

黄河下游河道萎缩过程中输沙能力的调整

姚文艺¹, 严忠民², 李 勇¹

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:依据河床演变学原理,根据定位观测资料分析,结合河工动床模型试验,探讨了黄河下游河道萎缩过程中的输沙能力调整关系。研究表明:黄河下游河道主河槽的输沙能力调整趋势取决于河道的萎缩模式;主河槽水流挟沙力与河槽形态的关系仍然符合一般意义下的河床过程规律;河道萎缩后,河道的排沙比减小,但排沙比与河道萎缩模式无关;河道萎缩是可以逆转的。
关键词:河道萎缩;河床演变;河道输沙能力;黄河下游河道

中图分类号:TV147 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2006)03-0010-05

Adjustment of sediment transport capacity during channel shrinkage for lower Yellow River//YAO Wen-yi¹, YAN Zhong-min², LI Yong¹(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)
Abstract: According to the principle of riverbed evolution, with the observed data at certain stations, the method of movable bed model test was used to analyze the adjustment of water transport capacity during the channel shrinkage. The result shows that the adjustment of sediment transport capacity in the main river channel of the lower Yellow River mainly depends on the pattern of channel shrinkage, that the relationship between the sediment carrying capacity of flows and morphology of main river channel still accords with the law of riverbed evolution in general, and that the rate of sediment discharge decreases after channel shrinkage, however, there is not a certain relationship between the rate of sediment discharge and the pattern of channel shrinkage. Finally, it is concluded that channel shrinkage is reversible.
Key words: channel shrinkage; riverbed evolution; sediment transport capacity of river channel; lower reach of Yellow River

从河床演变学原理可知,河道的冲淤变化与来水来沙条件之间有着高阶的响应关系,而河道断面形态的调整则又对河道的输沙能力有着很大的制约作用。自 20 世纪 80 年代中期以后,黄河下游主河槽发生严重淤积萎缩,平滩流量大幅度减小,对河道的输沙能力产生很大影响。针对黄河下游河道萎缩后对输沙能力的影响问题,有人曾开展过探讨^[1-6],但总的来说,这些研究关注较多的是输沙率、含沙量等输沙总量参数方面的变化,而关于输沙能力的调整与河道萎缩之间的响应关系仍待进一步研究。分析河道输沙能力对河道萎缩的响应关系,对于了解河道萎缩的致灾机理及制定治理对策都是非常必要的。本文依据定位观测资料分析,结合河工动床模型试验,探讨黄河下游河道萎缩过程中输沙能力的响应调整关系。

1 模型试验设计

1.1 试验河段选择及试验比尺设计

黄河下游游荡型河段河道萎缩最为严重,其萎缩

演变过程也比较复杂,因此选取该河段作为试验对象。根据试验场地和模型进出口水沙条件的控制要求,模拟范围选定为花园口河段。模型进口为北裹头,出口在赵口险工下游,全河段长 38.45 km(图 1)。

模型按黄河动床模型相似律设计,相似条件主要有:

水流重力相似

$$\lambda_v = \lambda_H^{1/2} \tag{1}$$

水流阻力相似

$$\lambda_n = \frac{1}{\lambda_v} \lambda_H^{2/3} \lambda_J^{1/2} \tag{2}$$

水流运动相似

$$\lambda_{t_1} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} \tag{3}$$

泥沙起动和扬动相似

$$\lambda_{v_c} = \lambda_{v_f} = \lambda_v \tag{4}$$

泥沙沉降相似

$$\lambda_\omega = \lambda_v \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^m \tag{5}$$

