

黄河下游洪水调控指标研究

姚文艺¹, 胡春宏², 张原锋¹, 李勇¹

1. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044

[摘要] 依据 200 余场次洪水观测资料, 应用统计分析、实体模型试验和数学模型计算等方法, 对洪水按漫滩程度、水流含沙量高低、流量过程线形态特征和洪峰与沙峰相位差进行了分类; 分析了塑造主槽的洪水关键因子; 研究了黄河下游洪水过程调控关键技术指标。研究表明, 黄河下游河槽高效输沙和塑造主槽作用较大的平滩流量约为 4 000 m³/s, 流量为 4 000 m³/s 条件下的洪水输送的临界含沙量为 50 kg/m³; 对于不漫滩洪水, 首选方案应按当时主槽的平滩流量控制, 且平滩流量下的洪水流量过程以接近矩形波过程较好, 峰前水量占洪水总水量的 25 % 以上, 洪水历时不小于 7 d; 对于漫滩洪水, 应控制洪峰流量大于平滩流量的 1.5 倍且大于洪水平均流量的 1.2 倍, 同时应尽量控制洪水涨水期水量与洪水总水量之比不小于 0.5, 并保持洪峰与沙峰同步运行, 洪水历时不小于 7 d; 洪水调控分组含沙量大小主要取决于悬沙及床沙的级配; 洪水来沙系数的调控指标视洪水类型而异, 不漫滩洪水为 0.012 kg·s/m⁶, 漫滩洪水为 0.015 kg·s/m⁶, 同时还应控制分组泥沙的来沙系数。

[关键词] 洪水; 水沙调控指标; 水沙过程; 黄河下游

[中图分类号] U618, TV882.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)12-0038-08

Study on Regulation Indexes of Flood in the Lower Reaches of Yellow River

YAO Wenyi¹, HU Chunhong², ZHANG Yuanfeng¹, LI Yong¹

1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China

Abstract: According to the grade of floodplain, the flow sediment concentration, the features of discharge process line, and the difference between flood peak and sediment peak, the flood is classified based on the data of more than 200 floods using statistical methods. The simulation experiments and mathematical models, and the key factors related with main channels formed by flood are discussed, and the key regulation indexes of flood in the lower reaches of Yellow River are studied. Results show that the flat beach discharge, which has an important effect on transport sediment and on the formation of main channels, is about 4 000 m³/s, the critical amount of transport sandiness is 50 kg/m³; the non floodplain flood or common floodplain flood should be controlled according to the flat floodplain discharge of the main channel first, and the flood discharge process would be better to take a form close to rectangular wave, and the water quantity before flood peak would be better to take a value greater than 25 % of the total water quantity, and the flood time would be better to last more than 7 d; the floodplain flood peak discharge should be controlled to be bigger than 1.5 times of flat floodplain flood peak discharge and bigger than 1.2 times of average flood discharge, and at the same time, the ratio between water quantity in swelling period and total flood should be more than 0.5, and the flood peak should be kept in step with the sandiness peak, and the flood time would be better to last more than 7 d; the content of sediment in different regulation floods is determined by the ratio of suspended sand and bed sand; the regulation indexes of flood incoming sediments should be changed according to the flood type, non floodplain flood sediment coefficient is 0.012 kg·s/m⁶, the common floodplain flood sediment coefficient is 0.015 kg·s/m⁶, and the incoming sediments of grouping sandiness should be controlled, too.

Key Words: flood; regulation indexes; process of water and sediment; the lower yellow river

CLC Numbers: U618, TV882.1

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)12-0038-08

收稿日期: 2007-04-05

基金项目: “十五”国家科技攻关计划重大项目(2004BA610A)

作者简介: 姚文艺, 郑州市顺河路 45 号黄河水利科学研究院, 教授级高级工程师, 主要从事河床演变与河道整治、土壤侵蚀与水土保持研究; E-mail: wyyao@yrihr.com.cn

黄河下游河段属堆积性河道,河槽的冲淤演化受洪水水沙过程影响很大。在有利的洪水过程下,河槽可发生冲刷下切,过洪能力增加,而在水沙组合关系不合理的洪水过程中,河槽就会发生淤积。近年来,黄河下游河道所形成的淤积萎缩正是由不利的水沙条件与河道边界条件共同作用的结果。因此,研究有利于黄河下游河道冲刷或不使河道淤积的洪水过程,以改变河道萎缩状况,提高黄河下游河槽的排洪输沙基本功能,是黄河治理及水资源合理开发利用中迫切需要解决的重大课题。国家对此极为重视,并将黄河下游洪水调控指标研究列为了“十五”国家科技攻关计划重点课题的重要内容。关于黄河洪水对下游河道的造床作用及其冲淤关系,许多学者已有研究^[1-10]。结合黄河调水调沙原型试验,李国英^[11-12]等人先后对黄河下游的冲淤规律、水沙关系,以及冲淤临界含沙量指标进行了研究。然而,目前基于塑造黄河下游河槽的目的,对洪水径流量、输沙量、含沙量、历时以及洪水水沙组合类型等洪水过程参数进行的针对性研究较少,而这些均是实施黄河下游洪水调控的重要指标,是河床演变学的重要内容之一,因此,有关这一问题的研究有着重要的科学意义。本文基于河床演变学原理,根据黄河下游洪水资料分析、实体模型试验和数值模拟计算,对有利于塑造黄河下游主槽的洪水水沙组合类型、水沙量、历时、流量及含沙量等调控指标进行了探讨和总结。

