

HUANGHE ZHONGYOU HONGSHUI TIAOKONG
MONI JISHU YU YUCE FENXI

黄河中游洪水调控 模拟技术与预测分析

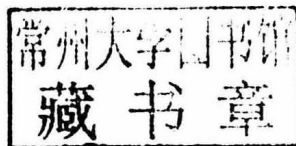
窦身堂 张原锋 张防修 著



黄河水利出版社

黄河中游洪水调控模拟技术与 预测分析

窦身堂 张原锋 张防修 著



黄河水利出版社
· 郑州 ·

图书在版编目(CIP)数据

黄河中游洪水调控模拟技术与预测分析/窦身堂,张原锋,张防修著. —郑州:黄河水利出版社,2017. 12

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1932 - 7

I. ①黄… II. ①窦…②张…③张… III. ①黄河流域 - 洪水调度 - 研究 IV. ①TV872

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 324246 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9

字数:162 千字

印数:1—1 000

版次:2017 年 12 月第 1 版

印次:2017 年 12 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

前 言

高含沙洪水是造成黄河下游河道严重淤积和洪水灾害的主要因素。高含沙水流含沙量高、来沙量大,短时间内会造成河道强烈淤积,同时也常常造成河道整治工程险情,给黄河防洪造成巨大压力。小浪底水库修建后,用现状干支流水库群的水沙调控能力,对不同来源区洪水泥沙进行时间和空间的调控,塑造有利于水库排沙和河道输沙的协调水沙关系,是实现水库和河道减淤、缓解不利河道形态所带来的防洪压力的有效措施。因此,建立黄河中游水库调控数学模型、水库水沙输移动力学模型和下游河道水沙演进数学模型形成高含沙洪水的综合模拟技术,并对黄河中游高含沙洪水进行分类调控与预测分析,对水库长期发挥调水调沙作用、减少河道和水库泥沙淤积等十分重要。

本书基于高含沙洪水水沙输移规律,结合历史典型洪水实测资料分析,研究黄河中游高含沙洪水输移与调控方案。主要包括数学模拟技术、水库水沙调控措施和调控效果分析3部分内容,共7章。本书得到“十二五”科技支撑计划项目“黄河中下游高含沙洪水调控关键技术研究”(2012BAB02B02)和水利部公益性行业专项“基于云服务的水利仿真计算系统生成平台”(201401033)的资助。

主要内容如下:

第1章介绍了黄河中游高含沙洪水的基本特性及未来变化趋势,并对高含沙洪水进行了分类。

第2章为高含沙洪水在水库与河道中演进的关键问题及模拟方法,包括水库溯源冲刷、干支流倒灌淤积及异重流输沙等,下游河道的水动力演进机制分析,以此为基础,建立了下游高含沙洪水的相关数学模型及模拟技术。

第3章为高含沙洪水的调控思路,根据水沙调控指标,针对不同类型的高含沙洪水,提出不同类型高含沙洪水的调控思路及调控技术方案。

第4章和第5章为针对不同类型高含沙洪水的调控方案效果分析,包括库区冲淤变化、下游河道冲淤及河槽调整的对比,并分析拟建古贤水库的调节作用。

第6章为利用数学模拟技术,以小浪底水库优化运用及库区形态优选为目标,提出有利于保持优选库容形态的水库调度模式,延缓水库淤积速度,调

整淤积形态,有效利用支流库容,发挥水库综合效益。

第7章为结论。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏与不足,欢迎读者提出宝贵意见。

作 者

2017年8月

目 录

前 言

第 1 章	高含沙洪水特点与分类	(1)
1.1	高含沙洪水变化特点	(1)
1.2	高含沙洪水分类	(2)
第 2 章	高含沙洪水冲淤过程模拟方法	(4)
2.1	黄河下游高含沙洪水演进动力学模型	(4)
2.2	水库溯源冲刷及模拟方法	(9)
2.3	水库 - 河道高含沙洪水数学模型验证	(14)
第 3 章	高含沙洪水调控思路	(27)
3.1	总体思路	(27)
3.2	调控背景	(27)
3.3	水沙系列	(28)
3.4	数学模型计算边界条件	(34)
第 4 章	高含沙洪水调控基础方案	(35)
4.1	三门峡水库调控方案	(35)
4.2	小浪底水库调控基础方案(拦沙后期推荐方式)	(36)
第 5 章	高含沙洪水调控比选方案	(42)
5.1	第一类高含沙洪水方案	(42)
5.2	第二类高含沙洪水比选方案	(57)
5.3	第三类高含沙洪水方案	(64)
5.4	长系列高含沙洪水年调控方案	(71)
5.5	古贤水库调控高含沙洪水作用分析	(82)
第 6 章	小浪底水库运用措施优化	(90)
6.1	小浪底水库运用措施优化方案	(90)
6.2	方案计算结果分析及对比	(91)
第 7 章	结 论	(137)

