1} \frac{B_i^{11/6} (3m+1)^{-5m} J_i^{3m+1/2}}{\xi_i^{5/3} (3m+1)^{-4m} n_i^{3m+1}} \quad (5)$$

在坡降相等  $J = J_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m_1$ ) 的条件下, 上式变为

$$\frac{B^{11/6} (3m+1)^{-5m}}{\xi^{5/3} (3m+1)^{-4m} n^{3m+1}} = \sum_{i=1}^{m_1} \frac{B_i^{11/6} (3m+1)^{-5m}}{\xi_i^{5/3} (3m+1)^{-4m} n_i^{3m+1}} \quad (6)$$

上述(3)式和(5)式是在一般条件下与分汊河道等量的单一河道的水深与河宽公式, 而(4)式和(6)式则是在坡降相等的条件下, 等量的单一河道的水深与河宽公式。严格地讲, 在一般多汊河道上各汊的坡降是不相等的, 但在计算河段取的较短时, 作为近似结果可以认为各汊坡降相等。由于在一般情况下, 水流挟沙力公式中的指数  $m \approx 1$ , 故(5)式和(6)式可分别由下

述(7)式和(8)式代替

$$B_{\frac{7}{3}} = \frac{\xi_{\frac{8}{3}} n^4}{J^2} \sum_{i=1}^{m_1} \frac{B_i \frac{7}{3} J_i^2}{\xi_{\frac{8}{3}} n_i^4} \quad (7)$$

$$B_{\frac{7}{3}} = \xi_{\frac{8}{3}} n^4 \sum_{i=1}^{m_1} \frac{B_i \frac{7}{3}}{\xi_{\frac{8}{3}} n_i^4} \quad (8)$$

在(8)式中  $n_i$  的确定是较为复杂的, 为简化计算, 在布河计算中设  $n_i \approx n_0$ , 由此带来的误差将在下述的  $n_0/n$  的确定中加以消除。由(4)式和(6)式得

$$\xi = \frac{\sqrt{B}}{h} = \xi_{\frac{8}{3}}^{\frac{8}{7}} \left( \frac{n}{n_0} \right)^{\frac{4}{7}} \frac{\left( \sum_{i=1}^{m_1} \frac{B_i \frac{7}{3}}{\xi_{\frac{8}{3}}} \right)^{\frac{3}{14}}}{\left( \sum_{i=1}^{m_1} \xi_{\frac{8}{3}}^2 h_i^{\frac{11}{3}} \right)^{\frac{1}{14}}}$$

即

$$\xi = \left( \frac{n_0}{n} \right)^5 \frac{\left( \sum_{i=1}^{m_1} \xi_{\frac{8}{3}}^2 h_i^{\frac{11}{3}} \right)^{\frac{3}{14}}}{\left( \sum_{i=1}^{m_1} \frac{B_i \frac{7}{3}}{\xi_{\frac{8}{3}}} \right)^{\frac{1}{6}}} \quad (9)$$

这样在并汉计算时只要先取定  $n_0/n$  和已知的各支汉的  $B_i$  和  $h_i$  (即已知  $\xi_i$ ) 后, 可由(9)式求出  $\xi$ , 再由(4)式求出  $h$ , 并按  $B = \xi^2 h^2$ ,  $A = Bh$  依次求出并汉后等量单一河道断面形态时的各项参数。在布河并汉计算中, 为了确定  $n_0/n$  的取值, 曾采用不同的  $n_0/n$  值计算水面线, 与实测水面线比较, 当  $n_0/n = 1.05$  时, 两者十分吻合, 误差最大不超过  $\pm 5\%$ , 最后确定  $n_0/n = 1.05$ 。

