

黄河下游“驼峰”河段来水来沙条件和 不平衡输沙特性研究

黄飞扬¹, 周子骏²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 黄河下游特殊的来水来沙条件和独特的地理环境使高村—艾山河段成为了典型的“驼峰”河段。利用黄河下游各水文站1990—2020年的水沙实测资料,重点分析了黄河下游花园口—高村、高村—艾山河段来水来沙情况和断面形态特征,并通过黄河下游不平衡输沙率公式,建立排沙比与河道来沙系数、河相系数之间的函数关系。结果表明:小浪底水库投入运行后黄河下游“驼峰”河段来沙量急剧减少。在此基础上构建了黄河下游排沙比与淤积量之间的数值关系,并进一步建立了排沙比与来沙系数、河相系数之间的幂函数公式,该公式可以根据黄河下游河道来水来沙条件和河道断面形态等参数更加准确地计算出下游各河段的冲淤变化情况。

关键词: 来水来沙条件; 水沙关系; 驼峰河段; 来沙系数; 河相关系; 黄河下游

中图分类号:TV143

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)04-0125-08

Water and sediment inflow conditions and non-equilibrium sediment transport characteristics in the “hump” reach of the lower Yellow River

HUANG Feiyang¹, ZHOU Zijun²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Due to the special water and sediment inflow conditions and unique geographical environment, the Gaocun – Aishan reach of the lower Yellow River has become a typical “hump” reach. Taking the water and sediment data of hydrological stations in the lower Yellow River from 1990 to 2020 as the research object, this paper focuses on the water and sediment inflow and section morphological characteristics of Huayuankou – Gaocun and Gaocun – Aishan sections in the lower Yellow River, and establishes the functional relationship between sediment discharge ratio, river sediment inflow coefficient and river facies coefficient using the formula of non-equilibrium sediment transport rate. The results show that after the Xiaolangdi Reservoir was put into use, the sediment inflow in the hump reach of the lower Yellow River decreased sharply. Based on this situation, the numerical relationship between the sediment discharge ratio and the sediment deposition in the lower Yellow River is constructed and the power function formula of sediment discharge ratio, sediment inflow coefficient and river facies coefficient is further established. This formula can calculate the scouring and silting changes of each reach more accurately using the parameters such as water and sediment inflow conditions and river section morphology of the lower Yellow River.

Key words: water and sediment inflow condition; water sediment relationship; hump reach; sediment inflow coefficient; river facies relationship; the lower Yellow River

收稿日期:2021-10-15; 修回日期:2022-05-11

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y222010)

作者简介:黄飞扬(1995—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究工作。

通讯作者:周子骏(1990—),男,江苏南京人,博士,主要从事波浪与海堤相互作用研究。

1 研究背景

由于黄河下游水流含沙量较大、水沙年际间不平衡以及独特的地理环境^[1-3],使其逐渐成为了典型的不平衡输沙河段^[4],在这种情况下河流发展十分迅速,河床演变剧烈,尤其在高村-艾山河段表现得尤为明显,出现了过洪水能力远小于其上、下游河段的“驼峰”现象^[5],因而高村-艾山河段为小浪底水库运用后黄河下游河道整治的重点区域。为了对此现象进行合理解释,众多学者对驼峰河段的特殊性进行了研究,其中,钱宁^[6]采用上站含沙量获得了计算黄河下游各河段的输沙率公式,此公式结构简单、方便实用,在黄河下游的河道输沙计算中得到了广泛的应用;韩其为^[7]在前人研究的基础上对黄河下游驼峰河段的成因进行分析,探索了黄河下游不平衡输沙现象的发展过程;陈绪坚等^[8]通过改进黄河下游泥沙配置综合评价方法,计算出了改善河道不平衡输沙危害的新水沙系列和配置模式条件;张旭东等^[9]在上述学者研究的基础上,采用空间插值和实测资料分析了下游河段的地貌演变情况,并提出了“驼峰”河段的整治方案。江恩惠等^[10]总结出了黄河下游不平衡输沙的两大问题,并对黄河下游驼峰河段的特殊性机理给出了合理解释。上述研究成果表明,黄河下游不平衡输沙特性是驼峰现象发展的诱因,该问题亟待解决。

目前研究不平衡输沙的方法主要是拟合输沙率经验公式^[11-12]和分析排沙比与来水来沙关系^[13-14]的影响因素。如钱宁等^[15-16]对黄河下游河道输沙能力进行了全面的分析,从而提出了满足黄河下游输沙特点的经验公式,进一步建立了河段输沙率与

不平衡输沙之间的关系,但其研究中没有完全给出各个参数与河道水沙特征、地貌特征之间的相关性和趋势性,然而在对黄河下游河道输沙自我调整能力进行分析后可以发现,黄河下游的输沙率与上游流量、含沙量均存在一定的关系^[17]。在对驼峰现象的研究过程中,众多学者都对其形成机理给出了解释,并对其发展趋势进行了预测,陈建国等^[18]针对河段断面形态特征,分析了“驼峰”河段的形成原因,并提出了“机械挖淤”的治理方式;齐璞^[19]提出了塑造窄深河槽的方法来改造“驼峰”河段,利用窄深河道可提高输沙率的特点,将高含沙水流输送入海,以改善驼峰现象;许炯心^[20]分析多个洪水场次的资料后,计算得出了黄河下游各河段“微冲不淤”的临界来沙系数,提出了改善黄河下游驼峰河段的流量与含沙量范围。对于黄河下游河段,采取一定的措施塑造合理的水沙过程,对于“驼峰”河段的治理具有重要的意义。因此本文在钱宁等^[15-16]总结的黄河下游河道输沙率公式的基础上进行推导,进一步拟合出了黄河下游河段排沙比分别与来水来沙条件、断面形态特征之间的计算公式,同时建立了完整的黄河下游泥沙输移体系与黄河下游来水来沙条件、河道断面形态特征之间的函数关系,使黄河下游不平衡输沙理论得到进一步的完善。