第1章 高含沙洪水特点与分类

1.1 高含沙洪水变化特点

黄河水沙发生了显著变化,从长时间序列来看,水沙变化趋势一致。径流、泥沙明显减少,但是水沙变化的幅度不同。图 1-1 为 1961 ~ 2013 年黄河中游控制水文站潼关站的年径流量、输沙量累计变化过程。根据各年径流、泥沙变化趋势,潼关站水沙变化可分以下阶段:1961 ~ 1969 年,年径流量为 454 亿 m^3 、年输沙量为 15.1 亿 t;至 1970 ~ 1980 年,年径流量、年输沙量分别减少为 360 亿 m^3 、11.9 亿 t;1981 ~ 1985 年,黄河出现少有的连续丰水少沙年,年径流量增加为 443 亿 m^3 ,输沙量不但没有随之增加,反而继续衰减至 7.7 亿 t;1986 ~ 1997 年,径流量开始大幅度减少,减少为 264 亿 m^3 ,输沙量仍为 7.7 亿 t 左右;1998 ~ 2009 年,径流量进一步减少,年均 205 亿 m^3 ,为有实测资料以来最枯值,随着径流量的显著减少,输沙量进一步减少,减少幅度增大;1998 ~ 2005 年年输沙量减少为 4.5 亿 t,2006 ~ 2013 年输沙量进一步减少,减少幅度更大,年均值达历史最少值 2.0 亿 t,这一阶段输沙量相对稳定,年际之间变幅减小;尽管 2010 ~ 2013 年径流量增加为 293 亿 m^3 ,增加幅度明显,但是输沙量并没有明显的同步增加趋势。总之,尽管水沙均为减少,二者变化并不同步,泥沙减少的趋势性更强,相对稳定,减少的幅度与径流减少幅度不一致,变化时间滞后于径流变化。

高含沙洪水变化过程与径流、泥沙变化基本一致,洪水频次减少,洪峰流量、含沙量减小,依据高含沙洪水水量、沙量变化趋势(见图 1-2),可分为如下阶段:1961 ~ 1979 年,黄河高含沙洪水频发,潼关站共发生高含沙洪水 52 次,年均 2.6 次,最大洪峰流量 15 400 m^3/s ,最大含沙量 911 kg/m^3 (1977 年)。该阶段年均高含沙洪水水量 33 亿 m^3 、沙量 5.5 亿 t,1977 年高含沙洪水沙量最大。1980 ~ 1987 年,高含沙洪水场次锐减,潼关站仅发生高含沙洪水 8 场次,年均 1 次,年均高含沙洪水水量 8.3 亿 m^3 、沙量 0.2 亿 t。1988 ~ 1999 年,高含沙洪水场次开始明显增加,发生 27 次,年均 2.3 次,最大含沙量为 1997 年 8 月的 481 kg/m^3 ,该阶段年均高含沙洪水水量 23 亿 m^3 、沙量 3.5 亿 t。2000 ~ 2005 年,高含沙洪水场次又开始减少,发生高含沙洪水 9 次,年均 1.5

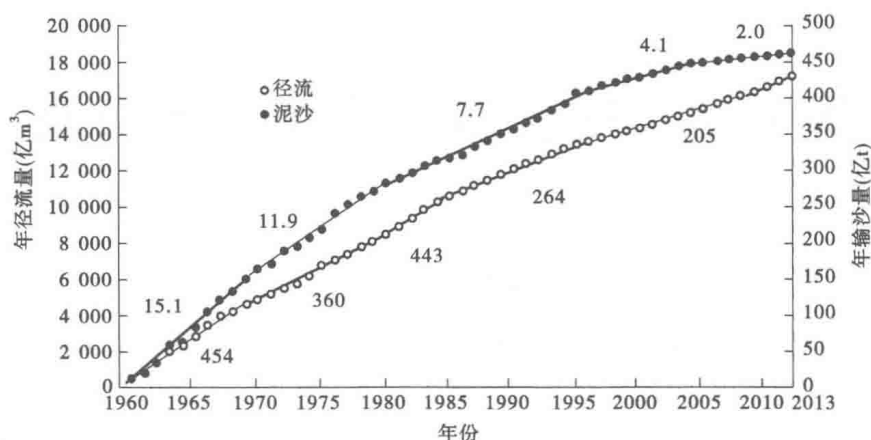


图 1-1 潼关站径流、泥沙累计变化过程

次,最大含沙量发生在 2003 年 7 月,为 431 kg/m^3 ,年均高含沙洪水量 9.0 亿 m^3 ,沙量 1.2 亿 t ,该阶段高含沙洪水的减少主要表现为洪水量及洪水沙量的减少。2006~2013 年,黄河高含沙洪水发生显著变化,无论高含沙洪水频次、量级均明显减少,该阶段仅 2010 年发生一次高含沙洪水,洪峰流量 $2\,770 \text{ m}^3/\text{s}$,最大含沙量 361 kg/m^3 ,年均水量 1.2 亿 m^3 、沙量 0.1 亿 t 。