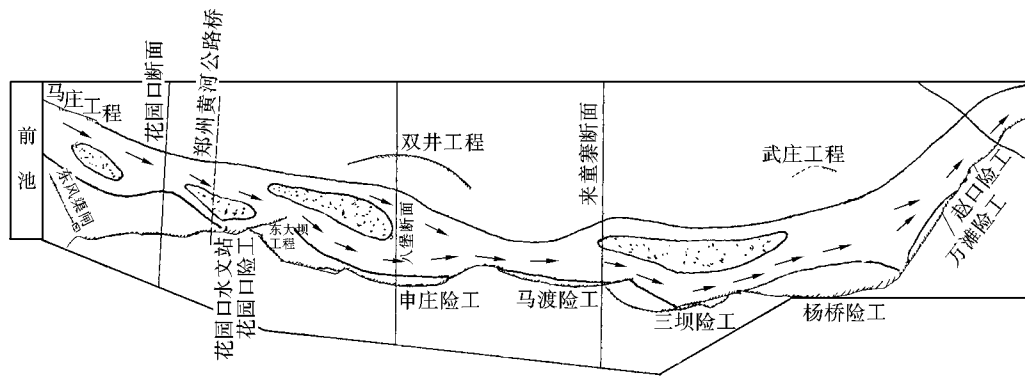


图 1 模型模拟河段示意图

水流挟沙力相似

$$\lambda_s = \lambda_{s_*} \quad (6)$$

河床冲淤相似

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\rho_0} \lambda_{t_1}}{\lambda_s} \quad (7)$$

式中: λ_L, λ_H 分别为模型平面比尺和垂直比尺; λ_{v_c} , λ_{v_f} 和 λ_v 分别为起动流速比尺、扬动流速比尺和水流流速比尺; λ_j 为比降比尺; λ_n 为糙率比尺; λ_ω 为悬沙沉速比尺; λ_s 和 λ_{s_*} 分别为水流含沙量比尺和水流挟沙力比尺; λ_{ρ_0} 为淤积物干密度比尺; λ_{t_1} 和 λ_{t_2} 分别为水流运动时间比尺和河床冲淤变形时间比尺。

模型选定的主要比尺如下: $\lambda_L = 800$, $\lambda_H = 70$, $\lambda_v = 8.37$, $\lambda_{t_1} = 95.58$, $\lambda_{t_2} = 95.58$, $\lambda_\omega = 1.35$, $\lambda_s = 2.00$, $\lambda_n = 0.60$ 。模型沙选取郑州热电厂粉煤灰。黄河河道实体模型试验的经验表明,该类模型沙具有物理化学性能稳定、密度及干密度适中、选配加工方便、水下休止角适中、高含沙洪水时流态失真小、模型沙一般不板结且固结不严重等特点,能够满足游荡性模型小河的多项设计要求,并能保证模型长系列放水试验的需要。

根据模型试验目的,选取汛期和非汛期均发生游积的 1987 年水文年水沙过程作为验证试验的水沙条件,模型初始地形按 1987 年汛前实测大断面制作。尾门水位按模型进口处花园口站的流量与模型出口处赵口闸的水位统计关系控制。验证表明,经过 1987 年一个水文年的放水验证,模型在河型、河势、沿程水位、河床形态和冲淤量等方面与原型均达到基本相似,模型设计可以满足试验的精度要求^[7]。

1.2 试验方案

选择 3 个典型的水沙过程作为试验水沙条件,即 1988 年的中水丰沙年、1994 年的小水中沙年和 1991 年的枯水少沙年。根据实测资料分析,河道萎缩主要发生于汛期,因此,在试验过程中只施放汛期水沙过程。另外,1998 年的泥沙淤积量是 1985 ~

1996 年泥沙年均淤积量的 1.8 倍,且主槽和滩地淤积都非常明显,主槽深泓高程抬升约 2 m;1991 年泥沙淤积量较小,如汛期仅为 1988 年的 33%,但泥沙全部淤积在主槽内,若与 1988 年的水沙过程组合,则可充分展现“小水大灾”的效应,根据主河槽冲淤变化的特征,将 1991 年和 1998 年的水沙过程进行组合作为一个试验组次。因此,在试验组次设计中,考虑了两种类型,即 1988 + 1991 年组合型和 1994 年型(分别简称为“88 + 91 型”和“94 型”)。两个组次试验的初始地形均按 1987 年汛前实施大断面制作。试验周期按每种水沙试验条件下河床冲淤演变达到相对稳定状态时进行控制。