2 黄河下游来水来沙量变化过程分析

黄河下游河道承担着泄洪及泥沙输送的双重任务,来水来沙条件受小浪底水库调节作用的影响。通过花园口水文站实测水文数据对黄河下游“驼峰”河段发展较为明显的1990-2020年的黄河来水来沙过程进行统计,得到的来水来沙量变化过程如图1所示。

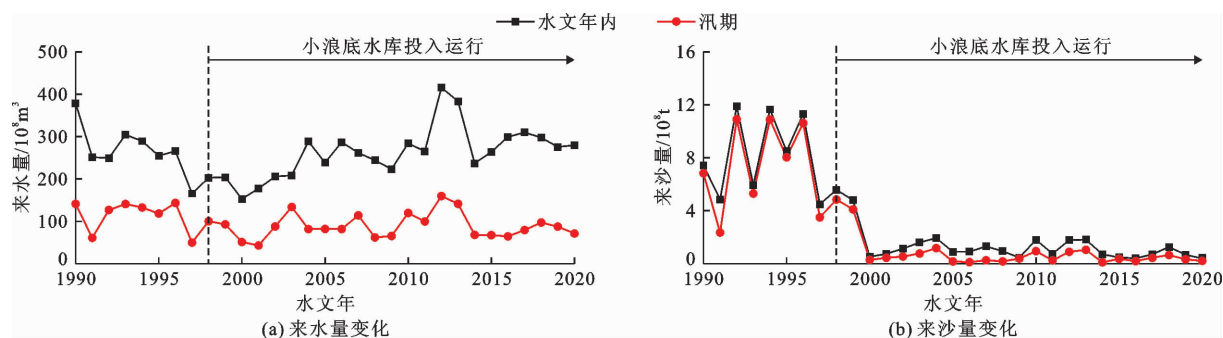


图1 1990-2020年黄河下游花园口水文站各年份来水来沙量变化情况

如图1所示,在1998年之前,即小浪底水库建成投入使用之前,花园口站来水量连续偏枯,来沙量年际变化较大,年内水沙分配不均衡,其中最小来沙量年份为1997年,仅为 4.5×10^8 t,最大来沙量年份

为1992年,高达 11.8×10^8 t。当1998年小浪底水库正式投入运行之后,水库自身对黄河下游年内水量起到了“丰蓄枯排”的调节作用,使得年内水量分配发生变化,其中汛期水量逐渐减小且变化平稳;在

小浪底水库的拦蓄作用下,大量泥沙沉积在小浪底库底,使其下游水流含沙量急剧减小,年均来沙量由 1998 年小浪底水库运行之前的 $5.80 \times 10^8 \text{ t/a}$ 减少到 2020 年的 $0.65 \times 10^8 \text{ t/a}$,减少了 88.7%。

有关资料文献^[16]表明,黄河下游的冲淤变化主要发生在含沙量变化较大的汛期,汛期的下游河道主要承担着水量输送和泥沙输运的任务,这使得黄

河下游在汛期会产生较为剧烈的河道演变。通过对 1990–2020 年黄河下游高村–艾山河段的汛期和非汛期的来水来沙量数据进行统计后发现,相对于非汛期而言,各年份汛期的来水来沙过程相差较大。1990–2020 年汛期和非汛期黄河下游高村–艾山河段冲淤量年际变化以及高村水文站来沙系数如图 2 所示。