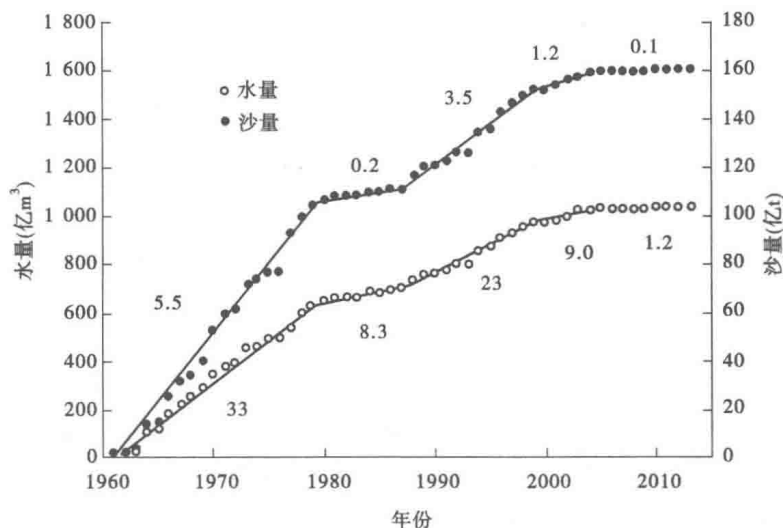


图 1-2 潼关站高含沙洪水水量、沙量累计变化过程

1.2 高含沙洪水分类

小浪底水库投入运用后,水库防御大洪水的能力明显加强,但是拦沙能力

仍然有限,高含沙洪水对水库、下游河道淤积的影响最为明显。不同量级的高含沙洪水,在水库与河道的冲淤特性不同。洪峰流量与洪水沙量是高含沙洪水的重要特征指标,洪峰流量较大的漫滩高含沙洪水,黄河下游滩地往往产生大量淤积,有时会发生淤滩刷槽现象;一般高含沙洪水,河道主槽发生严重淤积;洪峰流量较低的高含沙小洪水,淤积主要发生在花园口以上河段的主槽。

洪水沙量直接影响水库河道的冲淤量,是水库调控运用的重要考量指标。从图 1-3 可以看出,对于黄河下游高含沙洪水而言,当洪水沙量大于 10 亿 t 时,一般为漫滩洪水;当洪水沙量小于 4 亿 t 时,洪水水量小于 20 亿 m^3 时,一般为高含沙小洪水。根据黄河下游高含沙洪水冲淤特性及三门峡水库、小浪底水库运用特点,将黄河高含沙洪水初步分为三类,来沙量大于 10 亿 t 的漫滩高含沙洪水、来沙量在 4 亿 ~ 10 亿 t 的中等高含沙洪水、来沙量小于 4 亿 t 的高含沙小洪水。第一类洪水,往往在黄河下游造成大范围的漫滩,滩地大量淤积,主槽淤积较少甚至发生冲刷,这类洪水以 1977 年高含沙洪水为代表。第二类洪水,黄河下游主槽以淤积为主,高含沙洪水随流量的增加,主槽输沙能力增加,淤积相对减少,接近平滩流量,输沙能力最大,这类洪水以 1989 年高含沙洪水为代表。第三类洪水,为高含沙小洪水,洪水流量一般不超过 2 600 m^3/s ,高含沙洪水在下游主要表现为主槽淤积,但是因洪水沙量不大,淤积量也不大,且主要淤积在花园口以上河段。洪水花园口以上河段的淤积,一般在非洪水期及非汛期,能够被逐渐输往下游。小浪底水库运用以来,这类洪水很多,如 2002 年的高含沙洪水。