2 输沙能力与河道萎缩模式的响应关系

2.1 河道萎缩特征及模式^[8]

实测资料分析和试验研究表明,黄河下游河道萎缩主要表现为主河槽严重淤积,平滩流量大大减小^[7]。因此,通常所说的黄河下游河道萎缩实质上是指主河槽的萎缩。黄河下游河道萎缩的主要特征是主河槽宽度明显缩窄,主河槽过水面积大幅度减少;同流量水位明显抬升,以及横断面形态调整多变等。例如,自 1990 ~ 1996 年,黄河下游花园口—夹河滩、夹河滩—高村两河段中水河槽平均宽度仅分别为 1300 m 和 800 m,而 20 世纪 50 年代时分别约达到 4000 m 和 3200 m。在主河槽宽度缩窄的同时,其过水面积也大幅度减小,导致中常洪水漫滩几率加大。根据 1985 年 10 月至 1997 年 10 月资料统计,花园口至夹河滩游荡型河段的主河槽面积年均减小 315 m²,过水面积仅为 20 世纪 70 年代的 60% 左右。河道萎缩的另一个显著特征是河床高程明显抬升,如 1986 ~ 1995 年,位于游荡型河段的八堡断面深泓点高程抬升 1.75 m,位于过渡段的高村断面深泓点抬升 8.33 m,在弯曲河段渔洼断面的高程抬升 1.71 m。河道萎缩过程中,主河槽断面形态的调整过程比较复杂,主要表现为汛后断面宽深比多数大

于汛前,同时各年份汛前汛后宽深比调整的幅度有较大差异,如有的年份调整不大,而有的年份调整1倍左右。另外,游荡型河段的断面宽深比较过渡型、弯曲型河段的增加明显,而且在宽深比总体呈增大趋势的同时,有些年份则是降低的。试验结果进一步表明,在河道萎缩过程中断面形态的调整趋势不是单向性的,而视水沙条件是有所不同的。在1991年和1988年的试验水沙条件下,断面宽深比是逐步减小的,也就是说河槽断面逐步趋于窄深;而对于“88+91型”的水沙过程,断面宽深比则是逐渐增大的,说明断面形态趋于宽浅。因而,可将“88+91型”洪水所形成的萎缩模式称作“集中淤槽”,而将“94型”洪水形成的萎缩模式称为“滩槽并淤”。显然,在“集中淤槽”模式下主槽断面趋于宽浅,而在“滩槽并淤”模式下河槽断面形态趋于窄深。另外,还有一种“淤积不萎缩”的模式,即尽管河槽发生淤积,但并不具备主河槽宽度缩窄、过水断面面积减小的萎缩特征。

2.2 输沙能力对河道萎缩模式的响应

根据黄河下游不同河段不同时期的输沙特性分析,黄河下游河道一般存在“多来多淤多排,少来少淤少排”的输沙特点,其输沙能力可描述如下^[9-10]:

$$Q_s = KQ^a S_{\perp}^b \tag{8}$$

式中: Q_s 为河道输沙率,可作为输沙能力的表征参数, t/s ; Q 为流量, m^3/s ; $S_{\perp}$ 为上站来水含沙量, kg/m^3 ; K 为系数,与前期河床冲淤有关; a 和 b 为指数,与边界条件及来沙颗粒组成有关。

