

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.05.033

黄河北干流河段桃汛洪水演进特征分析

侯素珍^{1,2}, 魏欢^{1,2}, 范冰洁³, 胡恬^{1,2}

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450003;

3. 山西黄河河务局, 山西 运城 044000)

摘要: 为研究桃汛洪水在黄河北干流演进过程及对潼关高程的影响, 根据北干流河段沿程水文站实测资料, 统计分析了桃汛洪水水沙特征值的沿程变化。结果表明, 桃汛期的洪峰、沙峰、洪量和沙量从头条拐到潼关总体增加, 洪峰和沙峰的区间变化受水库运用影响较大; 洪峰经天桥水库增值较大, 之后到潼关沿程逐渐衰减、洪水过程坦化; 天桥水库排沙产生比较高的瞬时含沙量, 多次超过 100 kg/m^3 , 但沿程迅速衰减坦化, 洪水期沙量仍表现为沿程增加; 万家寨水库运用初期削减洪峰、洪量减少, 直接影响潼关的洪水过程, 桃汛试验后潼关洪峰和洪量增加。因此, 建议桃汛期万家寨等水库的调度需要继续保持一定的出库流量指标, 同时水库可以进行适当排沙, 发挥桃汛洪水对河道的有利作用。

关键词: 黄河北干流; 桃汛洪水; 洪水演进; 水沙特征值

中图分类号: TV141.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)05—0217—06

Analysis of Spring Flood Evolution Characteristics in the North Main Reach of Yellow River

HOU Suzhen^{1,2}, WEI Huan^{1,2}, FAN Bingjie³, HU Tian^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

2. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, MWR, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

3. Shanxi Yellow River Administration Bureau, YRCC, Yuncheng, Shanxi 044000, China)

Abstract: The characteristic values of water and sediment in spring flood season is statistically analyzed according to the measured data of hydrological stations, as well as the evolution process and influence factors of the flood in the North main stream of Yellow River. The results show that flood peaks, sediment peaks, runoff and sediment volume generally increase from Toudaoguai to Tongguan during the spring flood; the flood peak values increase through Tianqiao reservoir, and then gradually decrease along the way to Tongguan. Tianqiao reservoir produced high instantaneous sediment concentration, which was more than 100 kg/m^3 for many times, but it rapidly decreased along the river, and the sediment volume still increased. The flood peak and runoff in Tongguan reduced at the early stage of Wanjiashai reservoir operation, its increased after the experiment of spring flood. Therefore, it is suggested that the operation of Wanjiashai reservoir should continue to maintain a certain discharge during spring flood, and at the same time, the reservoir can be properly desilting to play a beneficial role of spring.

Keywords: north main stream of Yellow River; spring flood; flood evolution; flood water and sediment characteristic values

黄河有四汛, 即桃汛、伏汛、秋汛、凌汛, 分暴雨洪水和冰凌洪水两个类型。在夏季7月—8月形成的

暴雨洪水称“伏汛”, 是黄河的主汛期; 秋季9月—10月一般由华西秋雨形成的暴雨洪水称“秋汛”, 伏秋两

收稿日期: 2022-04-15

修稿日期: 2022-05-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407406; 2017YFC0405202)

作者简介: 侯素珍(1964—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事河流泥沙及河床演变研究工作。E-mail: hsz20130422@163.com

汛时间相连,合称“伏秋大汛”。在冬季,因河道封冻,河槽大量蓄水,在解冻开河时,河道水流伴有大量冰凌下泄,很容易在弯曲狭窄河段卡冰阻水,壅高水位,威胁堤防安全,称“凌汛”。在 3 月底、4 月初,宁蒙河段解冻开河,河槽蓄水量下泄形成洪水过程,传播到下游正值桃花盛开季节,称“桃汛”。