## 2.2 分滩槽迭加计算水面线

通常一维数学模型水面线计算是将滩槽视为一个整体进行计算, 由于布河洪水上滩后, 河宽急剧增大, 滩上阻力也比河槽中大得多。因此, 采用将滩、槽分开计算水面线的方法, 对恒定均匀流由曼宁公式有

$$J = \frac{Q}{\left( \int \frac{h_i^{5/3}}{n_i} dB \right)^2} \quad (10)$$

将(10)式写成差分形式为

$$H_{i,j} = H_{i,j+1} + \frac{\Delta x_j}{2} \left\{ \frac{Q_{i,j+1}^2}{\left[ \sum_{m_2=1}^3 \frac{1}{n_{jm_2}} \frac{f_{A_{i-1,j+1,m_2}} (H_{i,j+1})^{\frac{5}{3}}}{f_{B_{i-1,j+1,m_2}} (H_{i,j+1})^{\frac{2}{3}}} \right]^2} + \frac{Q_{i,j}^2}{\left[ \sum_{m_2=1}^3 \frac{1}{n_{jm_2}} \frac{f_{A_{i-1,j,m_2}} (H_{i,j} + \Delta a_{i,j,m_2})^{\frac{5}{3}}}{f_{B_{i-1,j,m_2}} (H_{i,j})^{\frac{2}{3}}} \right]^2} \right\} \quad (11)$$

式中  $m_2$  为断面分割数, 在此取  $m_2 = 3$ , 即将断面划分成三部分: 第一部分和第二部分为稳

定河宽以内对半分,第三部分为稳定河宽以外部分,其中第一和第二部分的糙率采用河槽糙率,第三部分的糙率采用滩上糙率。所谓稳定河宽以内即为河槽,稳定河宽以外即为滩地,稳定河宽即为滩槽的分界线。 $f_A(H)$  是断面面积~高程关系, $f_B(H)$  是断面宽度~高程关系, $\Delta a_{ij}$  为  $i$  时段的横断面冲淤面积。

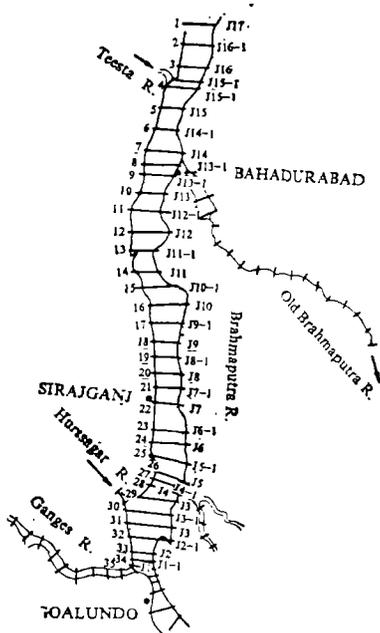


图 1 计算断面布置示意图

Fig. 1. Sketch of calculation cross section

## 2.3 计算原始资料的选取

计算的进口断面设在  $J-17$  断面,如图 1 所示。在进口断面上没有水文站,而与之相距约 40km 处的巴站水沙资料较为齐全。考虑到进口断面与水文站之间支流的入汇和分流所带入和带出的水量和沙量均较小,经分析实测资料,误差在 5% 以下,故直接将巴站的水沙资料引用为进口断面的资料。

### 2.3.1 泥沙资料的插补与计算时段的划分

巴站的逐年水位流量资料较为完整,年沙量资料则不够完整,根据实测流量与输沙率关系进行插补,为了使插补资料具有较好的代表性,采用多年平均的流量与输沙率的关系进行插补。

在计算过程中,根据进口流量、含沙量年内的变化情况,每年划分了 60 个时段,其中非汛期 10d 一个时段,汛期 5d 一个时段,最大流量时,1d 一个时段。

### 2.3.2 床沙和悬沙级配

由于布河缺乏详细的床沙级配资料,计算中采用了 1990 年中孟泥沙专家商定的由孟方取得的下水床沙资料。

布河缺乏实测的有代表性的悬沙级配资料,经分析比较,认为已有的一些实测悬沙级配均不具有代表性,考虑到我国长江的泥沙组成与布河较为相似,故采用了与布河床沙相应的长江新厂站的平均悬沙级配作为计算进口断面悬沙级配。另外,也采用了布河的部分实测悬沙级配进行对比计算。