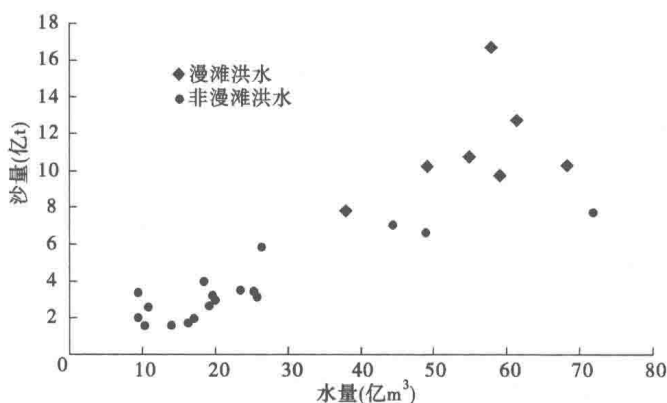


图 1-3 黄河下游高含沙洪水水量、沙量关系

第2章 高含沙洪水冲淤过程模拟方法

2.1 黄河下游高含沙洪水演进动力学模型

黄河下游高含沙水流,有时出现洪峰流量沿程增加的独特现象。为描述高含沙洪水的独特行为,需要考虑高含沙洪水含沙量沿程显著调整与河道大幅冲淤的影响。为此,应用守恒形式的浑水运动控制方程,描述沿程浑水密度差异、河道冲淤作用、重力和阻力调整等因素的影响,并基于特征线理论,分析变量沿特征线传播的物理本质,描述高含沙洪水演进的独特现象,揭示其内在的动力学机制。

2.1.1 洪水演进基本方程

考虑浑水密度空间不均匀性的水流控制方程包括连续方程和动量方程。
浑水连续方程

$$\frac{\partial(\rho_m A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m Q)}{\partial x} = - \frac{\partial(\rho'_s A_s)}{\partial t} \quad (2-1)$$

浑水动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_m Q)}{\partial t} - \left(\frac{Q^2}{A^2} - gh \right) \frac{\partial(\rho_m A)}{\partial x} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial(\rho_m Q)}{\partial x} \\ & = \left[\rho_m g h^2 \frac{\partial B}{\partial x} + g A (h - h_c) \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \right] + U \frac{\partial}{\partial t} (\rho'_s A_s) + (G' - T) \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中: A 和 A_s 分别为过水面积和床面冲淤面积; B 为河宽; h 和 h_c 分别为水深和形心处水深, h 可表示为 A/B , h_c 近似取 $0.5h$; Q 为断面流量; U 为断面平均流速,可表示为 Q/A ; g 为重力加速度; ρ_m 为浑水密度; ρ'_s 为混合层泥沙密度; G' 为重力在水流方向的分量; T 为阻力。

根据控制方程的特征线(见图2-1)和相容方程,通过数学推导,得出流量 Q 和过水面积 A 的表达式(2-3)。需要说明的是,这里的流量 Q_F 和过水面积 A_F 并未被独立显式表达。

$$\begin{cases} Q_F = Q_M + \alpha_1 Q_M + \alpha_2 [(\rho_m Q)_M - (\rho_m Q)_N] + \alpha_3 [(\rho_m A)_M - (\rho_m A)_N] + \alpha_4 \Delta t \\ A_F = A_M + \beta_1 A_M + \beta_2 [(\rho_m A)_M - (\rho_m A)_N] + \beta_3 [(\rho_m Q)_M - (\rho_m Q)_N] + \beta_4 \Delta t \end{cases} \quad (2-3)$$

其中

$$\alpha_1 = \frac{(\rho_m)_M}{(\rho_m)_F} - 1$$

$$\beta_1 = \frac{(\rho_m)_M}{(\rho_m)_F} - 1$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{(\rho_m)_F} \left(\frac{Q/A - \sqrt{gh}}{2\sqrt{gh}} \right)_F$$

$$\beta_2 = -\frac{1}{(\rho_m)_F} \left(\frac{Q/A + \sqrt{gh}}{2\sqrt{gh}} \right)_F$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{(\rho_m)_F} \left(\frac{-Q^2/A^2 + gh}{2\sqrt{gh}} \right)_F$$

$$\beta_3 = \frac{1}{2(\rho_m \sqrt{gh})_F}$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{(\rho_m)_F} \left\{ \left[\rho_m g h^2 \frac{\partial B}{\partial x} + g A (h - h_c) \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \right] + U \frac{\partial}{\partial t} (\rho'_s A_s) + (G' - T) \right\}_F$$

$$\beta_4 = \frac{-\frac{\partial}{\partial t} (\rho'_s A_s)}{(\rho_m)_F}$$

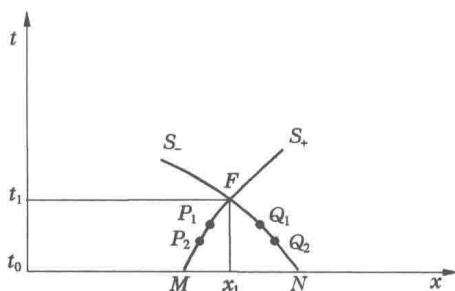


图 2-1 信息沿特征线传播示意图

2.1.2 洪水演进动力学机制

由式(2-3)和图 2-1 可以看出,在以对流输运为主的洪水演进过程中,一般仍由上游对流通量起主导作用,即 F 点的流量 Q_F 主要由上游流量 Q_M 决定(右端第一项),并在外界条件的综合作用下进行沿程调整(右端后四项)。