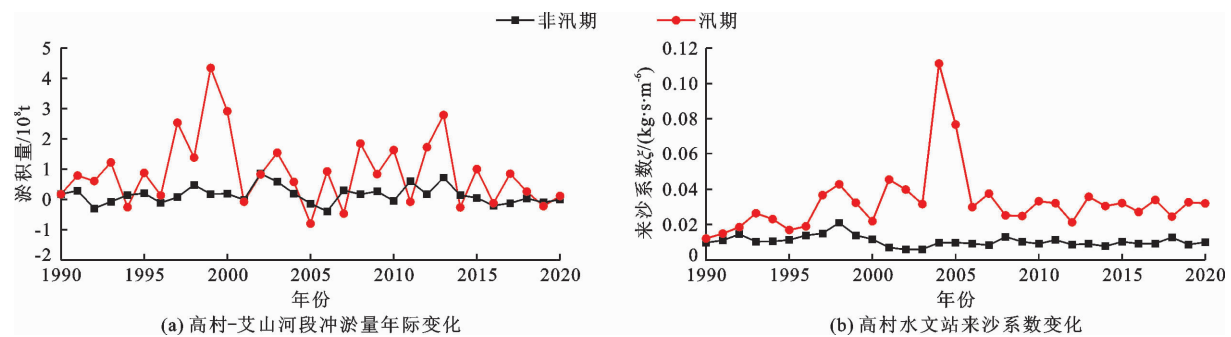


图 2 1990–2020 年汛期和非汛期黄河下游高村–艾山河段冲淤年际变化及高村水文站来沙系数

如图 2 所示,1990–2020 年汛期黄河下游高村–艾山河段不同年份的淤积量变化较大,有些年份还发生了冲刷,而非汛期河道整体基本保持冲淤平衡状态(图 2(a))。相应时段黄河下游高村水文站汛期的来沙系数明显大于年内非汛期的来沙系数(图 2(b)),从侧面反映出黄河下游在汛期存在“水少沙多,水沙搭配不平衡”等问题。黄河下游高村站非汛期来沙系数各年份基本维持在 $0.009 \sim 8 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 左右,且在非汛期黄河下游高村–艾山河段总体淤积量略小于 0,表明黄河下游“驼峰”河段在非汛期保持着较好的“微冲不淤”状态;但汛期由于水沙关系不协调,黄河下游“驼峰”河段主要以淤积为主,此时黄河下游高村–艾山河段整体表现为“多来多排多淤”的状态。

3 黄河下游汛期不同量级流量下的输沙关系分析

由图 2、3 可知,黄河下游在汛期会产生较强的河道冲淤变化,而在非汛期河道基本维持“微冲不淤”的状态。所以对黄河下游 1990–2020 年各年份的汛期水文资料进行了重点研究,发现当各水文站点的水流含沙量小于 $25 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,黄河下游在小浪底水库的调节下长期处于较为稳定的冲刷状态;而当黄河下游各水文站点的水流含沙量达到 $25 \sim 65 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,由于受到上游来水量和地形地貌的影响,黄河下游各河段的冲淤状态较为复杂;若各水文站点的水流含沙量大于 $65 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,在现有的黄河水

文资料记载中,下游河道一直处于淤积状态。

为了进一步了解汛期不同流量条件下黄河下游河段水流含沙量和冲淤比(冲淤比定义为冲淤量与来沙量之比,用于描述河道冲淤效果)之间的关系,对较为复杂的流量变化序列进行分级研究,其中将黄河下游流量按大小分为 $1\,000 \sim 2\,000$ 、 $2\,000 \sim 3\,000$ 、 $3\,000 \sim 4\,000$ 、 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 共 4 级,并分析不同流量级情况下含沙量变化对黄河下游河道冲淤比的影响,其结果如图 3 所示。

图 3 中各级流量含沙量与冲淤比之间的关系均以 Log3P1 型曲线进行拟合,其拟合方程形式为 $y = a - b \cdot \ln(x + c)$,具体拟合结果见表 1。

表 1 各级流量含沙量与冲淤比关系曲线拟合结果

方程参数	流量量级/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			
	1000 ~ 2000	2000 ~ 3000	3000 ~ 4000	4000 ~ 5000
a	-1.47	-4.49	-1.77	-2.01
b	-0.42	-1.08	-0.43	-0.55
c	2.16	14.25	15.29	13.33
$R^2(\text{COD})$	0.69	0.78	0.54	0.57
$R^2(\text{调整后})$	0.68	0.77	0.53	0.53

由图 3 和表 1 可知,不同流量量级下黄河下游河段水流含沙量与冲淤比呈较为明显的正比关系,且二者关系较为符合对数函数。随着含沙量的增大,黄河下游淤积效果明显增强,当含沙量逐渐增大

到 50 kg/m^3 以上时,冲淤比在不同流量量级条件下均大于 0,黄河下游处于一种持续淤积的状态。

综合上述分析可知,在不同来水量和含沙量组合条件下黄河下游河段的冲淤特性存在较大的差异。为了进一步研究黄河下游来水来沙条件与淤积量之间的关系,可利用黄河下游全河段排沙比 λ_s (排沙比 λ_s 为一定时段出口沙量与进口沙量之比) 估算一定水沙条件下黄河下游的淤积量 W_s 。黄河下游全断面的河道淤积量公式如下:

$$\begin{aligned} W_s &= Q_{in} S_{in} \left(\frac{S_{in} - S_{out}}{S_{in}} \right) \Delta t / 1000 \\ &= Q_{in} S_{in} (1 - \lambda_s) \Delta t / 1000 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: W_s 为黄河下游全断面的淤积量, t ; Q_{in} 为花园

口水文站测点的进入流量, m^3/s ; S_{in} 、 S_{out} 分别为花园口水文站测点进口、出口的水流含沙量, kg/m^3 ; λ_s 为黄河下游全河段排沙比,通过查阅相关时间段的黄河下游水文年鉴获取; Δt 为时间段, s 。

可以将 1 d (即 $\Delta t = 86\,400 \text{ s}$) 的淤积量定义为黄河下游河段的淤积强度 $W_{s/d}$,用于分析每日来水来沙条件对河道冲刷的影响。 $W_{s/d}$ 的计算公式如下:

$$W_{s/d} = 86.4 Q_{in} S_{in} (1 - \lambda_s) \quad (2)$$

式中: $W_{s/d}$ 为黄河下游全断面的淤积强度, t/d 。

利用公式(2)和 1990–2020 年黄河下游水文资料对黄河下游汛期非漫滩流量进行统计计算,得到了如图 4 所示的黄河下游来水来沙条件与河道淤积强度关系云图(图中无实测点的淤积强度定义为 0)。