1 黄河下游洪水分类

大量的洪水资料分析表明,进入黄河下游河道不同类型的洪水过程对河槽冲淤产生的影响是不同的。结合目前掌握的洪水资料,按照漫滩程度、水流含沙量高低、流量过程线形态特征和洪峰与沙峰的相位关系对洪水进行了分类。

1.1 按漫滩程度分类

黄河下游河道平面外形呈宽窄相间的藕节状,收缩段与开阔段交替出现,滩地面积占河道总面积的 80% 左右,广阔的滩地具有显著的滞洪淤沙作用。当洪水漫滩以后,由于滩地糙率较大、流速低、过洪能力小,而主槽糙率较小、流速高,过洪能力可达到全断面的 80% 以上^[2],对河道泄洪起主要作用。同时,洪水漫滩后,不但水流发生槽向交换,泥沙也发生槽向交换,因而,经过一场漫滩洪水后,往往会发生滩淤槽冲现象,行洪能力加大,河势归顺,对防洪有利。

通过分析不同洪水过程中的冲淤变化发现,洪水漫滩与否及其漫滩程度大小都对河道冲淤产生影响。按漫滩程度不同可将洪水分成不漫滩洪水、一般漫滩洪水和大漫滩洪水 3 种(见图 1)。不漫滩洪水是指水流不出主槽的洪水。由于不漫滩洪水的活动范围在主槽内,所以其冲淤变化也仅影响主槽;一般漫滩洪水(或

称小漫滩洪水)是指水流漫上嫩滩和小部分二滩,但漫滩范围和漫滩水深都不大的洪水。虽然一般漫滩洪水过程中常发生淤滩刷槽现象,但由于一般漫滩洪水漫滩范围小,滩地淤积范围和淤积数量都不大,主槽冲刷也有限。因此,一般漫滩洪水的淤滩刷槽作用都是有限的,而对于大漫滩洪水,其漫滩范围和漫滩水深都较大,同时,由于黄河下游大漫滩洪水往往挟带较高含沙量,因此,大漫滩洪水过程中滩地普遍淤积且淤积量大,主槽冲刷扩大,河道归顺,形成高滩嫩槽,大漫滩洪水对主河槽的塑造作用显著。

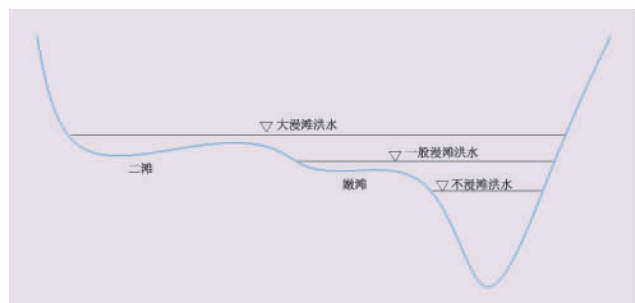


图 1 按漫滩程度划分洪水示意图

Fig. 1 Sketch map of flood according to the grade of floodplain

通过分析 1950 年以来洪水过程中河宽比 $B_{\max}/B_{\text{汛前}}$ (最大河宽 $B_{\max}$ 与当年汛前平滩河宽 $B_{\text{汛前}}$ 的比值)与洪峰流量关系,初步确定了按漫滩程度划分上述 3 种类型洪水的河宽比指标: $B_{\max}/B_{\text{汛前}} \leq 1$ 为不漫滩洪水; $1 < B_{\max}/B_{\text{汛前}} \leq 2$ 为一般漫滩洪水; $B_{\max}/B_{\text{汛前}} > 2$ 为大漫滩洪水。

1.2 按洪水最大含沙量分类

不同含沙量的洪水对黄河下游游荡性河道的塑造作用不同。1977 年 7 月,黄河下游发生了花园口洪峰流量 8 100 m³/s、最大含沙量 546 kg/m³ 的高含沙洪水,涨水前花园口和高村断面宽浅散乱,经过这场高含沙洪水后,断面发生剧烈的调整,滩地淤积,河槽变得相对窄深,形成高滩深槽。1983 年为大水小沙年,该年最大洪峰流量为 8 180 m³/s、洪峰含沙量为 57 kg/m³。汛期前后 3 000 m³/s 流量下花园口以上各断面河宽增大,汛后断面的 $\sqrt{B}/H$ 都比汛前大,河槽变宽浅,其中 B 为河槽宽度, H 为主槽深度;夹河滩至孙口河段各断面河槽缩窄且有所下切, $\sqrt{B}/H$ 减小;艾山以下河槽宽度方向的变化都不大,而在纵深方向有下切的发展趋势,各断面 $\sqrt{B}/H$ 变化不大。

不同含沙量漫滩洪水的演进特性也不同,如对于一般低含沙量漫滩洪水,由于河道冲淤变化幅度较小,水位的升降与流量的大小基本是同步发生的,在洪峰流量附近漫滩流量最大。最大含沙量 $S_{\max} < 40$ kg/m³ 时,