该式中, $\alpha_1 Q_M$ 是流体密度变化项,反映流体密度变化对流体体积变化的影响。对于由清水和泥沙组成的不可压缩流体而言,其密度变化是由水体泥沙与床面泥沙的不平衡交换引起的,在不考虑浑水中水沙相变的情况(含沙

量增减不会使水体体积发生明显变化)下,该项可不计入。但是,由水体泥沙与床面泥沙的不平衡交换(沿程冲淤)引起的动量交换和附加力则应被考虑。

$\alpha_2[(\rho_m Q)_M - (\rho_m Q)_N]$ 为对流输运不平衡项,反映对流通量不平衡对洪峰传播的影响。缓流时,该项系数 $\alpha_2 < 0$, 在涨水阶段一般有 $[(\rho_m Q)_M - (\rho_m Q)_N] > 0$, 对上游传递的大流量有削减作用;在落水阶段 $[(\rho_m Q)_M - (\rho_m Q)_N] < 0$, 对上游传递的小流量有增补作用。该项间接反映了河段槽蓄调洪作用。

$\alpha_3[(\rho_m A)_M - (\rho_m A)_N]$ 可表示为 $\alpha_3 \frac{1}{g}[(\gamma_m h B)_M - (\gamma_m h B)_N]$, 反映了压力能沿程变化对洪水演进的影响,可与动能相互转化。当上游浑水密度大于下游浑水密度时,促进水流运动;反之,则抑制水流运动。洪水涨峰阶段,含沙量迅速增加(特别是人工调控洪水,随着异重流出库含沙量骤然增加),河段上游浑水密度显著大于下游。即使在沙峰传播的过程中,高含沙洪水淤积、含沙量减少,沿程密度梯度依然存在,指向下游的压力作用加强,促使水流向下游运动。

$\alpha_4 \Delta t$ 为外力对水流演进的时间累积效应。主要包括压力剩余项、冲淤引起的动量交换项、重力作用和阻力项。压力剩余项是由河宽和浑水密度变化引起的附加项,表达式为 $\rho_m g h^2 \frac{\partial B}{\partial x} + g A (h - h_c) \frac{\partial \rho_m}{\partial x}$, 一般情况下,该项与方程

左端的压力梯度项 $-gh \frac{\partial}{\partial x}(\rho_m A)$ 相比属于次要项,特别是在顺直河道的低含沙情形下,该项趋于0。冲淤引起的动量交换项是指具有动量的水体悬沙沉积于床面止动,或床面静止泥沙被水流起动获得动量过程中,水体与泥沙之间的动量交换。冲刷过程中,床面泥沙起动需从水体获得动量,水体在质量增加的同时减小流速以维持动量守恒;反之,随水体一起运动的悬沙止动于床面过程中,其所具有的动量会在近底转移至水体,在水体质量减小的同时增大流速来保持动量守恒。因此,在淤积状态下,该项促进水流向下游运动;冲刷状态下,该项抑制水流向下运动。这也有助于解释水流在由冲转淤时综合阻力会减小的论断。重力和阻力是促使和阻止水流运动的两个重要方面。重力分量的具体表达式为 $G' = \rho_m g A J_b$ 。可以看出,随着浑水密度的增大,重力在流动方向的分量得到加强,且这种加强随河道比降 J_b 增大而愈加明显。这也有助于解释洪峰增值易出现在河道比降较大的河段。阻力作用直接影响了水流演进速度与传播特征,一般可用 $\rho_m g A \frac{n^2 U^2}{R^{4/3}}$ 表示, n 为曼宁系数,也即综合糙率系

数,反映河道边界及水力因子综合特征。当 n 变大时,水流运动受到抑制;当 n 较小时,水流流动得到加强以平衡重力作用。

从以上分析可见,含沙量沿程分布、槽蓄作用、冲淤作用、重力及阻力调整均为影响洪水传播的关键因素,受其影响,洪水在传播过程中有可能被坦化,也有可能被加强,形成洪峰增值的特殊现象。