黄河中游汛期洪水峰高、量大、含沙量高,对相应水沙变化和洪水特性研究较多^[1-3],对桃汛洪水关注较少。宁蒙河道凌汛融冰形成的桃汛洪水,至头道拐站具有较大的洪峰,演进到潼关形成明显的洪水过程,对潼关高程具有一定的冲刷作用^[4-6]。在头道拐至潼关河段的洪水演进过程中,受山西河曲段凌汛槽蓄水量、沿程支流入汇、北干流河道冲淤调整,以及天桥水库和万家寨水库运用的影响,洪峰、洪量以及含沙量均发生变化^[7]。1998 年 10 月万家寨水库下闸蓄水,初期凌汛期的运用改变了中游桃汛洪水过程,削弱了对潼关高程的冲刷作用^[5]。为更好发挥桃汛洪水对潼关高程的冲刷作用,2006 年以来开展利用桃汛洪水冲刷降低潼关高程试验(桃汛试验),在确保黄河内蒙古河段与北干流防凌安全的前提下,通过刘家峡、万家寨、天桥、三门峡水库的调度运用,优化桃汛期潼关水文站水沙过程,实现潼关河床的冲刷,降低潼关高程,兼顾有关枢纽发电排沙运用^[8-10]。水库调度对水沙过程的干涉程度直接影响桃汛洪水的沿程变化,洪水演进过程的不同对调水调沙和洪水调度中水沙对接效果产生影响。随着黄河流域高质量发展的推进,调水调沙和洪水调度对水库调控提出更高的要求,深入认识演进过程中水沙变化,可为水库精准调度提供参考依据。

1 研究区域概况

黄河内蒙古托克托县河口镇至陕西潼关河段称黄河北干流,全长 716.6 km。内蒙古头道拐到龙门河段位于晋陕峡谷,俗称“大北干流”,支流众多,落差较大,其间有万家寨水库与天桥水库。龙门至潼关河段,俗称“小北干流”,河床宽浅,水流散乱,主流游荡不定,为典型的堆积游荡型河道。头道拐水文站是中上游分界的控制站,也是万家寨水库的入库站;河曲水文站为天桥水库入库站、万家寨水库出库站,府谷水文站为天桥水库出库站;龙门水文站为小北干流的入口站。潼关断面位于黄河和渭河交汇区下游,潼关高程(潼关(六)断面 $1\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量相应水位)相当于渭河下游侵蚀基准面,是三门峡

水库运用的制约因素。区域主要水文站及工程位置见图 1。

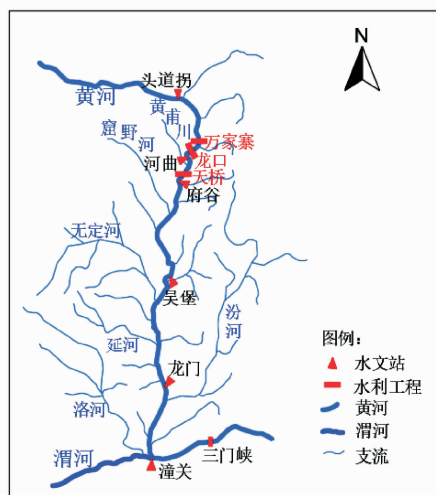


图 1 研究区示意图

天桥水库是一座以径流发电为主、兼有防洪功能的中型水电站,位于河曲与府谷区间的峡谷河段。1975 年 12 月截流,1976 年底第一号机组开始发电,1978 年 7 月 4 台机组全部投产,4 台机组的最大泄流量 $870\text{ m}^3/\text{s}$ 。运用以来库区以淤积为主,开河期降低水位排冰排沙。

万家寨水库位于头道拐水文站与天桥水库之间,下距天桥电站 97 km,枢纽工程的主要任务为供水结合发电调峰,并兼有防洪、防凌作用。水库 1998 年 10 月投入运用,采用“蓄清排浑”运用方式,水库的防凌调度运用主要以水位控制为主,尽量减少库水位在封河期和开河期对库尾河段冰情的影响,凌汛前降低水位、洪峰期削峰运用。

2 洪水演进过程

以头道拐到潼关区间干流水文站实测资料为依据,分析洪峰和含沙量的沿程变化过程。

2.1 洪峰流量演进过程

内蒙古河段凌汛开河在头道拐站形成的桃汛洪水,洪峰流量一般在 $1\ 400\text{ m}^3/\text{s} \sim 3\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 之间,多年(1954 年—2020 年)平均 $2\ 084\text{ m}^3/\text{s}$ 。经过万家寨水库、天桥电站和小北干流河道演进到潼关,洪峰流量有增有减,不同阶段呈不同的调整过程。

桃汛洪水演进过程中,受山西河曲段凌汛槽蓄水量、北干流河道及沿程支流汇入影响,同时受万家寨和天桥水库运用的影响。对比潼关站和头道拐站桃汛洪峰,多数年份沿程增加(见图 2)。结合水库