在洪水过程中深泓点和平均河底高程都发生冲刷;当洪水最大含沙量 $S_{\max} \geq 130 \text{ kg/m}^3$ 时,洪水过程中深泓点发生冲刷,平均河底高程在涨水时发生明显淤积;当洪水最大含沙量 $40 \text{ kg/m}^3 \leq S_{\max} < 130 \text{ kg/m}^3$ 时,洪水过程中深泓点发生冲刷,平均河底高程有冲有淤。由此表明,对于不同含沙量的洪水,河道的冲淤规律是不同的,因而,按洪水最大含沙量的不同可将洪水分为 3 种,即 $S_{\max} < 40 \text{ kg/m}^3$ 为低含沙量洪水; $40 \text{ kg/m}^3 \leq S_{\max} < 130 \text{ kg/m}^3$ 为一般含沙量洪水; $S_{\max} \geq 130 \text{ kg/m}^3$ 为较高含沙量洪水。

1.3 按洪水过程形态特征分类

分析表明,河槽冲刷一方面与流速有关,另一方面还与冲刷的时间有关。对于涨峰时间长且峰型较陡的洪水,其引起的冲刷效果相对来说更为显著。因此,需要按洪水过程形态对洪水进行分类,为此,引进了表征洪水过程形态的两个参数,一是变形参数 $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}}$ ($W_{\text{峰前}}$ 为洪水过程中峰前水量, $W_{\text{洪水}}$ 为洪水过程中总水量),二是表示洪水过程胖瘦的峰平参数 $Q_{\text{洪峰}}/Q_{\text{平均}}$ ($Q_{\text{洪峰}}$ 为洪峰流量, $Q_{\text{平均}}$ 为洪水平均流量)。通过对黄河下游不同洪水过程中断面冲淤变化的分析发现,当 $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}} < 0.25$ 、 $Q_{\text{洪峰}}/Q_{\text{平均}} < 1.2$ 时,洪水过程中河槽冲淤现象不明显,将此类洪水称之为后偏平缓型;当 $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}} > 0.25$ 、 $Q_{\text{洪峰}}/Q_{\text{平均}} > 1.2$ 时,洪水过程中明显出现深泓点的冲刷现象,将此类洪水称为前偏陡峻型。通过分析还发现,随着洪水过程形态特征参数 $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}}$ 和 $Q_{\text{洪峰}}/Q_{\text{平均}}$ 的增加,洪水过程中具有明显的涨冲落淤现象,冲刷的幅度也有增大的趋势。

1.4 按洪峰与沙峰的相位差分类

洪水过程中,洪峰与沙峰的相对位置不同,将引起河槽冲淤的不同。按洪峰与沙峰的相位差关系,可将洪水分成洪峰在前、沙峰在后;洪峰与沙峰同步;沙峰在前、洪峰在后 3 种类型。通过分析黄河下游不同洪水过程中断面的冲淤变化发现,前两种洪水有利于主槽在洪水过程中发生冲刷。若用 $t_{\text{洪}}$ 、 $t_{\text{沙}}$ 分别表示相对于同一起始时刻洪峰出现的历时和沙峰出现的历时,则 $t_{\text{洪}}/t_{\text{沙}} > 1$ 为沙峰超前型洪水, $t_{\text{洪}}/t_{\text{沙}} < 1$ 为沙峰滞后洪水, $t_{\text{洪}}/t_{\text{沙}} = 1$ 为沙峰洪峰同步型洪水。

2 高效输沙和塑造主槽的平滩流量分析

为确定洪水调控的流量级及历时等指标,需要分析黄河下游河槽高效输沙和合适的河槽平滩流量。关于高效输沙或最优输沙效率的洪水流量级问题,岳德军^[13]等在 20 世纪 90 年代中期曾统计分析过 1974 年以后发生的 168 场洪水的输沙效率,认为洪水流量在 $3\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右、含沙量 75 kg/m^3 左右的非大漫滩洪水为最适宜的高效输沙洪水,其输沙用水量为 $16.6 \text{ m}^3/\text{t}$,淤积比为 13.5 %。

黄河下游洪水的特点一般是大水带大沙,因此大流量时含沙量一般较高,此时若发生淤积,即使输沙效率高,但河道淤积量也很大。因此,应该选择河道能够承受的淤积条件下、输沙效率又较高的流量作为目标平滩流量。

综合考虑黄河下游来水来沙条件、输沙用水量、河道淤积情况,建立三者关系(见图 2)可知,随着输沙水量减少而含沙量增加,河道淤积比呈增加的趋势,即如果来水含沙量越大,输沙水量越少,河道淤积就越严重。若将图 2 划分为 3 个区域,即 I 区以冲刷为主,但输沙用水量很大; II 区为高效输沙区,兼顾了河道淤积程度及输沙用水量的大小,高效输沙区洪水期平均含沙量在 $45 \sim 110 \text{ kg/m}^3$,平均含沙量约 60 kg/m^3 ,相应淤积比为 15 %、平均流量 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。综合分析认为,淤积时期的平滩流量在 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右时有利于主槽高效输沙。

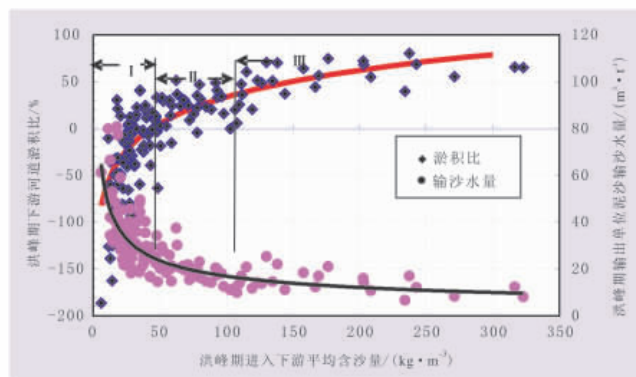


图 2 洪峰期进入下游平均含沙量

Fig. 2 Average sediment concentration entered the lower reaches of Yellow River during flood peaks