2.1.3 黄河下游高含沙洪水洪峰增值原因

2004年8月下旬,小浪底水库下泄了一场最大含沙量 343 kg/m^3 的极细高含沙洪水。2004年8月22日20时,小浪底水库下泄流量为 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$,含沙量为 1.06 kg/m^3 ;至23日0时,异重流排沙出库,此时小浪底水库下泄流量 $1\,540\text{ m}^3/\text{s}$,含沙量增大到 59.7 kg/m^3 ;23日3时12分,流量增至 $2\,530\text{ m}^3/\text{s}$,含沙量增大到 253 kg/m^3 ;23日8时36分,下泄流量达到最大值 $2\,690\text{ m}^3/\text{s}$,此后流量逐步下降;24日0时,下泄流量降至 $2\,210\text{ m}^3/\text{s}$,但含沙量达到 343 kg/m^3 ;30日12时,异重流排沙过程结束。此次洪水期间,小花间支流伊洛河和沁河加水不足 $200\text{ m}^3/\text{s}$,基本没有加沙。小浪底、花园口两站水沙过程见图2-2。

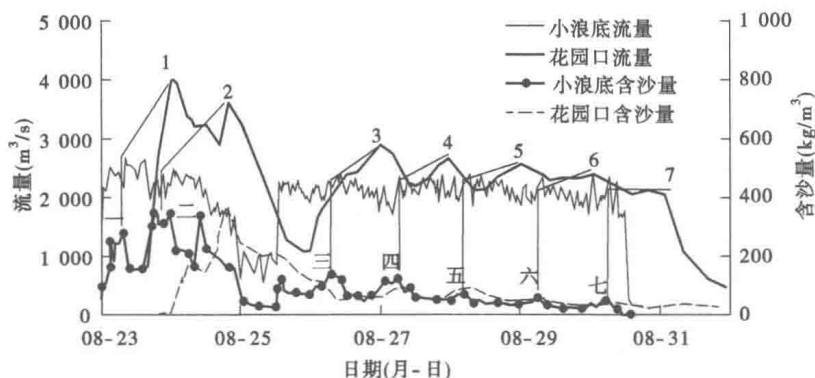


图 2-2 小浪底、花园口两站水沙过程

可以看出,与小浪底出库过程相比,整个洪峰过程中小浪底水文站流量相对平稳,而花园口水文站出现7次明显增值,其中前两次增幅较大,最大增幅达39%;结合小浪底含沙量过程发现,每次花园口流量增值前约20 h(洪水在小花间传播时间),小浪底含沙量均有明显增加,说明含沙量可能是引起下游洪峰增值的关键条件,含沙量变化易引起洪峰的波动。

还可以发现,花园口站流量7次增值中,小浪底流量相差不大,在 $2\,000\sim$

2 690 m³/s 范围内,而前两次增值幅度加大,其对应的小浪底含沙量也较大(第一次沙峰约为 280 kg/m³,第二次沙峰达 359 kg/m³),说明含沙量越大,引起的增值幅度越大。此外,尽管第二次沙峰较大,但小浪底、花园口两站含沙量差值并没有第一次沙峰大,河段沿程密度差产生的压力作用变小,所以第二次沙峰花园口站的增幅并未比第一次大。

浑水密度差异可造成压力梯度沿程变大,促进洪水向下游传播。据测算,“04·8”洪水中花园口河段弗劳德数 Fr 大致为 0.5,平均水深约为 2 m,上游含沙量为 280 kg/m³,下游近似清水,河段过水面积近似取 1 000 m²。该项的定量影响为

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= \alpha_3 [(\rho_m A)_M - (\rho_m A)_N] \\ &= \frac{1}{(\rho_m)_F} \left(\frac{-Q^2/A^2 + gh}{2\sqrt{gh}} \right)_F [(\rho_m A)_M - (\rho_m A)_N] \\ &= \frac{1}{(\rho_m)_F} \left(\frac{1 - Fr^2}{2} \sqrt{gh} \right)_F [(\rho_m A)_M - (\rho_m A)_N] \quad (2-4)\end{aligned}$$

则可计算得由浑水密度差异导致的流量增值 ΔQ_1 约为 600 m³/s,增幅约为 20%。“04·8”洪水中小浪底沙峰演进至花园口并未明显减小,小浪底至花园口区间也未发生明显淤积,含沙量无明显衰减。因此,在该场高含沙洪水中该项影响不大,定量影响表示为

$$\begin{aligned}\Delta Q_2 &= \frac{1}{(\rho_m)_F} U_F \frac{\partial}{\partial t} (\rho'_s A_s)_F \Delta t \\ &= \frac{1}{(\rho_m)_F} \left(U \frac{\Delta(QS)}{\Delta x} \frac{\Delta x}{U} \right)_F \\ &= \frac{(QS)_M - (QS)_N}{\rho_m} \approx 0 \quad (2-5)\end{aligned}$$