投运时间分4个时段,并根据资料完整情况分析不同时段的特征(见表1)。第一阶段为1954年—1977年天然情况,头道拐站洪峰平均为 $2\,095\text{ m}^3/\text{s}$,到潼关站除个别年份外均增加,最大增加 $940\text{ m}^3/\text{s}$,年平均增加 $398\text{ m}^3/\text{s}$ 。第二阶段为1978年—1998年天桥水库运用期,头道拐洪峰平均为 $2\,418\text{ m}^3/\text{s}$,至潼关平均增加 $251\text{ m}^3/\text{s}$,但区间各段差异较大。其中头道拐至河曲段洪峰流量有增有减、增大与减小次数基本相当,时段平均增大 $46\text{ m}^3/\text{s}$;河曲至府谷段受天桥水库泄水排沙的影响,洪峰流量以增大者居多,运用初期出库瞬时峰值曾达 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上,时段平均增大 $1\,206\text{ m}^3/\text{s}$ 达到 $3\,670\text{ m}^3/\text{s}$;府谷以下以洪峰衰减者居多,特别是府谷到吴堡之间衰减最快,府谷至潼关站洪峰流量平均减少 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$,洪峰流量的衰减主要是出库的峰型尖瘦、演进过程中洪水过程坦化所致。第三阶段为万家寨水库投入运用至桃汛试验前的1999年—2005年,头道拐洪峰流量平均为 $2\,151\text{ m}^3/\text{s}$,万家寨水库蓄水削峰减小了桃汛洪峰流量,到潼关站降低22%,平均为 $1\,676\text{ m}^3/\text{s}$ 。其中头道拐到河曲间以减小为主,平均减小 $357\text{ m}^3/\text{s}$,经天桥水库后洪峰增大,到吴堡站平均增值 $556\text{ m}^3/\text{s}$;吴堡到潼关仍为衰减过程,平

均减少 $674\text{ m}^3/\text{s}$ 。第四阶段为开展利用桃汛洪水冲刷降低潼关高程试验后的2006年—2020年,在保证防凌安全的情况下,万家寨水库维持一定水位,涨水过程入库流量达 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,水库进行补水,优化水库蓄泄过程,出库流量按调度指标控制。期间头道拐洪峰平均为 $1\,514\text{ m}^3/\text{s}$,头道拐到河曲洪峰流量增大,平均增大 $593\text{ m}^3/\text{s}$;经天桥水库到吴堡站,洪峰平均增加 $151\text{ m}^3/\text{s}$,小于之前时段;吴堡到潼关仍为衰减过程,到潼关洪峰流量平均 $2\,013\text{ m}^3/\text{s}$ 。1954年—2020年多年平均头道拐到潼关站桃汛洪峰流量增大 $271\text{ m}^3/\text{s}$ 。

总体看,洪峰流量沿程变化受水库运用直接影响,水库下游到潼关峰值基本为衰减过程。

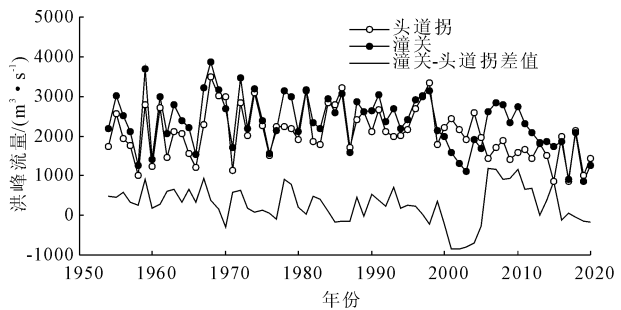


图2 历年头道拐和潼关站洪峰流量过程

表1 不同时期洪峰沿程变化比较

站名	1978年—1998年			1999年—2005年			2006年—2020年		
	衰减次数 占总数 /%	增大次数 占总数 /%	平均 变化值 /($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减次数 占总数 /%	增大次数 占总数 /%	平均 变化值 /($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减次数 占总数 /%	增大次数 占总数 /%	平均 变化值 /($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
头道拐—河曲	52	48	46	86	14	-357	13	87	593
河曲—府谷	10	90	1206	0	100	556	27	73	256
府谷—吴堡	71	29	-668	0	100	556	67	33	-105
吴堡—龙门	67	33	-236	100	0	-410	80	20	-162
龙门—潼关	52	48	-97	71	29	-264	67	33	-83
头道拐—潼关	24	76	251	86	14	-476	27	73	499