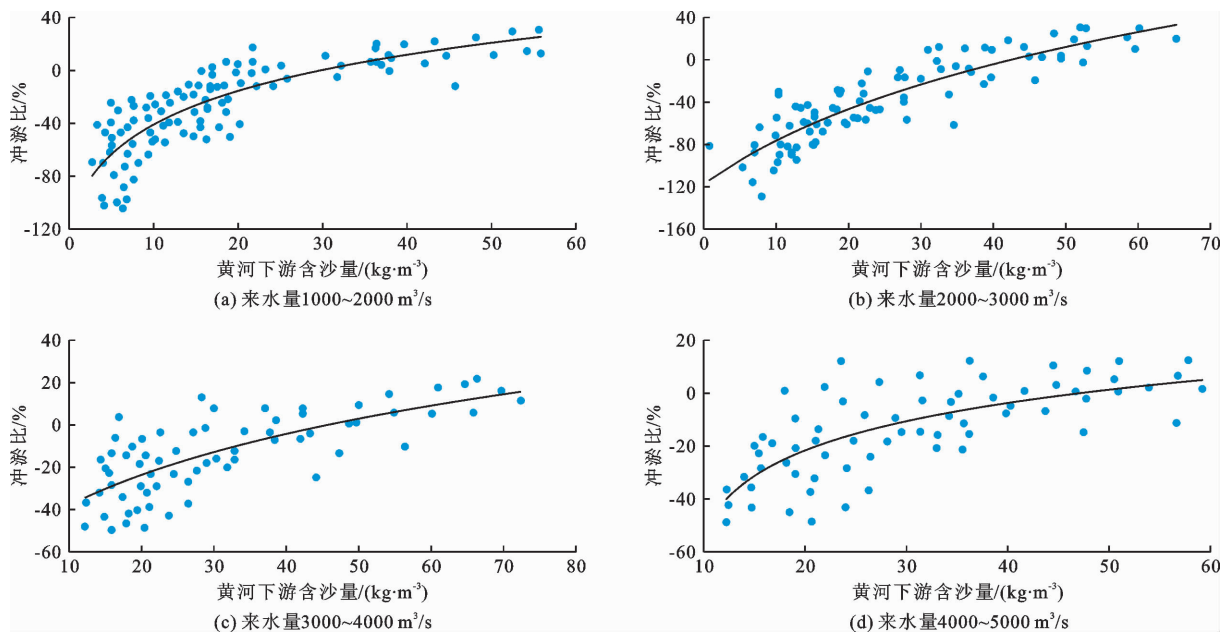


图3 不同流量级下黄河下游河段水流含沙量与冲淤比之间的关系

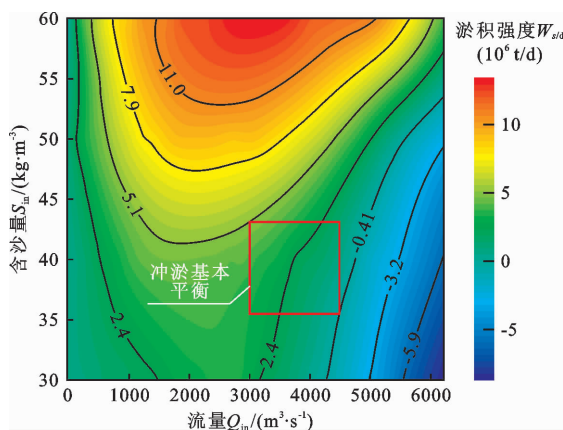


图4 黄河下游全断面来水来沙条件与河道淤积强度的关系云图

以黄河下游实际汛期流量范围为参考值,当黄

河下游河段来水来沙量在图 4 所示的矩形区域中时,则黄河下游的淤积强度在年内的平均值处于“微冲”状态,结合图 3 所示的 4 个不同流量级和含沙量组合的冲淤比变化结果总结得出:当花园口进口流量为 $3\,000 \sim 4\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 、含沙量为 $35.0 \sim 42.5 \text{ kg/m}^3$ 时,淤积强度平均值在 0 附近,此时黄河下游可保持较为稳定的均衡输沙方式。

4 黄河下游“驼峰”河段排沙比与来水来沙条件之间的关系

为了进一步探讨黄河下游“驼峰”河段独特的水沙特性,需要对黄河下游河段的来水来沙情况与排沙比之间的关系进行分析,通过参考相关研究发

现黄河下游排沙比可能直接受到黄河下游河道之间泥沙级配的影响。在对黄河下游相关流速查询中,因无法准确地计算出黄河下游的纵比降,从而不能通过求得河道摩阻流速而推算出不同流量级下泥沙浓度对应的输沙率。所以本文使用黄河下游来水来沙时间序列作为本次计算的基本条件,建立 1990 – 2020 年黄河下游“驼峰”河段排沙比 λ_s 与来水来沙条件之间的关系,引入来沙系数 ξ 作为重要参数,用于表征水沙条件(来沙系数定义为含沙量 S 与流量 Q 之比)。其中排沙比 λ_s 可以表示为:

$$\lambda_s = \frac{Q_{s-out}\Delta t}{Q_{s-in}\Delta t}$$

(3)