### 2.3.3 挟沙能力系数的确定

鉴于布河泥沙资料不足,难以根据实测资料建立挟沙能力关系。计算中采用的挟沙能力系数  $K$  是由试算巴站的输沙量与实测值比较,取两者基本一致时的  $K$  值,最后确定  $K = 0.018$ 。

### 2.3.4 河段糙率确定

由水面线反求出的河槽糙率值在 0.017~0.055 之间,相应的滩上糙率约为槽中糙率的 2 倍。从试糙结果可见:第一、糙率随流量增加而减小,这反映了冲积河道的一般特性,其原因是随着流量增大,沙波减弱以至消失,故糙率逐步减小,向粒径糙率趋近;第二、由于按单一河道并了汉,各汉长度不完全一样,其比降就不一样,以及其它一些因素,使计算的糙

率略有增大，经水面线计算比较，如前所述误差一般不超过  $\pm 5\%$ 。

### 3 验证计算结果及整治预报

#### 3.1 验证计算结果及与实测资料的对比

用数学模型对布河1965年7月~1989年7月共计24a的水沙及河道变化进行了验证计算。计算得到的巴站第24a末(1989年7月)悬移质输沙量为123.17亿t，与实测值120.47亿t相比误差在5%以下。

图2为由数学模型计算得到的巴站逐年累积悬移质输沙量与实测值的对比。由图可见，在计算的资料系列24a内总输沙量和各年累积输沙量与实测值基本相符。

巴站计算水位与实测水位的对比结果表明：第1年两者相差一般为 $\pm 0.1\sim 0.3\text{m}$ ，最大相差0.5m左右，小流量时偏低，大流量时偏高；第12年两者水位一般相差0.05~0.15m左右，最大相差0.2m；在第20年两者水位基本接近，只是在大流量时水位偏高0.2m左右；第24年计算水位一般较实测水位偏高0.1m左右。从以上水位验证结果可见，除最初几年的调整阶段外，其余年份计算值与实测值相符较好。

表1为计算的沿程冲淤变化与实测资料对比，由表可见，从全河段的累积冲淤量看，在 $J_2\sim J_{17}$ 断面之间，计算值与实测值相符较好。另外，在总的冲淤量中，滩上总是淤积的，且占总淤积量的40%左右。

从以上几方面的验证对比可见，计算值与实测值相符较好，计算中所采用的参数可作为预报计算时的参数。

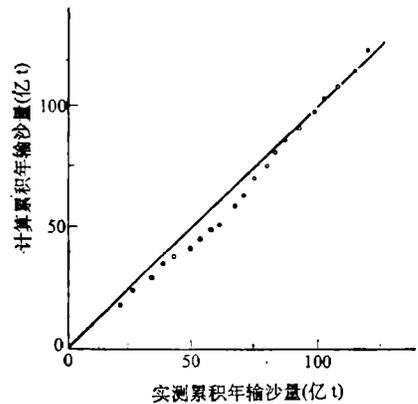


图2 计算与实测累积年输沙量对比  
Fig. 2. Comparison between calculation and measured suspension transport rate

表1 计算沿程冲淤量与实测值对比

Table 1. Comparison between calculation and measured amount of sediment deposition

项目	时段(a)	累积冲淤量(亿 $\text{m}^3$ )	滩上累积冲淤量(亿t)
计算值	12	-1.8	1.85
	24	6.08	3.11
实测值	12	-1.88	
	24	6.11	

#### 3.2 整治方案的计算结果及预报

共采用4种断面整治方案进行计算<sup>①</sup>，其中方案1和方案2没有滩地，仅作为参考比较用。

① 韩其为，胡春宏。布河河道一维数学模型验证计算及整治预报。水利水电科学研究院，1991

方案3和方案4有滩地,但方案4的滩地较方案3小。在稳定河宽范围内河槽冲淤均可发生,稳定河宽以外则只淤不冲。在实际的河道束窄过程中,显然只淤不冲的高滩地应是逐渐扩大的。因此可以认为实际整治后的冲淤情况介于整治方案3和方案4之间。