2.2 最大含沙量沿程调整

桃汛期头道拐到潼关站最大含沙量除个别年份外总体沿程增加,区间府谷和河曲站瞬时最大含沙量受不同因素影响有较大变化(见图3)。

由于内蒙古河段开河期冰水输移,头道拐站流量增大,相应含沙量也增大。根据1954年—2020年资料统计,最大瞬时含沙量多在 $8\text{ kg}/\text{m}^3\sim 20\text{ kg}/\text{m}^3$,平均为 $11.48\text{ kg}/\text{m}^3$,高于洪水期多年平均含沙量 $8.6\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

河曲站为天桥水库进库专用站,也是万家寨水库出库站。1978年有系统观测资料至万家寨水库

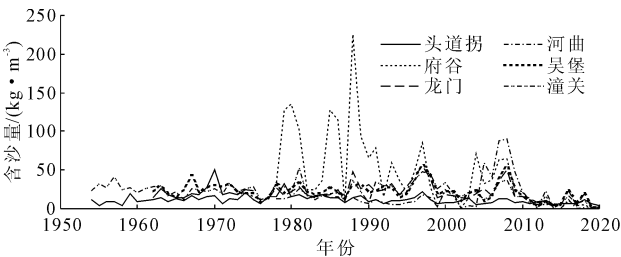


图3 头道拐—潼关历年沙峰值

运用前1998年,最大含沙量多在 $5\text{ kg}/\text{m}^3\sim 18\text{ kg}/\text{m}^3$ 之间,平均为 $12.4\text{ kg}/\text{m}^3$,较头道拐站同期平均值 $14.4\text{ kg}/\text{m}^3$ 略有减小。万家寨水库投入运用

至 2020 年,受水库调度运用影响河曲最大含沙量平均为 20.5 kg/m^3 ,大于相应入库值 8.36 kg/m^3 ;年际变幅增大,变化范围在 $0 \sim 90.8 \text{ kg/m}^3$,当库水位高时入库泥沙淤积在库区,出库含沙量低至 0,降低水位运用时水库排沙^[11],出库含沙量增加大于入库值,如图 3 中的 2005 年—2010 年。

府谷为天桥水库出库站,桃汛期最大含沙量取决于水库排沙运用。水库降低水位运用时,最大瞬时含沙量可达 100 kg/m^3 以上,如 1988 年达 228 kg/m^3 。但受天桥水库库区淤积泥沙量有限影响,高含沙持续时间短、衰减快,到吴堡站一般在 40 kg/m^3 以下,如图 4。一般情况下,当府谷沙峰在 20 kg/m^3 以上时沿程衰减,在 20 kg/m^3 以下时到吴堡有不同程度增加。

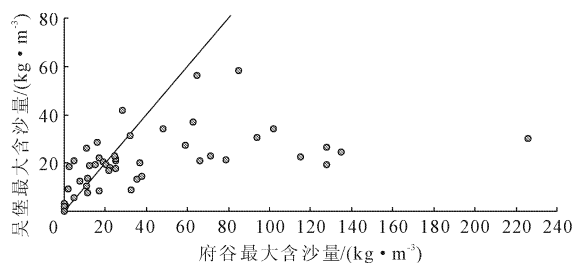


图 4 府谷—吴堡沙峰衰减关系

吴堡经龙门到潼关最大瞬时含沙量变化,各区间有增大也有减小,当吴堡含沙量较大或流量较小时沙峰沿程衰减,反之则沿程增加,从多年平均值看 3 站均接近 21 kg/m^3 。

总体看,在头道拐到潼关最大含沙量沿程变化中,天桥水库和万家寨水库运用对沙峰值影响较大。出库含沙量大时沿程迅速衰减,出库含沙量小时沿程增加,但增加值有限。2012 年后河曲含沙量多数年份极小甚至为 0,尽管得到沿程河道补给,潼关站最大含沙量仍然低于头道拐最大含沙量。