式中: λ_s 为排沙比; Q_{s-in} 、 Q_{s-out} 分别为河段进口、出口的输沙率,kg/s; Δt 为计算时间段。

由于黄河下游为典型的不平衡输沙河段,可以采用钱宁等^[15-16] 论证的黄河下游河段输沙率经验公式对黄河下游输沙率进行计算,黄河下游不平衡输沙率经验公式可以表示为:

$$Q_s = K S^a Q^b$$

(4)

式中: K 为输沙系数,其值随着河床的冲刷量的增大而减小; a 为沙量指数,与河床纵比降呈正相关; b

为流量指数,与河道的河相系数呈负相关。经钱宁等^[15] 验证发现 $a + b = 2$,其中 $a < 1$ 且 $b > 1$ 。

由于黄河各河段进、出口距离较远,使得出口输沙量对于黄河下游各河段的输沙率影响逐渐减小,此时可以认为沙量指数 $a \rightarrow 0$,再将公式(4) 代入公式(3) 可得:

$$\lambda_s = K \left(\frac{S}{Q} \right)_{in}^{b-1} \cdot \frac{Q_{out}^a}{Q_{in}^{2-b}} = K \left(\frac{S}{Q} \right)_{in}^{b-1} \cdot \left(\frac{Q_{out}}{Q_{in}} \right)^a$$

$$= K \xi^{b-1} \left(\frac{Q_{out}}{Q_{in}} \right)^a$$

(5)

在不考虑人为因素和水文条件(如降雨、蒸发、下渗^[13]、入汇流^[21]) 等因素的影响时,可以认为流量 $Q_{in} = Q_{out}$,从而简化公式(5) 可以得到:

$$\lambda_s = K \xi^{b-1}$$

(6)

根据公式(6) 可知,黄河下游各河段的排沙比与来沙系数呈幂指数函数关系,为了验证“驼峰”河段(高村 – 艾山河段) 因其独特的地形环境和水沙关系,而导致其河道输沙条件和输沙关系与其他河道存在的较大差异,对黄河下游花园口 – 高村、高村 – 艾山河段的排沙比与来水来沙条件建立幂函数关系,拟合结果如图 5 所示。

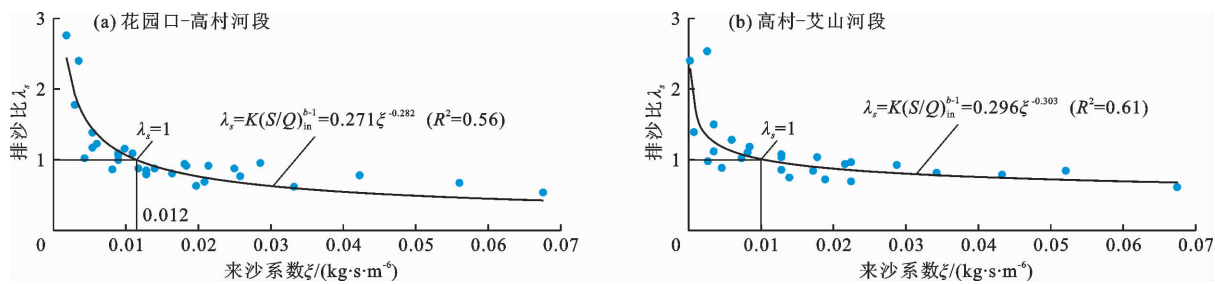


图 5 黄河下游花园口 – 高村、高村 – 艾山河段排沙比与来水来沙条件之间的幂函数关系

如图 5 所示,黄河下游“驼峰”河段及其以上河段排沙比与来沙系数之间存在较强的关联性,对上述二者关系进行幂函数拟合,拟合得到的相关参数如表 2 所示。

表 2 黄河下游花园口 – 高村、高村 – 艾山河段排沙比与来沙系数幂指数关系拟合结果

下游河段	输沙系数 K	流量指数 b	决定系数 R^2
花园口 – 高村	0.271	0.718	0.56
高村 – 艾山	0.296	0.697	0.61

如表 2 所示,黄河下游花园口 – 高村、高村 – 艾山河段排沙比与来沙系数之间存在较好的关联性和趋势性,二者拟合的幂指数函数曲线的决定系数分

别为 0.56 和 0.61。比较表 2 中的相关参数可以发现,花园口 – 高村河段的输沙系数 K 较高村 – 艾山河段偏小,表明花园口 – 高村河段相比于高村 – 艾山河段的冲刷量较大;花园口 – 高村河段的流量指数 b 较高村 – 艾山河段偏大,表明花园口 – 高村河段的河相系数较小,河道相对窄深,高村 – 艾山河段的河相系数较大,河道相对宽浅。当排沙比 $\lambda_s = 1$ 时(当 $\lambda_s > 1$ 时,河流处于冲刷状态;当 $\lambda_s < 1$ 时,河流处于淤积状态),即河道处于冲淤平衡状态时,花园口 – 高村河段相应的来沙系数为 $0.012 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{m}^6$,而下游的高村 – 艾山“驼峰”河段达到冲淤平衡时,其相应的来沙系数为 $0.010 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{m}^6$,这也间接表明了在水沙情况下,“驼峰”河段对于泥沙具有较强的滞留性。从而证明了黄河下游各