根据赵业安等的分析^[9],花园口站断面汛期全沙输沙率与流量和上站含沙量关系为

$$Q_s = 1.43 Q^{1.16} S_{\perp}^{0.6} \tag{9}$$

由此可得出相对“多来多淤多排”输沙能力为

$$S_{\text{多}} = 1.43 Q^{0.16} S_{\perp}^{0.6} \tag{10}$$

式中: $S_{\text{多}}$ 为相应于输沙率 Q_s 的水流含沙量, kg/m^3 。

由式(10)计算模型试验各级水沙过程的模型进口来沙 $S_{\perp}$ 与输沙能力 $S_{\text{多}}$ 之比 $S_{\perp}/S_{\text{多}}$,进而估算出河道冲淤变化,并根据试验资料,点绘模型试验各级水沙过程单位时间冲淤强度与相对输沙能力($S_{\perp}/S_{\text{多}}$)的关系(图2)。由图2可见,尽管图中点据分布较散,但其趋势是比较明显的,表明模型中八堡至来童寨河段在萎缩过程中仍然具有“多来多淤多排”的输沙特性。由此说明仍可以取用式(8)分析河道萎缩过程中输沙能力的调整关系。根据齐璞等^[11]的分析,式(8)中的 a, b 值计算公式为

$$a = 0.356 \lg J + 1.13 \tag{11}$$

$$b = -0.256 \lg \frac{\sqrt{B}}{H} + 1.18 \tag{12}$$

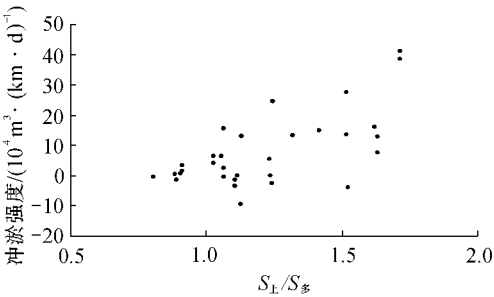


图2 冲淤强度与 $S_{\perp}/S_{\text{多}}$ 的关系

式中: J 为比降; B 为断面宽度; H 为断面平均深度。

根据试验结果进行的计算表明(图3),无论哪种试验水沙过程, a 值变化均不大,基本稳定在1.22左右。 b 值变化相对较大,对于“94型”及“88型”水沙过程, b 值都有逐步增大的趋势,一般以初始的0.7左右逐步增大至0.9左右;而对于“91型”洪水, b 值具有减小的趋势,由初期的1.00降至后期的0.95左右。分析其原因,主要是在河道萎缩过程中,无论何种萎缩模式,河道纵比降的调整并不大^[7],因而,由式(11)知,其 a 值也就不会产生大的变化;而对于 b 来说,由于在河道萎缩过程中,河道断面宽深比调整较大,且调整趋势视萎缩模式不同,因而 b 值变化不仅会较明显,且调整方向也必然会不同。对于“94型”及“88型”水沙过程,随着河道的淤积,断面逐渐变得窄深, $\sqrt{B}/H$ 减小,故 b 值增大;对于“91型”洪水过程,因淤积主要发生于主河槽内,使得河槽逐步变得宽浅, $\sqrt{B}/H$ 增大,因而 b 值有所减小。

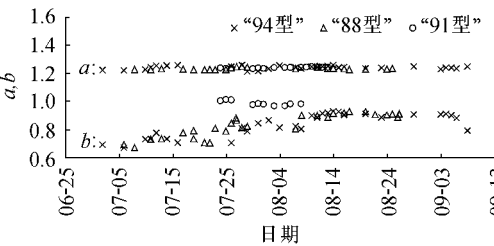


图3 a, b 值变化过程

显而易见,在流量指数变化不大的情况下,对于不同的萎缩模式,主河槽输沙能力的调整是不同的。对于“滩槽并淤”模式,或断面形态趋于窄深型的萎缩过程,主河槽的输沙能力是有所提高的。但是,由于主河槽过水面积是逐步减小的,其过洪能力下降,一遇洪水就可形成河道水位较大幅度的抬高,因而遇较大洪水仍可形成威胁。对于“集中淤槽”模式,或断面形态趋于宽浅型的萎缩过程的河槽,主河槽的输沙能力显然是下降的。因此,这类萎缩模式的灾害性将会更为严重。