通过对各种整治方案在原水沙条件下的计算结果与验证方案的比较表明,在整治河段河槽冲刷量均有所增加,而滩上淤积量也有所增加,这反映了泥沙的横向搬家。作为实际整治方案,有滩地的方案3和方案4更现实一些,取两个方案的平均较能反映实际情况。这两个方案平均后,整治河段主槽中冲刷量为1.13亿t,较不整治时的淤积6.29亿t少淤了7.42亿t。

整治后的水位在中小流量( $3000\text{m}^3/\text{s}$ 以下)时各方案均降低,而在大流量( $40000\text{m}^3/\text{s}$ 以上)时各方案水位则提高,说明采用束窄断面的整治方案,中小流量比大流量时为好。

## 4 计算中影响因素的敏感分析

### 4.1 流量和含沙量的敏感性

将进口流量和含沙量分别比验证方案增大和减小10%时,计算得到的总累积冲淤量结果表明:当流量增大5%时,总累积冲刷量增加或总淤积量减少。在第12年末,较验证方案多冲刷1.18亿t,多冲了50%。在第24年末,较验证方案少淤0.24亿t,少淤了7%。当流量减少10%时,情况正好相反,在第24年末多淤了30%。含沙量增大10%时,第24年末多淤了70%;而含沙量减小10%时,第24年末少淤了54%。

在流量增大时,河段总累积冲刷增加,而滩上淤积也增加<sup>①</sup>,反映了河槽冲刷后,河底降低,使冲刷起来的泥沙在向下输送过程中产生横向输沙,向滩上输送,使滩地淤积;同样,在流量减小时,河段总淤积量增加,而滩上淤积减小,说明主槽淤积增加,河道输沙量减小,滩上淤积也就减小了。

### 4.2 糙率的敏感性

将全河段糙率同时增大和减小10%时,计算所得的累积冲淤量结果表明:当糙率增大10%时,全段阻力增加,水流流速减小,水流挟沙能力降低,河床发生淤积,第24年末,较验证方案多淤7.07亿t,多淤了7.5%;当糙率减小10%时,情况则相反,第24年末,较验证方案少淤7.08亿t,少淤了7.5%。

### 4.3 悬沙级配的敏感性

通常取多年平均悬沙级配作为进口断面的悬沙级配,这个级配的代表性如何,将直接影响计算结果。根据表2中的3种悬沙级配计算得到的累积冲淤量结果表明:悬沙级配对冲淤变化是很灵敏的,级配粗细略有差别,冲淤量差别就很明显,前12年最粗和最细级配的计算累积冲淤量相差范围约为4亿t,而到第24年末计算累积冲淤量可相差约20亿t,前12年以冲刷为主,后12年以淤积为主。可见淤积时级配变化所造成的影响更大,这主要是由于冲刷时床沙变粗较快,挟沙能力级配变粗也较快,很快就抑制住了冲刷速率。而淤积时情况则

<sup>①</sup> 胡春宏,韩其为.布河河道冲淤计算敏感性分析.水利水电科学研究院,1991

相反，可使淤积速率变得很快，造成更多的淤积。

表2 3种悬沙级配

Table 2. Size distributions of suspension sediment

编号	某粒径组百分数								粗细程度
	<0.005	0.005 ~0.01	0.01 ~0.025	0.025 ~0.05	0.05 ~0.1	0.1 ~0.25	0.25 ~0.5	0.5 ~1.0	
1	0.1	0.161	0.212	0.197	0.19	0.109	0.031	0	细
2	0.0565	0.095	0.3085	0.221	0.203	0.106	0.01	0	中
3	0.04	0.06	0.12	0.28	0.35	0.120	0.025	0.005	粗

#### 4.4 挟沙能力系数的敏感性

通常挟沙能力系数是由实测水流挟沙能力关系确定，但如缺乏实测资料，就需根据经验或计算来反求。

通过将挟沙能力系数从0.016增大到0.02，计算第12年末的累积冲淤量结果可见，全河段累积冲刷量是逐渐增大的，从 $K=0.016$ 到0.017，多冲刷了198%，从0.017到0.018多冲刷了20%，从0.018到0.019多冲刷了73%，从0.019到0.02多冲刷了18%。同样，从第24年末的情况可见，随挟沙能力系数的增大，全河段累积淤积量逐渐减小。