河段之间仍处于一种不平衡发展阶段。对图 5 中来沙系数的区间进行对比后可以发现,花园口-高村河段的来沙系数相较于高村-艾山河段偏小,在这种情况下使得高村站以下河段处于非饱和的输沙状态,从而十分有利于高村站下游输沙,减小了下游“驼峰”河段的淤积量。

5 黄河下游河槽形态特征与排沙比之间的关系

黄河下游河道尤其是花园口-高村游荡性河段的断面十分复杂^[22],为典型的复式断面,由于黄河下游河段河型存在差异,其输沙方式也有较大的不同。因此为了考虑河道断面形态对于黄河下游水沙关系的影响,在以往的研究中一般需要引入河相系数来表示断面的形态。早期的河相关系基本上是经验性质的,本文选用较为经典的格鲁什科夫的河相系数计算公式^[22-23],其表达式如下:

$$\frac{\sqrt{\bar{B}_{bf}}}{\bar{h}_{bf}} = \zeta \quad (7)$$

式中: $\bar{B}_{bf}$ 和 $\bar{h}_{bf}$ 分别为平滩河宽和平滩水深,m,二者均为基于平滩流量下河段的水流和断面状态而言的。其中,平滩河槽形态系数可使用考虑断面间距的加权平均法进行计算:

$$\bar{G}_{bf} = \exp \left\{ \frac{1}{2L} \sum_{i=1}^{N-1} [(\ln G_{bf}^{i-1} + \ln G_{bf}^i) \cdot \Delta x_i] \right\} \quad (8)$$

式中: G_{bf}^{i-1} 、 G_{bf}^i 分别为第*i*-1、*i*个断面的平滩河槽形态参数(该参数为河道达到平滩流量时的平滩宽度 $\bar{B}_{bf}$ 或者平滩水深 $\bar{h}_{bf}$); Δx_i 为相邻两个断面之间的距离,m;*N*为计算河段中实际的断面数;*L*为计算河段的长度,m。

由公式(8)计算得到的黄河下游花园口-高村、高村-艾山河段的平滩河槽形态参数如图6所示。由图6可以看出,黄河下游河段的平滩水深呈不断增加的趋势,且花园口-高村河段相较于高村-艾山河段的增幅更大,尤其是1999-2002年小浪底水库投入使用后,使得黄河下游游荡性河段在年内整体以冲刷为主,从而造成河道加深。在河段平滩河宽方面,由于花园口-高村河段为典型游荡性河段,河床稳定性较差,所以河宽年际变化较为剧烈,但其平均值基本稳定。

根据花园口-艾山河段的地形资料^[24]和图6的计算结果,采用公式(7)对黄河下游达到平滩流量时的河相系数进行计算,并对1990-2020年黄河下游的实测水沙资料进行统计,由此计算出黄河下游花园口-高村、高村-艾山河段的排沙比与河相系数之间的变化关系,结果如图7所示。