利用黄河下游的洪水资料分析表明,洪水期黄河下游排沙比受洪水平均流量、含沙量、粗沙比例在不同河段的影响是不同的。从各个河段冲淤关系(见图 3)可以看出,各个河段冲淤临界线基本相交于 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流

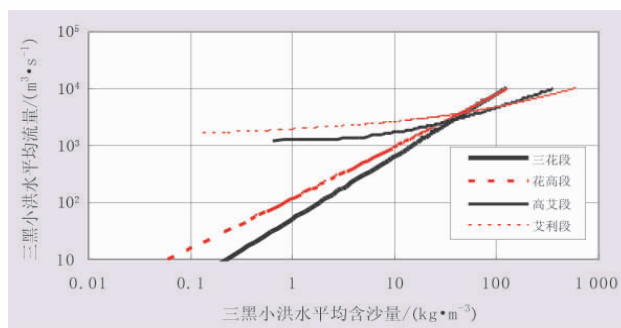


图 3 黄河下游各个河段冲淤分区图

Fig. 3 Subarea map of scouring and silting in the lower reaches of Yellow River reaches

量左右,因此,对该流量级的洪水,调整一定的水沙搭配可以使全下游不淤积或少淤积,达到最大输沙效果。

分析黄河下游清水冲刷时期三黑小流量与下游冲刷效率(单位水量冲刷量)的关系发现,冲刷效率随洪水期平均流量的增加明显增加,但流量约在 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下时,冲刷效率增加幅度较大,流量超过 $3\,500\sim 4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右后冲刷效率增加幅度显著减小。由此表明, $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 是冲刷效率较大的一个流量级。

综上所述认为,高效输沙和塑造主槽的平滩流量应为 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右。

3 洪水调控参数分析

3.1 影响主槽冲淤的洪水参数分析

洪水参数包括洪峰流量、洪水平均流量、历时、含沙量等,其中,又可将洪峰流量与洪水平均流量之比作为洪水流量变率参数,将含沙量与流量之比作为来沙系数;将流量与历时乘积作为水量参数。

试验表明^[14],在试验条件下,每个水沙参数对断面面积、宽深比的影响程度是不同的(见表 1),如大漫滩洪水过程中来沙系数比值为 3.00,对面积的影响权重为 5.97%;流量变率比值不大,为 1.82,但对面积的影响权重却达到 12.89%。因而,大漫滩洪水过程下,流量变率对断面的影响程度是较大的,来沙系数的影响次之。在流量变率和来沙系数较大的大漫滩洪水过后,主槽断面面积减小,且变得窄深,流量变率和来沙系数较小的大漫滩洪水过后,主槽断面面积增大,且变得宽浅。一般漫滩洪水和漫滩洪水对断面面积影响最明显的是水量,其影响权重为 27.20%,来沙系数次之,流量变率的影响最小;来沙系数对宽深比的影响程度最高,而另外两个水沙因素的影响程度较微弱。由此可见,对于一般漫滩洪水和漫滩洪水,在适宜的来沙系数条件下,增加来水量可以增加断面面积,但对宽深比影响较小。另外,流量变率对面积、宽深比影响不大,这与大漫滩洪水过程下流量变率对面积和宽深比影响较大的规律是不同的。

综上所述,一般漫滩洪水和漫滩洪水过程下流

量变率对主槽面积影响相对较小;大漫滩洪水过程下,主槽面积和主槽宽深比与流量变率、来沙系数均有一定的关系。

3.2 洪水流量过程调控参数

3.2.1 不漫滩洪水流量过程特征

根据不漫滩洪水过程对河槽横断面形态塑造作用的分析表明,当洪水形态特征参数 $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}} > 0.25$ 、 $Q_{\text{洪峰}}/Q_{\text{平均}} > 1.2$ 时,黄河下游花园口与高村断面的深泓点和平均河底高程发生冲刷的最小洪峰流量约为 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$,艾山约为 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$,利津约为 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 。

进一步分析表明,洪峰与沙峰同步或洪峰在前的洪水过程有利于黄河下游河道发生冲刷。考虑到洪水落水过程中含沙量高容易引起淤积增加,影响次洪水过程的冲刷效果,因此,从次洪水过程中对河道的冲刷效果来说,洪峰与沙峰同步的洪水过程最好。

另外,在不漫滩洪峰流量大于 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 以后,随着不漫滩洪水洪峰流量的增加,黄河下游河道冲刷增强,当洪峰流量接近河道的平滩流量,且洪水过程线形状接近于矩形波,不漫滩洪水过程对黄河下游河道的塑造作用最强。

黄河下游实测洪水过程分析表明,不漫滩洪水过程历时变化较大,从几天到十几天不等。试验表明,当历时达到 7 d 时,塑造河槽效果已比较明显。

综合上述分析结果初步认为,在河道现状条件下,有利的不漫滩洪水过程特征为:洪峰与沙峰同步,洪水形态特征参数 $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}} > 0.25$,洪峰流量接近于平滩流量,且洪水过程线形状接近于矩形波,洪峰历时为 7 d 左右,洪量在 15 亿 m^3 以上,满足以上特征的洪水过程为有利的不漫滩洪水过程。