高含沙浑水洪峰传播过程中,沿流动方向的压力作用和重力作用是加强的,阻力 T 必须沿程增大以平衡外力的作用。但是,据分析,由于高含沙洪水过程中床沙细化和形态调整,综合阻力系数 n 却是减小的,“04·8”洪水期间花园口糙率由 0.028 下降至 0.018,下降幅度达 30% 以上。因此,从阻力表达式可以看出,当 ρ_m 增大 20%、 n 减小 30%,流量沿程调整趋于平衡时,流量 Q 至少应增加 25% 才能平衡外力的作用;考虑到随着流量增加,过水面积 A 和水力半径 R 亦会有所增加,流量 Q 的增值幅度还有可能更大。

综上所述,尽管压力加强、淤积作用、重力和阻力调整都是造成洪峰增加的影响因素,但“04·8”洪水增值主要是由上游浑水密度较大形成的压力梯

度增加和床面调整后阻力调整所致,若直接单因素相加,“04·8”洪水演进至花园口可增值45%左右,实际增值为39%左右,二者基本一致。

2.2 水库溯源冲刷及模拟方法

小浪底水库输沙状态沿程复杂多变。若遇降水冲刷运用,在水库三角洲顶点附近,常发生溯源冲刷,冲刷效率高,输沙强度大,是水库形态优化和库容恢复的重要方式。在水库近坝段,上游输移的高含沙洪水常能形成异重流排沙出库,输沙能力极强,远高于明渠壅水排沙;顶坡段为沿程冲淤,见图2-3。沿程冲刷、溯源冲刷和壅水排沙具有不同的输沙特征,应分别建立相应的描述方法。

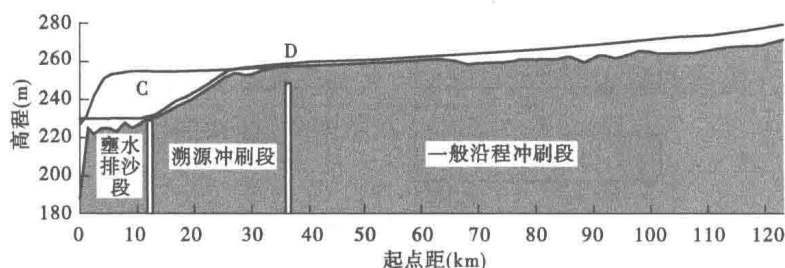


图2-3 水库水沙模式沿程划分

2.2.1 水库模型的要求

采用冲刷类型识别、模块启用的技术,实现库区冲刷过程的统一模拟。库区模型的基本框架见图2-4。首先采用普通水库模型的计算方法,即先不考虑溯源冲刷和异重流,而按照水沙输移自上游向下游的一般原则进行初步计算。然后,依此为基础,判别溯源冲刷是否发生,若发生将该河段按照溯源冲刷模式进行再次计算。最后,进行近坝段浑水输移计算,判断是否有异重流发生,如果发生则调用相应模式。

2.2.2 溯源冲刷的模型改进

溯源冲刷河段水流流速较大,河床冲刷剧烈。若按照通常的沿程冲淤计算模式,即泥沙方程采用不平衡输沙模式 $-\alpha\omega(S^* - S)$ 计算,由于该模式的时空恢复尺度较长而无法反映和模拟冲刷迅速、剧烈发生的情况,需对冲刷模式和底部边界条件另作处理。

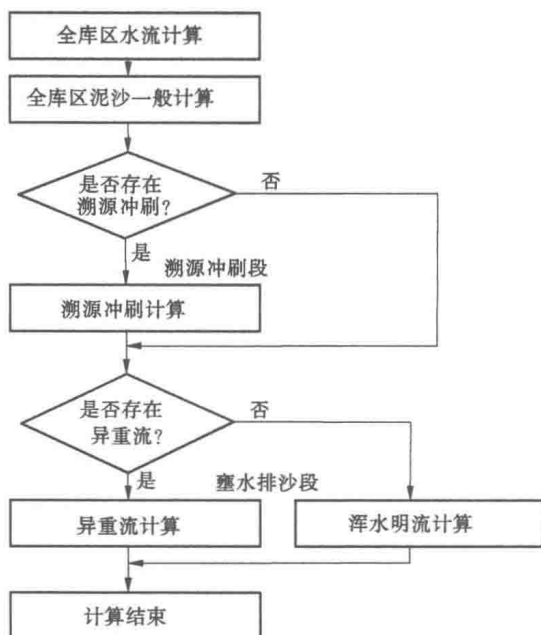


图 2-4 水库模型整体架构设计

溯源冲刷所发生的河床剧烈调整,可以概化为河床滑塌和土体力学失稳的土力学行为与水流挟沙输移的水动力学行为的共同作用。需要考虑水流剪切力、淤积物物理化学特性及河床土力学特性的关系式。