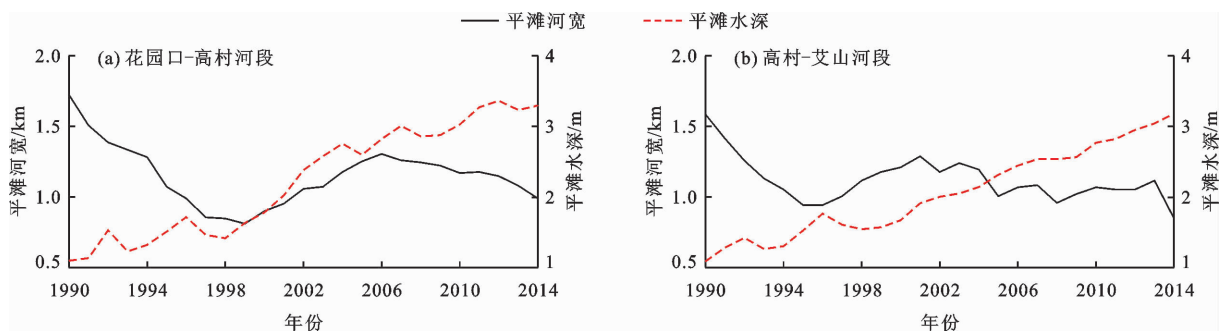


图6 黄河下游花园口-高村、高村-艾山河段平滩河槽形态参数

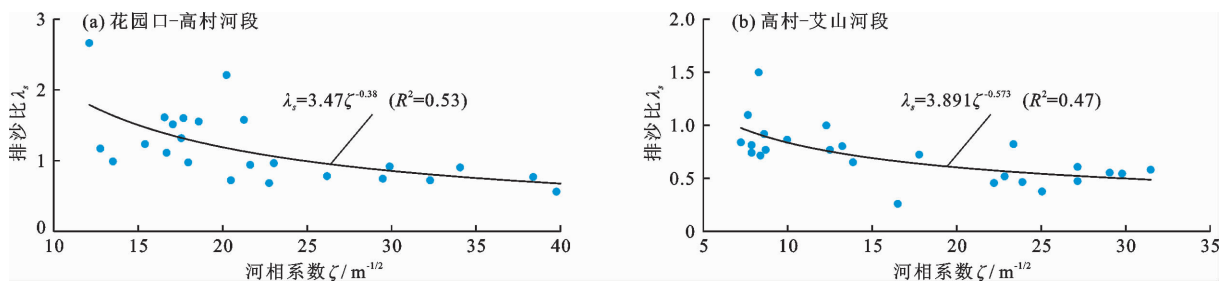


图7 黄河下游花园口-高村、高村-艾山河段河相系数和排沙比之间的变化关系

如图7所示,黄河下游游荡性河段(花园口-高村河段)和“驼峰”河段(高村-艾山河段)的排沙

比 λ_s 与河相系数 ζ 之间存在较为稳定的幂函数关系,拟合公式的决定系数 R^2 分别为0.53和0.47,表

明公式的相关性较好。当河相系数逐渐增大时,排沙比逐渐减小,这是因为随着河相系数的增大,河道变得宽浅,使得河道输沙能力逐渐减弱。从河相系数的分布上看,花园口 - 高村河段由于河床的不稳定性导致河相系数范围分布较广,当河相系数 ζ 大于 $26\text{ m}^{-1/2}$ 时,该河段处于淤积状态;高村 - 艾山河段的河相系数分布范围较窄,河道相对较为稳定,当河相系数 ζ 大于 $9\text{ m}^{-1/2}$ 时,该河段处于淤积状态。这也证明在相同的河道断面形态情况下黄河下游“驼峰”河段更加容易淤积。总体上看,上述河段在不同的年份内有淤有冲,但“驼峰”河段冲刷难度较大,更易淤积。

通过以上分析可知,黄河下游排沙比与来沙系

数 ξ 、河相系数 ζ 之间均保持着较好的幂函数关系,故可以建立黄河下游河段来水来沙条件与河槽形态的特征函数,同时考虑两者对黄河下游河道冲淤特点的影响,最终建立的函数表达式如下:

$$\lambda_s = K_1 \xi^A - K_2 \zeta^B + C \tag{9}$$

式中: K_1 、 K_2 分别为沙量输沙系数和形态输沙系数; A 、 B 分别为沙量指数和形态指数; C 为经验参数,主要受到河流比降、河道糙率等因素影响。

本文对黄河下游水文年鉴 1990 - 2020 年中各水文站点的数据进行了统计,并结合公式(9)对其中的参数 K_1 、 K_2 、 A 、 B 、 C 进行了计算。再对水文年鉴数据进行了相关性分析,对参数的正确性进行了率定和验证。得到如表 3 所示的率定结果。

表 3 黄河下游花园口 - 高村、高村 - 艾山河段公式(9)参数率定结果

河段	沙量输沙系数 K_1	形态输沙系数 K_2	沙量指数 A	形态指数 B	经验参数 C	决定系数 R^2
花园口 - 高村	1.876	-0.113	0.467	0.425	1.486	0.68
高村 - 艾山	2.044	-0.142	0.385	0.398	1.245	0.73
艾山 - 涿口	1.654	-0.106	0.426	0.574	1.387	0.78
涿口 - 利津	1.948	-0.092	0.403	0.502	1.276	0.72

如表 3 所示,黄河下游花园口 - 高村、高村 - 艾山河段公式(9)拟合曲线的决定系数 R^2 分别为 0.68 和 0.73,相较于公式(6)的相关性有所提高;对公式(9)右边各项参数的数值大小进行对比后发现, $K_1 \xi^A$ 小于 $K_2 \zeta^B$ 且前者仅为后者的 50%,说明来沙系数相较于河相系数对排沙比的影响更弱,即来沙系数对河道冲淤情况的影响小于河流断面形态的影响;公式(9)中加入了经验参数 C ,可以更加全面地反映出黄河下游不同河型对河道冲淤变化的作用,因此公式(9)可以更加准确地计算出黄河下游河段排沙比与来沙系数、河流断面形态之间的关系。

6 结 论

本文利用黄河下游河段 1990 - 2020 年实测的水文资料,对黄河下游来水来沙条件进行了分析。以“驼峰”河段特殊的不平衡输沙特点为基础,建立了黄河下游排沙比与来沙系数、断面形态之间的函数关系,得出如下结论:

(1)自 1998 年小浪底水库投入使用后,黄河下游来水来沙量急剧减少。黄河下游汛期河道总体处于淤积状态;非汛期来沙系数维持在 $0.009\ 8\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ 左右,黄河下游总体上维持着“微冲不淤”的稳定状态。

(2)通过对黄河下游汛期水沙关系进行分析并对来水流量进行分级,研究了汛期不同流量情况下冲淤比与黄河下游含沙量之间的关系。结果表明,当黄河下游花园口进口流量在 $3\ 000\sim4\ 300\text{ m}^3/\text{s}$ 、含沙量在 $35.0\sim42.5\text{ kg}/\text{m}^3$ 区间时,黄河下游可保持较为稳定的均衡输沙模式。

(3)黄河下游驼峰河段相较于其上游河段更易于淤积,“驼峰”河段冲淤平衡的来沙系数为 $0.010\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$,与结论(1)所示的黄河下游来沙系数维持在 $0.009\ 8\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ 时河道处于“微冲不淤”的状态进行对比,“驼峰”河段易于淤积且年内长期处于淤积状态。