如果采用湿周与水力半径之比表示河槽形态参数 M ,并将黄河下游挟沙水流的平均流速 v 用曼宁公式表达,则有

$$M = \chi/R \quad (13)$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (14)$$

式中: χ 为湿周; R 为水力半径。

对于黄河下游, 可将式(14)中的水力半径 R 用平均水深 h 表示, 则当挟沙能力由式(15)描述时, 可将水流挟沙力直接表达为断面形态的函数(式(16)):

$$S_* = k \left(\frac{v^3}{gR\omega} \right)^m \quad (15)$$

$$S_* \propto \left(\frac{Q}{M} \right)^{0.28} \quad (16)$$

式中: n 为糙率; J 为比降; v 为断面平均流速; ω 为悬移质中值粒径泥沙的沉速; g 为重力加速度; S_* 为水流挟沙力; k 和 m 分别为系数和指数, 黄河下游游荡型河段的 k 及 m 可分别取为 0.4515 及 0.7414。

式(16)表明水流挟沙力与 $(Q/M)^{0.28}$ 成正比。若由本研究的试验资料点绘 S_* 与 $(Q/M)^{0.28}$ 的关系(图4), 可以看出, 在河道萎缩过程的试验水沙条件下, 水流的挟沙力 S_* 仍与 $(Q/M)^{0.28}$ 有着较好的正比关系。就是说, 在河槽淤积萎缩过程中, 若使得 M 值趋小, 即断面趋于窄深, 则主河槽的挟沙能力将有所增加; 反之, 若河槽萎缩过程中断面形态趋于宽浅, 即断面形态参数 M 是增大的, 则主槽的挟沙能力将会减小。这进一步佐证了上述的分析结论。同时, 由此也说明, 在河槽萎缩过程中, 水流挟沙力与断面形态的关系与通常概念下的河床演变规律是一致的。

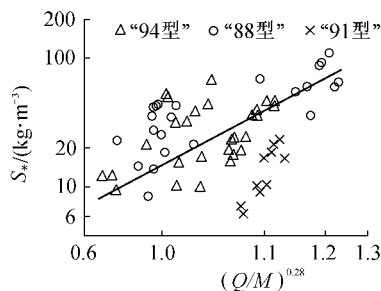


图4 挟沙力 S_* 与 $(Q/M)^{0.28}$ 的关系

若定义 $\frac{v^3}{gR}$ 为水流强度, 那么根据试验资料可以

点绘水流强度 $\frac{v^3}{gR}$ 与单位冲淤量之间的关系(图5)。由图5可以看出在试验水沙条件下, 随着水流强度的增大, 其挟沙能力相应提高, 河道单位淤积量减少。由此表明, 在河道萎缩过程中, 仍具有水流强度越大就越有利于减轻河道淤积的造床规律。也就是说, 河道萎缩是可以逆转的。只要设法增大河槽的水流强度, 就可以有效地减轻河道淤积萎缩的程度。

从河床演变学的原理来说, 上述结论是可以理解的。对于冲积性河流而言, 来水来沙量及其过程是影响河床演变的决定性因素, 一旦水沙条件发生

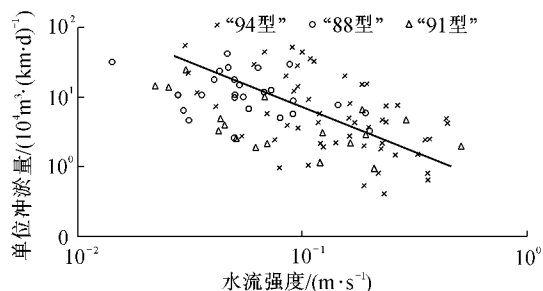


图5 水流强度与单位冲淤量的关系

变化, 河道将通过河床形态、河床比降的调整, 力使河道的水流输沙能力与上游的来水来沙相适应。自20世纪80年代中期以后, 进入黄河下游河道的水沙条件发生不利变异, 导致主河槽萎缩, 实际上, 这也正是河道演变“自动调整作用”使然。也就是说, 由于在短期内河道比降调整是极为有限的, 因而河道将主要通过河道淤积萎缩, 改变断面形态的方式, 调整本河段的水流输沙能力, 以适应变异的水沙条件, 但这种调整的机理并未发生变化, 仍符合通常概念下的河床演变规律, 一旦来水来沙条件有利, 河道的萎缩状况就会改变, 并朝着新的方向调整。