2.2.2.1 溯源冲刷河段控制方程

溯源冲刷河段泥沙基本变量包括输沙率 QS 、河床变形 ΔZb 及冲刷距离 l 。

泥沙连续方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial QS}{\partial x} + \gamma' B \frac{\partial Zb}{\partial t} = 0 & x \in (C, D) & \text{微分形式} \\ \int_C^D \left(\gamma' B \frac{\partial Zb}{\partial t} \Delta T \right) dl = \int_0^{\Delta T} \left(\frac{\partial QS}{\partial x} l \right) dt & & \text{积分形式} \end{cases} \quad (2-6)$$

河床形态(变形)方程:

$$\begin{cases} Zb = Zb(x, t) & x \in (C, D) & \text{河床形态方程} \\ \Delta Zb = \Delta Zb(x, t) & x \in (C, D) & \text{河床变形方程} \end{cases} \quad (2-7)$$

式中,河床形态(变形)仅给出其一般式,具体表达式因概化和简化不同,有不同表达形式; C 、 D 为溯源冲刷发生的上、下临界点; l 为 C 、 D 两点之间的长度,即溯源冲刷发展距离,是溯源冲刷计算的补充变量,也是计算的关键变量。

溯源冲刷距离 l 主要由溯源冲刷段流量 Q 、河宽 B 、比降 J 、时段 ΔT 等决

定,这里同样给出其一般形式如下:

$$l = l(Q, B, J, \Delta T) \quad (2-8)$$

2.2.2.2 溯源冲刷段进、出口条件

一旦进口点 D 的位置确定(不同模式,确定方法不同,后有详述),溯源冲刷段进口泥沙条件便可由上段沿程冲淤水沙演进求得,方程为

$$(QS)_{\text{溯}m} = (QS)_{\text{沿}D} \quad (2-9)$$

溯源冲刷出口(侵蚀基点 C)通常取为坝前水深减去正常水深处,该处冲刷剧烈,可按饱和输沙处理,即输沙量等于输沙力,也借助于经验公式表达,在参数合理取值时,两者为同一值,表达式为

$$(QS)_c = (QS^*)_c \quad \text{或} \quad (QS)_c = \left(\varphi \frac{Q^{1.6} J^{1.2}}{B^{0.6}} \right)_c \quad (2-10)$$

2.2.2.3 溯源冲刷控制方程

利用溯源冲刷段水流条件与河道几何特征定量表达冲刷距离 l 发展的表达式,如韩其为二次曲面假定冲刷距离 l 公式有:

$$l = \sqrt{12} \sqrt{\frac{qs_{C+l}}{\gamma'_s J_{C+l}}} \Delta T \quad (2-11)$$

溯源冲刷河段河床冲刷是在较强的水流条件下,以河床滑塌和土体力学失稳为主。假定河床冲刷的深度与该处水流条件成正比关系,水流条件选取挟沙力因子 $\frac{U^3}{gh}$ 。定义侵蚀基点 C 处的河床变形为 ΔZb_c , 可得如下方程:

$$\Delta Zb(x) = \frac{(U^3/gh)_x^m}{(U^3/gh)_c^m} \Delta Zb_c \quad (2-12)$$

式中, m 可仿照挟沙力计算进行取值。

式(2-12)是关于 C 点河床变形 ΔZb_c 的方程,将该式与冲刷距离方程式(2-11),以及溯源冲刷段进口条件式(2-9)和出口条件式(2-10)代入泥沙连续方程式(2-6)中的积分表达式,可得关于 ΔZb_c 的独立方程式:

$$- \int_c^{C+l} \gamma' B \frac{(U^3/gh)_x^m}{(U^3/gh)_c^m} \Delta c_c dl = \left[\left(\varphi \frac{Q^{1.6} J^{1.2}}{B^{0.6}} \right)_c - (QS)_{\text{沿}C+l} \right] \Delta T \quad (2-13)$$

同样可求得溯源冲刷后的河床形态与沿程输沙过程。本模式考虑了水流条件对冲刷深度的直接影响,冲刷后的剖面形态受初始形态和水流条件共同影响,更符合实际。