3.2.2 漫滩洪水

大漫滩洪水过程中,滩地淤积和主槽冲刷都比较强烈,大漫滩洪水过后,河道归顺,断面变得窄深,形成相对高滩深槽,有利于河道的稳定和防洪安全。但从 20 世纪 90 年代以来,黄河下游来水持续减少,利用大漫滩洪水塑造黄河下游河道的机会已越来越少,同时,大漫滩洪水漫滩后造成的大范围滩区淹没和财产损失,

表 1 不同水沙参数变化影响程度对比

Table 1 Compare of influencing degree between different water and sediment parameters

洪水类型	参数	最小值	最大值	最大值与最小值之比	影响权重	
					面积/%	宽深比/%
大漫滩洪水	水量(QT)	70 000	89 426	1.28	0	0
	来沙系数(S/Q)	0.005	0.015	3.00	5.97	4.78
	流量变率(Q_{max}/Q)	1	1.82	1.82	12.89	19.39
一般漫滩洪水和漫滩洪水	水量(QT)	10 500	80 993	7.71	27.20	0.04
	来沙系数(S/Q)	0.008 3	0.1	12.00	15.80	23.03
	流量变率(Q_{max}/Q)	1	1.51	1.51	2.62	2.34

也在一定程度上限制了利用大漫滩洪水塑造下游河槽的可能性。

对于一般漫滩洪水,当漫滩程度较小时,其淤滩刷槽作用都不明显,对断面的塑造作用也很小,从有利于塑造黄河下游中水河槽的角度出发,这部分洪水在黄河下游洪水调控中应尽可能避免。只有在漫滩达到一定程度后,其淤滩刷槽作用才开始明显,对断面的塑造也开始有一定作用。表2是对有利的洪水过程参数模拟计算的结果,其中,模拟的洪水水量为52.7亿 m^3 ,沙量2.9亿t,最大洪峰流量为5 000~9 000 m^3/s 。

表2 不同洪水形态参数计算结果

Table 2 Calculated results of different flood form parameters

$W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}}$	铁谢—利津冲淤量/亿t	$Q_{\text{洪峰}}/Q_{\text{平均}}$	铁谢—利津冲淤量/亿t
0	-0.36	1.0	-0.36
0.25	-0.37	1.2	-0.43
0.50	-0.43	1.5	-0.40
0.73	-0.40	1.8	-0.37

分析认为,当漫滩洪水过程中的河宽比($B_{\text{max}}/B_{\text{汛前}}$)大于1.3时,对应的洪峰流量与平均流量的比值大于1.2,且洪峰流量与平滩流量的比值约为1.5左右, $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}}$ 不小于0.50,洪水过程的淤滩刷槽作用开始明显,对断面的塑造也开始有一定作用。根据前述分析的黄河下游河道适宜的平滩流量为4 000 m^3/s 左右的情况,相应于洪水过程的洪峰流量约为5 500~6 000 m^3/s 。

与不漫滩洪水一样,洪峰与沙峰同步或洪峰在前,洪水过程有利于黄河下游河道发生涨水冲刷,但从整场洪水过程对河道的冲刷效果来说,洪峰与沙峰同步的洪水过程更好一些。

漫滩洪水过程历时变化范围较大,从几天到二十

几天不等。试验表明^[14],场次洪水历时达到7~8 d左右时,塑造效果已比较明显。

综上所述,初步认为在当前河道状况下,有利的漫滩洪水过程特征为:洪峰与沙峰同步,洪峰流量大于5 500 m^3/s ,洪峰流量与平滩流量的比值约大于1.5且洪峰流量与平均流量比值不小于1.2,洪峰历时为7~8 d,洪量在35亿 m^3 以上,满足以上特征的洪水过程为有利的漫滩洪水过程。

3.3 洪水沙量调控参数

表3为进一步根据大量方案计算^[15],优化得到的洪水期不同调控流量下的含沙量历时的控制指标。

3.3.1 含沙量

就长系列年平均或汛期平均而言,对于一定的径流量,河道冲淤存在一个临界含沙量(确切说是一个含沙量范围)。对于场次而言,其对河槽的塑造也存在着临界含沙量。通过分析,在流量4 000 m^3/s 条件下,实现下游河道冲淤平衡的临界含沙量为50 kg/m^3 左右。

根据冲淤基本达到平衡状态下的204场洪水资料分析,洪水泥沙级配不同,河槽冲淤的临界含沙量也不同。

1) 悬沙以细泥沙为主

若以 P_{s1} 表示悬移质泥沙粒径小于0.025 mm的沙重百分数,则当 $80\% \leq P_{s1} < 93\%$ 时,悬沙极细,由于悬沙基本上为细泥沙成份,会与床沙的粗泥沙产生交换。在此情况下,洪水临界含沙量为

$$S = 31.3 \left(\frac{Q_c}{B_c} \right)^{0.1222} \left(\frac{Q_{\text{max}}}{Q_{0V}} \right)^{-0.1500} \left(\frac{P_{b3}}{0.837} \right)^{0.9121} \quad (1)$$

式中, Q_c 为主槽流量(漫滩时为平滩流量); B_c 为主槽宽度; Q_{max} 为花园口最大日均流量; Q_{0V} 为花园口以下河段最小平滩流量; P_{b3} 为河床质粒径大于0.05 mm的粗泥沙所占沙重百分数。式(1)的相关系数 $R=0.85$ 。