3 河道排沙比对变异水沙条件的响应

河道排沙比是某一河段出口站与进口站输沙量之比, 其表明研究河段内泥沙的总体淤积或冲刷程度, 是直接反映某一河段河道输沙能力的一个指标。分析表明, 河道发生萎缩的主要原因是水沙条件发生不利的变异, 其变异特征之一就是汛期水沙过程发生大的变化, 水沙搭配关系更不合理, 来沙系数大大增加。显然, 河道萎缩过程中的排沙比也必然与来沙系数有一定的响应关系。根据文献[7]分析, 黄河下游河道冲淤平衡的临界来沙系数约为 $0.014(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$, 而1986年以来黄河下游历次洪水的来沙系数小于 $0.014(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$ 的很少, 绝大部分在 $0.014(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$ 以上, 甚至超过 $0.1(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$ 。由此造成了河道的严重淤积萎缩, 排沙比也相应降低, 如根据1986年前后来沙系数分别小于 $0.021(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$ 和 $0.021 \sim 0.055(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$ 两组洪水资料的对比表明, 对于来沙系数小于 $0.021(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$ 的洪水来说, 1986年以前排沙比大于90%的洪水次数占总洪水次数的比例为51.0%, 其中排沙比大于100%的占22.4%, 而1986年以后排沙比大于90%的洪水所占比例降至40.0%, 排沙比大于100%的只占10.0%; 对于来沙系数为 $0.021 \sim 0.055(\text{kg} \cdot \text{s})/\text{m}^6$ 的洪水来说, 1986年以前排沙比大于80%的洪水占64.7%, 而1986年以后则只占13.6%。同时, 平均来说, 1986年以后的最大排沙比

较 1986 年以前的减少 10.0% ~ 12.5%。

进一步分析表明,无论来沙系数如何,在洪水洪峰流量接近平滩流量时排沙比达到最大,而当洪峰流量超过平滩流量时,因洪水漫滩,排沙比反而减小。1986 年后,平滩流量大幅度降低,如来沙系数小于 $0.055(\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^6$ 的洪水的最大排沙比所对应的流量由 $3\,000\text{m}^3/\text{s}$ 和 $4\,000\text{m}^3/\text{s}$ 降低到 $2\,000\text{m}^3/\text{s}$ 和 $3\,000\text{m}^3/\text{s}$ 。显然,河道萎缩后,必然使同量级洪水的排沙比比河道萎缩前有所降低,如同样为 $4\,000\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水,1986 年以前输沙率可达 $900\text{t}/\text{s}$,1986 年以后只有约 $600\text{t}/\text{s}$ 。

排沙比降低,就意味着河道淤积加重。图 6 是不同萎缩模式下试验河段河道冲淤强度与来沙系数的关系。由图 6 可以看出,尽管点群相对分散,但试验点群的分布趋势还是非常明显的,即随来沙系数增大,河道淤积强度增高。或者说,来沙系数越高,河道的排沙比越低,这与前述实测资料分析结果是一致的。图 6 的关系也表明,无论何种萎缩模式,从总体上来说,河道的排沙比总是随来沙系数增大而减小的,与河道萎缩的模式关系不大,或者说河道的淤积强度主要取决于来沙系数,随来沙系数的增大而增大。