在上述的挟沙能力系数变化计算中，全河段仍采用统一的挟沙能力系数，但事实上，随着冲淤变化，以及河床的密实程度不同，沿程和沿时挟沙能力系数可能也不同，这在计算中也是需要考虑的，我们曾根据冲淤幅度来校正挟沙能力系数，具体方法是，最初的挟沙能力系数 $K_1=0.018$ ，计算后根据冲淤来定校正系数 $K_2$ ，校正后的挟沙能力系数为

$$K = K_1 \cdot K_2 \quad (12)$$

其中

$$K_2 = \begin{cases} 0.7 & \Delta Z \leq 6 \\ 0.7 + 0.18(\Delta Z - 6) & 6 < \Delta Z \leq 7 \\ 0.88 + 0.12(\Delta Z - 7) & 7 < \Delta Z \leq 8 \\ 1.0 & \Delta Z > 8 \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\Delta Z$ 为冲淤层数，在原始状态下，给出8层， $\Delta Z$ 小于8就表明发生了冲刷， $\Delta Z$ 大于8表明发生了淤积。通过以上校正方法可以限制冲刷或淤积，使之更加符合实际。

除了上述因素外，床沙级配、初始淤积物厚度、断面的选取、稳定河宽的确定，推移质的考虑及其它一些因素，都对计算结果有着不同程度的影响。

## 5 结 语

(1) 对于支叉众多的游荡性河道，在计算中采用输水量和输沙量相等的条件进行并汉，并成单一河道进行数学模型计算，在理论上是有根据的，在实际计算中也是可行的。对于较为宽浅、滩地比例较大的河道，采用分滩槽迭加计算水面线是合理的。

(2) 从对一些问题的处理后进行的数学模型计算结果来看，在总输沙量、水位~流量关系和累积冲淤量3个方面，同实测资料比较都取得了较为满意的结果。

(3) 从所采用的整治方案计算结果看, 整治后的槽中将发生冲刷或减少淤积, 滩地上淤积将增加, 并使得整治后河道水位变幅加大。

(4) 各个因素在不同程度上都将对计算结果产生一定的影响, 其中悬沙级配和挟沙能力系数等参数较为敏感。因此对这些参数的确定必须保证符合实际。

### 参 考 文 献

- 1 韩其为. 悬移质不平衡输沙的研究. 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集, 北京: 光华出版社, 1980. 793~802
- 2 韩其为, 何明民. 水库淤积与河床演变的(一维)数学模型. 泥沙研究, 1987(3): 14~29

## Calculation Results and Sensitivity Analysis of Channel Deformation on the Brahmaputra River in Bangladesh

Hu Chunhong and Han Qiwei

*(Institute of water conservancy and Hydroelectric power Research)*

**Abstract:** Some characteristics of a mathematical model simulating the channel deformation of the Brahmaputra River in Bangladesh are described. Under the assumption that the water conveying and sediment carrying capacities in prototype and normalized channels are equal, a single equivalent channel is adopted as a calculating section. Based on analysis and comparison of measured data, some sediment missing datum are determined. The calculation results of the model agree well with the deformation of the river channel observed during 1965—1989. Then, river channel deformation under different regulations schemes is predicted. Finally, the sensitivity analysis is carried out, and some sensitive factors are pointed out.

**Key words:** Brahmaputra River; sediment; mathematical model.

### 《农业科技通讯》1994年征订启事

《农业科技通讯》是中国农业科学院主办的中央级农牧业综合性科技期刊, 面向全国, 面向基层, 面向生产, 报道农牧业新成果、新产品, 传播最新致富技术和信息。

《农业科技通讯》为月刊, 每期定价2.00元, 全年定价24元。全国各地邮局自10月下旬开始办理订 阅 手 续, 邮发代号: 2—602。

读者对象: 农牧业科技人员、推广人员、基层干部、科技户、专业户、农村青年、院校师生和与农业有关的人员。

《农业科技通讯》编辑部