表3 黄河下游洪水期水沙调控指标

Table 3 Regulation indexes of water and sediment in flood period and non-flood period in the lower reaches of Yellow River

调控指标			备 注
调控流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	调控含沙量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	调控时间/d	
2 800	35	>8	非漫滩洪水调控流量根据实际平滩流量确定,矩形峰 漫滩洪水过程按 $W_{\text{峰前}}/W_{\text{洪水}} > 0.5$ 、 $Q_{\text{洪峰}}/Q_{\text{平均}} > 1.2$ 控制,且保持正态峰型洪峰、沙峰同步
3 000	40	>8	
3 200	42	>8	
3 400	44	>8	
3 600	46	>6	
3 700	47	>6	
3 800	48	>6	
3 900	49	>5	
4 000	50	>5	
6 000	130	>5	

2) 悬沙以中粗泥沙为主

当 $22\% \leq P_{s1} < 40\%$ 时, 悬沙较粗, 输沙能力主要与主槽单宽流量和漫滩程度有关。由于悬沙较粗, 水流输沙能力减弱, 泥沙容易落淤, 所以, 花园口断面平衡含沙量随着漫滩程度的加大而减小, 即

$$S = 9.523 \left(\frac{Q_c}{B_c} \right)^{1.005} \left(\frac{Q_{\max}}{Q_{0V}} \right)^{-0.8913} \quad (2)$$

该式相关系数 $R=0.88$ 。

3) 一般悬沙

当 $40\% \leq P_{s1} < 80\%$ 时, 属于一般性的悬沙组成, 水流输沙能力及花园口断面平衡水流含沙量随主槽单宽流量、悬沙细化比例的增大而增大, 随着漫滩程度、悬沙粗泥沙比例和床沙粗泥沙比例的增大而减少, 即

$$S = 15.35 \left(\frac{Q_c}{B_c} \right)^{0.7576} \left(\frac{Q_{\max}}{Q_{0V}} \right)^{-0.3500} \left(\frac{P_{s1}}{0.589} \right)^{0.5679} \left(\frac{P_{s3}}{0.167} \right)^{-0.1114} \left(\frac{P_{b3}}{0.837} \right)^{0.2110} \quad (3)$$

式中, P_{s3} 和 S_{b3} 分别为悬沙和床沙的粒径大于 0.05 mm 的粗泥沙所占比重百分数。式(3)的相关系数 $R=0.83$ 。由式(3)知, 在一定的流量条件下, 不论是悬沙还是床沙, 其级配越粗, 洪水期河道冲淤的临界含沙量越低, 即洪水输送粗泥沙的能力较低。

3.3.2 洪水来沙系数

为反映洪水水沙搭配关系, 一般多用来沙系数 S/Q 表征洪水水沙组合因子, 式中 S 为含沙量, Q 为流量。对于洪水而言, 河槽冲淤达到相对平衡状态下的临界来沙系数大小视洪水是否漫滩有所不同。

1) 全沙来沙系数

① 不漫滩洪水临界来沙系数

通过对不漫滩洪水过程中典型断面在洪峰前后相同水位下过流面积比较发现, 当不漫滩洪水过程的平均来沙系数大于 $0.012 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时, 断面面积在洪水过程中增大不明显甚至减小; 当洪水过程中的平均来沙系数小于 $0.012 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时, 断面面积在洪水过程中明显增大。

② 漫滩洪水临界来沙系数

同样, 通过对漫滩洪水过程中典型断面在洪峰前后相同水位下过流面积分析表明, 当漫滩洪水的平均来沙系数大于 $0.015 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时, 断面面积在洪水过程中减小, 这一结论与以前研究得到的漫滩洪水来沙系数大于 $0.014 \sim 0.015 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时滩槽均淤的结果是一致的。

2) 分组泥沙来沙系数

一般来说, 尽管水流含沙量一定, 但在不同的流量级下, 其造床作用也会不同。同时, 即使来沙系数相同, 而泥沙组成不同, 同样会有不同的造床作用。因此, 为

满足水沙精细调控的要求, 还应探讨洪水分组泥沙来沙系数的阈值。

仿照来沙系数, 定义冲淤量与流量和水量乘积的比为淤积系数, 用 ε 表示, 即

$$\varepsilon = \frac{\Delta W_s}{QW} \quad (4)$$

式中, ε 为淤积系数 ($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$); Q 为平均流量 (m^3/s); W 为场次洪水水量 (m^3)。

分析表明, 在一定的河道边界条件下, 来沙系数越大, 河道淤积得越多; 来沙系数越小, 淤积得愈少、冲刷得越多 (见图 4)。

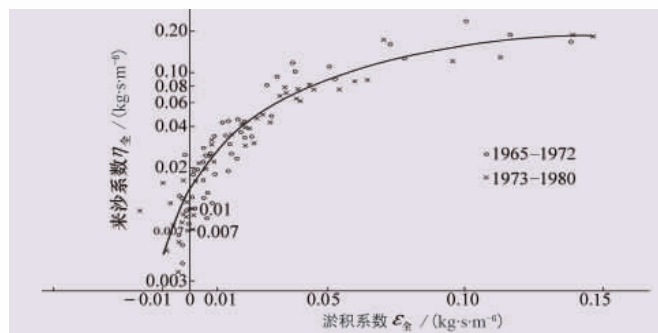


图 4 洪水来沙系数与下游河道淤积系数关系

Fig. 4 Relationship between the coefficients of flood incoming sediments and lower reach silting