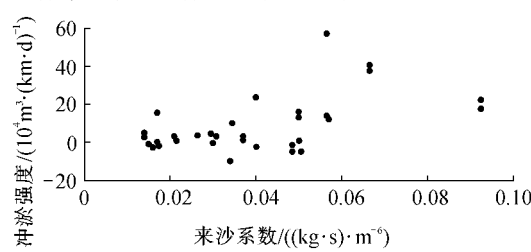


图 6 来沙系数与冲淤强度的关系

4 结 语

本文通过定位观测资料分析和河工动床模型试验的方法,分析了黄河下游河道萎缩过程中输沙能力的调整关系,得到以下几点认识:

a. 河道萎缩过程中,输沙能力的调整与河道萎缩模式有关。若以输沙率作为输沙能力的表征参数,试验结果表明,对于“滩槽并淤”模式,主河槽的输沙能力是有所提高的;对于“集中淤槽”模式,主河槽的输沙能力显然是下降的。但是,对于前者来说,尽管主河槽的输沙能力有所提高,由于主河槽过水面积是逐步减小的,过洪能力下降,因而一遇洪水就可形成河道水位较大幅度抬高,即平滩流量仍是减小的,其洪水威胁仍然很大。

b. 试验进一步表明,萎缩过程中水流挟沙力 S_* 仍与 $(Q/M)^{0.28}$ 成正比,与一般概念下河床过程的规律是一致的。即断面越宽浅 (M 越大),水流挟沙力越低;反之,断面越窄深 (M 越小),水流挟沙力越高。

c. 1986 年以后,由于水沙条件变异,来沙系数增大,使得排沙比明显降低,且产生淤积的洪水出现几率大大增加。如对于 $0.021 \sim 0.055(\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^6$ 来沙系数的洪水,1986 年以前排沙比小于 80% 的洪水所占比例只有 35.3%,而 1986 年以后则增至 87.4%,同时,最大排沙比也相应减小 12.5%。试验进一步表明,无论何种河道萎缩模式,总体上来说,河道排沙比总是随来沙系数增大而减小,或者说河道淤积强度总是相应增加的。排沙比与河道萎缩模式间的响应关系也说明了尽管在“滩槽并淤”模式下主河槽输沙能力有所提高,但并不能改变河道总体淤积的状况。

d. 河道萎缩是可以逆转的,只要设法增大河槽的水流强度,就可以有效地减轻河道淤积萎缩的程度。

参考文献:

[1] 陈东,胡春宏,张启舜,等.河床枯萎疏浚浅论[J].泥沙研究,2000(1):65-68.

[2] 申冠卿,张晓华,李勇,等.1986 年以来黄河下游水沙变化及河道演变分析[J].人民黄河,2000,22(9):10-11.

[3] 李勇,张晓华,尚红霞.黄河下游宽河段河道调整对洪水水沙输移特性及防洪的影响[R].郑州:黄河水利科学研究院,2003.

[4] 陈界仁,官学文.黄河下游河道萎缩过程初步分析[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):501-504.

[5] 马喜荣,夏自强,陈竹青,等.黄河下游泥沙淤积对洪水演进的影响[J].水利水电科技进展,2004,24(7):4-6.

[6] 姚玉德,毕东升,李静.黄河下游过渡型河段漫滩洪水演进规律探讨[J].水利水电科技进展,2000,20(6):29-31.

[7] 姚文艺,侯志军,常温花.萎缩性河道演变规律与致灾机理研究[R].郑州:黄河水利科学研究院,2005.

[8] 姚文艺,王德昌,侯志军.黄河下游河道萎缩模式研究[J].泥沙研究,2004(10):8-14.

[9] 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]/黄河水利委员会水利科学研究所科学论文文集:第一集.郑州:河南科学技术出版社,1989:12-26.

[10] 麦乔威,赵业安,潘贤娣,等.多沙河流拦洪水库下游河床演变计算方法[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,1995:96-103.

[11] 齐璞,王昌高,孙赞盈.黄河艾山以下河道输沙特性研究[C]/齐璞,赵文林,杨美卿.黄河含沙水流运动规律及应用前景.北京:科学出版社,1993:167-200.

(收稿日期:2005-08-02 编辑:高建群)