(4)使用黄河下游地形实测资料和水文资料构建了河槽形态特征与排沙比之间的幂指数关系。进一步建立了如公式(9)所示的黄河下游河段排沙比的计算公式,该公式相较于公式(6)提高了计算的准确性,更适合于对黄河下游不平衡输沙率的计算。

参考文献:

[1] 李仁燕,于洋,任若璇.黄河下游引水引沙对输沙水量影响分析[J].山东水利,2020(12):28-29+42.
[2] 丰青,李勇,李小平.黄河下游高含沙水流输沙的可能性与制约因素[J].人民黄河,2019,41(3):49-52.
[3] 李勇,窦身堂,谢卫明.黄河中游水库群联合调控塑造

- 高效输沙洪水探讨[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 20 - 23 + 28.
- [4] 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙的研究[J]. 科学通报, 1979, 24(17): 804 - 808.
- [5] 陈建国, 周文浩, 孙平. 黄河下游驼峰河段的形成机理[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 921 - 926.
- [6] 钱宁. 冲积河流稳定性指标的商榷[J]. 地理学报, 1958, 24(2): 128 - 144.
- [7] 韩其为. 黄河下游输沙及冲淤的若干规律[J]. 泥沙研究, 2004(3): 1 - 13.
- [8] 陈绪坚, 胡春宏, 安毓琪, 等. 黄河泥沙合理配置方案研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(3): 1 - 9.
- [9] 张旭东, 欧祖贤, 牛智航. 黄河下游水沙变化特点[J]. 水资源开发与管理, 2021(3): 20 - 24 + 19.
- [10] 江恩惠, 韩其为. 黄河非平衡输沙典型事例及其研究概述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(3): 161 - 165.
- [11] 郭彦, 侯素珍, 夏润亮, 等. 1955 - 2014 年黄河内蒙古河段水沙变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 70 - 77.
- [12] 阎永新, 杨凤栋, 尚俊生, 等. 黄河山东段典型漫滩洪水来源、演进特性及近年河道冲淤变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 167 - 171.
- [13] 夏军强, 王增辉, 王英珍, 等. 黄河中下游水库 - 河道 - 滩区水沙模拟系统的构建与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 652 - 665.
- [14] 夏军强, 王英珍, 李涛, 等. 河床横向摆动计算方法及其在黄河下游游荡段的应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 87 - 95.
- [15] 钱宁, 张仁, 李九发, 等. 黄河下游挟沙能力自动调整机理的初步探讨[J]. 地理学报, 1981, 36(2): 143 - 156.
- [16] 钱宁, 张仁, 赵业安, 等. 从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J]. 地理学报, 1978, 33(1): 13 - 26.
- [17] 李文文, 傅旭东, 吴文强, 等. 黄河下游水沙突变特征分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 108 - 113.
- [18] 陈建国, 周文浩, 孙平. 黄河下游驼峰河段的形成机理[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 921 - 926.
- [19] 齐璞. 黄河下游河道输沙泄洪机理、能力及治理前景[J]. 水利学报, 2007(S1): 264 - 268 + 282.
- [20] 许炯心. 黄河下游洪水的输沙效率及其与水沙组合和河床形态的关系[J]. 泥沙研究, 2009(4): 45 - 50.
- [21] 彭杨, 陈仕豪, 时玉龙. 黄河下水沙变化多时间尺度集对分析[J]. 泥沙研究, 2021, 46(2): 35 - 41.
- [22] 谢谦城, 苗伟波, 戴文鸿, 等. 水沙变化条件下黄河下游连续弯段水流特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 157 - 161 + 168.
- [23] 李勇, 张敏, 田勇, 等. 黄河下游河道改造与滩区治理方案可行性综合分析[R]. 郑州: 黄河水利科学研究院, 2018.
- [24] XIA Junqiang, LI Xiaojuan, LI Tao, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2014, 213: 255 - 265.

(上接第 116 页)

- [28] PEREZ - VEGA A, TRAVIESO C M, HERNANDEZ - TRAVIESO J G, et al. Forecast of temperature using support vector machines [C]// 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (IC-CCA). Piscataway: IEEE, 2016.
- [29] 蒋云钟, 冶运涛, 赵红莉, 等. 水利大数据研究现状与展望[J]. 水力发电学报, 2020, 39(10): 1 - 32.
- [30] AYELE T W, MEHTA R. Real time temperature prediction using IoT [C]// 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Piscataway: IEEE, 2018.
- [31] ZAYTAR M A, El AMRANI C. Sequence to sequence weather forecasting with long short-term memory recurrent neural networks [J]. International Journal of Computer Applications, 2016, 143(11): 7 - 11.
- [32] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735 - 1780.
- [33] 殷仕明, 徐炜, 熊一橙, 等. 基于迁移学习的长短时记忆神经网络水文模型[J]. 水力发电学报, 2022, 41(6): 53 - 64.
- [34] 郝玉莹, 赵林, 孙同, 等. 基于 RF - LSTM 的地表水体水质预测[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 41 - 48.
- [35] 倪铮, 梁萍. 基于 LSTM 深度神经网络的精细化气温预报初探[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(11): 233 - 236 + 271.
- [36] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 暖冬等级 GB/T 21983—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [37] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 冷冬等级 GB/T 33675—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.