根据漫滩和不漫滩的洪水资料进一步统计分析知, 要使各组泥沙在下游河道冲淤平衡, 其来沙系数分别不能大于

第 1 组	$\eta_{s1}=0.0035 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$
第 2 组	$\eta_{s2}=0.0039 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$
第 3 组	$\eta_{s3}=0.0040 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$
第 4 组	$\eta_{s4}=0.0024 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$
第 5 组	$\eta_{s5}=0.0002 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$

由于细泥沙的悬浮指标小, 水流挟带细泥沙的能力大, 床沙中细颗粒泥沙比粗颗粒泥沙可以更多地被悬浮带走, 所以前 3 组细泥沙的平衡来沙系数均大于后 2 组泥沙的平衡来沙系数。

4 结论

黄河下游河道冲淤变化主要发生在洪水期, 因而, 洪水调控是黄河下游水沙调控的重要内容。根据大量实测资料分析、实体模型试验和数学模型计算, 对黄河下游洪水调控指标进行探讨, 结论如下。

1) 进入黄河下游河道不同类型的洪水过程对黄河下游河槽冲淤产生的影响是有所不同的。黄河下游洪水可以分为漫滩洪水、非漫滩洪水; 低含沙量洪水、一般含沙量洪水、较高含沙量洪水; 后偏平缓型洪水、前偏陡峻型洪水; 沙峰超前型洪水、沙峰洪峰同步型洪

水、沙峰滞后型洪水等 4 类。

2) 黄河下游河槽高效输沙和塑造主槽作用较大的平滩流量以 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 为宜。

3) 洪水历时、含沙量、来沙系数、流量变率、洪型等是影响洪水塑造河槽作用大小的主要因素。

4) 对不同类型洪水的调控,控制指标是不同的。对于不漫滩洪水,首选方案应按当时主槽的平滩流量控制,且平滩流量下的洪水流量过程以接近矩形波过程较好,峰前水量占洪水总水量的 25% 以上,洪峰流量为洪水平均流量的 1.2 倍以上。对于漫滩洪水,应控制洪峰流量大于平滩流量的 1.5 倍且大于洪水平均流量的 1.2 倍,并保持洪峰与沙峰同步运行,即尽量满足 $t_{\text{洪}}/t_{\text{沙}}=1$ 的条件。

5) 洪水输沙的调控指标不仅要考虑全沙的,还应注意洪水分组的含沙量和来沙系数。在流量为 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,下游河道冲淤相对平衡的临界含沙量为 $50\text{ kg}/\text{m}^3$ 左右。若悬沙以细泥沙为主的洪水,其河槽冲淤临界含沙量与主槽单宽流量、最大日均流量、花园口以下河段最小平滩流量、床沙中值粒径大于 0.05 mm 的沙重百分数 P_{13} 有关;对于悬沙以中粗泥沙为主的临界含沙量则与 P_{13} 无关;对于悬沙以粗泥沙为主的临界含沙量除与细泥沙临界含沙量的因素有关外,还与悬沙中值粒径小于 0.025 mm 、 0.05 mm 的沙重百分数有关。

当不漫滩洪水过程中的平均来沙系数大于 $0.012\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ 时,断面面积在洪水过程中减小,发生淤积;对于漫滩洪水,临界来沙系数约为 $0.015\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ 。若将悬沙分为 $d_1=0.01\text{ mm}$, $d_2=0.05\text{ mm}$, $d_3=0.025\sim0.05\text{ mm}$, $d_4=0.05\sim0.1\text{ mm}$, $d_5>0.1\text{ mm}$ 共 5 组,则相应的来沙系数 S/Q 临界为第 1 组 $0.003\,5\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$,第 2 组 $0.003\,9\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$,第 3 组 $0.004\,0\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$,第 4 组 $0.002\,4\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$,第 5 组 $0.000\,2\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ 。

参考文献(References)

- [1] 钱宁,周文浩.黄河下游河床演变[M].北京:科学出版社,1965:136-155.
QIAN Ning, ZHOU Wenhao. Riverbed evolvement of the lower Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 1965: 136-155.
- [2] 钱意颖,叶青超,周文浩.黄河干流水沙变化与河床演变[M].北京:中国建材工业出版社,1993:108-117.
QIAN Yiyang, YE Qingchao, ZHOU Wenhao. Yellow River water and sediment change & the river bed evolves[M]. Beijing: Chinese Building Materials Industry Press, 1993: 108-117.
- [3] 赵业安,潘贤娣,樊左英,等.黄河下游河道冲淤情况及基本规律[C]//李保如.黄河水利委员会水利科学研究所科学研究论文集(第1集.泥沙·水土保持).郑州:河南科学技术出版社,1989:12-26.
ZHAO Ye'an, PAN Xiandi, FAN Zuoying, et al. The lower Yellow River silt situation and the basic rule [C]//Yellow River institute of hydraulic research scientific research collection (first volume, sediment conservation of water and soil). Zhengzhou: Henan Science and Technology Publishing House, 1989: 12-26.
- [4] 叶青超.黄河流域环境演变与水沙运行规律研究[M].济南:山东科学技术出版社,1994:136-139.
YE Qingchao. The yellow River valley environment evolution and the water & sediment movement rule studies[M] Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1994: 136-139.
- [5] 麦乔威,赵业安,潘贤娣,等.黄河下游来水来沙特性及河道冲淤规律研究[C]//《麦乔威论文集》编辑委员会.麦乔威论文集.郑州:黄河水利出版社,1995:165-204.
MAI Qiaowei, ZHAO Ye'an, PAN Xiandi, et al. The lower Yellow River incoming flood & incoming sediment characteristic and the river course flushes the silt rule research [C]//“Mai Qiaowei the Collection” editorial Commission. Mai Qiaowei's Collection, Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1995: 165-204.
- [6] 王玲,董雪娜,顾弼生,等.黄河历次洪水下游河道冲淤资料的统计分析[C]//左大康.黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集(第一集).北京:地质出版社,1991:149-155.
WANG Ling, DONG Xuena, GU Bisheng, et al. Statistical analysis about the silt data of Yellow River [C]//ZUO Dakang. Yellow River valley environment evolution & water and sediment movement rule research anthology (first volume). Beijing: The Geological Publishing House, 1991: 149-155.
- [7] 乐培九.河床演变与模拟文集[M].天津:天津科学技术出版社,2001:176-187.
LE Peijiu. River bed evolution and simulation anthology [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2001: 176-187.
- [8] 梁志勇,刘继祥,张厚军,等.黄河洪水输沙与冲淤阈值研究[M].郑州:黄河水利出版社,2004:128-135,137-147.
LIANG Zhiyong, LIU Jixiang, ZHANG Houjun, et al. The Yellow River flood transport sediment and the silt threshold value research [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2004: 128-135, 137-147.
- [9] 王玲,董雪娜.黄河洪水对下游河道冲淤影响的统计分析[J].水文,1993(5):32-35.
WANG Ling, DONG Xuena. The statistical analysis about the silt influence of flood flushes to the lower Yellow River course [J]. Hydrology, 1993(5): 32-35.
- [10] 齐璞,孙赞盈,侯素珍,等.黄河洪水的非恒定性对输沙及河床冲淤的影响[J].水利学报,2005,36(6):637-643.
QI Pu, SUN Zhanyang, HOU Suzhen, et al. Effect on non-invarianceto transporting sediment and riverbed scouring and filling up of flood in the Yellow River [J].

三峡水库蓄水对汉江堤防安全的威胁及防御对策

李义天, 邓金运, 甘富万

武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072

[摘要] 三峡水库汛后蓄水, 每年 10 月份下泄流量大为减小, 汉口水位较目前显著降低, 将加重汉江秋季洪水对汉江堤防及武汉地区防洪安全的威胁。本文在对三峡水库蓄水后汉口水位下降分析的基础上, 探讨了三峡蓄水对汉江堤防安全的威胁, 并提出了相应的防御对策。

[关键词] 三峡水库蓄水; 汉江; 堤防; 对策

[中图分类号] TV871, TV85

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)12-0045-05

Threat on Bank of Hanjiang River due to the Impounding Water of TGP and Its Countermeasures

LI Yitian, DENG Jinyun, GAN Fuwan

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Due to the impounding water of the Three Gorges Project (TGP), the discharge in downstream river will greatly decrease, and the water level at Hankou will also decrease, which is dangerous to the safety of the bank of Hanjiang River and the flood control in Wuhan area. Based on the analysis of the decrease of the water level at Hankou, the threat to the bank of Hanjiang River due to the impoundment of TGP is studied, and the countermeasures are proposed in this paper.

Key Words: impounding water of TGP; Hanjiang River; bank; countermeasure

CLC Numbers: TV871, TV85

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)12-0045-05

收稿日期: 2007-04-28

基金项目: 国家重点基础研究发展(973 计划)项目(2003CB415203), 国家自然科学基金项目(05050920)

作者简介: 李义天, 武汉市东湖南路 8 号武汉大学水利水电学院, 教授, 研究方向为河流泥沙; E-mail: ylti@whu.edu.cn

- Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 637-643.
- [11] 李国英. 维持黄河健康生命 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 148-155, 282-286.
- LI Guoying. Managing the health life in the Yellow River [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005: 148-155, 282-286.
- [12] 李国英. 基于空间尺度的黄河调水调沙[J]. 人民黄河, 2004, 26(2): 1-4.
- LI Guo-ying. Regulating water and sediment basing on special scale in the Yellow River [J]. Yellow River, 2004, 26(2): 1-4.
- [13] 岳德军, 侯素珍, 赵业安. 黄河下游输沙水量研究[J]. 人民黄河, 1996, 18(8): 32-33.
- YUE De-jun, HOU Su-zhen, ZHAO Ye-an. Research of transporting-sediment water capacity in the Yellow River downstream[J]. Yellow River, 1996, 18(8): 32-33.
- [14] 胡春宏, 陈建国, 戴清. 黄河下游不同水沙过程与河床形态

调整的响应关系[R]. 中国水利水电科学研究院, 2006: 55-91.

HU Chunhong, CHEN Jianguo, Dai Qing. The respond relation between water-sediment course and riverbed adjusting in the Yellow River downstream[R]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006: 55-91.

[15] 姚文艺, 李勇, 张原锋, 等. 维持黄河下游河槽排洪输沙基本功能的关键技术研究 [R]. 黄河水利科学研究院, 2006: 185-240.

YAO Wenyi, LI yong, ZHANG Yuanfeng, et al. Key technical research of managing the basic function of pushing flood and transporting sediment in the Yellow River downstream [R]. Yellow River Institute of Hydraulic Research, 2006: 185-240.

(责任编辑 赵佳)