3 洪量和沙量变化

根据资料统计,1954 年—2020 年头道拐桃汛期最大 10 日洪量平均为 9.21 亿 m^3 ,经历了增大和减少过程(见图 5)。其中 1967 年以前洪量较小,平均为 7.20 亿 m^3 ;青铜峡和刘家峡水库投运后进行防凌运用,增大封河期流量,槽蓄水增量增多,1968 年—1992 年 10 日洪量平均为 9.29 亿 m^3 ,1993 年—2012 年多在 10 亿 m^3 以上,最大达 15.2 亿 m^3 ,平均为 11.46 亿 m^3 ;2013 年后受内蒙古河段应急分凌、海勃湾水利枢纽蓄水等的影响,降低了凌灾风

险,减少了开河期头道拐的水量和流量,2014 年—2020 年 10 日洪量平均仅 6.39 亿 m^3 。传播到潼关站,1998 年以前 10 日洪量均为增加,1954 年—1998 年平均增加 3.36 亿 m^3 ,达 12.26 亿 m^3 ;1999 年—2005 年受万家寨水库桃汛期蓄水调度的影响,潼关站洪量小于头道拐;2006 年后开展桃汛试验期加强了桃汛期万家寨水库的调度,进行补水和优化桃汛洪水过程,桃汛洪量增加,相应潼关洪量大于头道拐,年均增加 1.47 亿 m^3 。

在洪水传播过程中,由于区间支流入汇和水库运用的影响,洪量变化特点不同,沿程站最大 10 日洪量关系见图 6。可以看出,头道拐到河曲 1998 年以前有增有减,平均变化不大;1998 年—2005 年因万家寨水库调蓄河曲站洪量普遍减少,年平均减少 3.38 亿 m^3 ,直接影响潼关洪量;2006 年桃汛试验后,除个别小水年外河曲水量以增加为主。河曲到龙门段受支流入汇和天桥水库的影响,除个别年份外洪量总体为增加,年平均增加 1.06 亿 m^3 ,沿时序没有明确的变化趋势。潼关站洪量与龙门站呈正相关,由于区间渭河等支流入汇,洪量以增加为主,年平均增加 0.783 亿 m^3 。

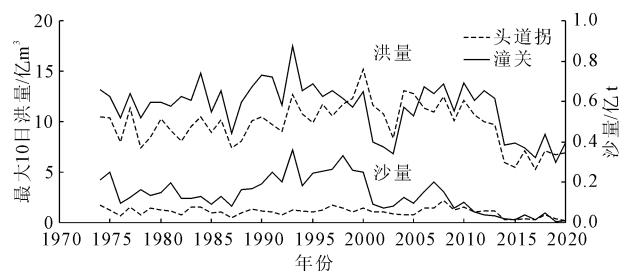


图 5 头道拐和潼关站 10 日洪量历年变化

在洪水传播过程中,由于粗泥沙落淤以及区间干支流河床泥沙补给,沙量沿程发生变化。根据桃汛期相应最大 10 日洪量的沙量统计分析,头道拐站多年平均(1954 年—2020 年)为 0.051 亿 t ,2014 年后较之前减少 69%;潼关站平均为 0.154 亿 t ,2000 年后呈减少趋势,特别是 2014 年水量减少后沙量更少,年均仅 0.022 亿 t ,较之前减少 86%;与头道拐相比,2009 年后潼关沙量变化很小,平均含沙量也与头道拐相近。从沿程变化看(见图 6),头道拐到河曲,除个别年份受万家寨水库调度排沙影响外洪水期沙量多为减少;河曲到龙门沙量变化大,除了河床补给,主要受天桥水库排沙运用的影响沙量增幅大,其中有两年减少主要是万家寨水库排沙集中而发生沿程衰减;龙门到潼关经过 132 km 的游荡性河

段沙量普遍增加,同时两站沙量趋势关系较好,具有多来多排的变化特点,以幂函数表示相关系数 R 达 0.96。

从洪水期平均含沙量看,天桥水库运用以来府谷站平均为 8.21 kg/m^3 ,到龙门增加 1.84 kg/m^3 ,龙门到潼关增加 1.98 kg/m^3 ,潼关站含沙量为 12.03 kg/m^3 。2009 年后没有明显变化。

从这些资料可知,虽然万家寨水库或者天桥水库出库瞬时含沙量较大,但传播至潼关的含沙量并不大,如 1988 年府谷站最大瞬时含沙量达 226 kg/m^3 ,传播至潼关站最大含沙量只有 36.7 kg/m^3 。同时桃汛期库区冲刷量有限,府谷以下输沙量和含沙量均沿程增加,因此水库排沙对小北干流和潼关河段冲刷影响甚微。

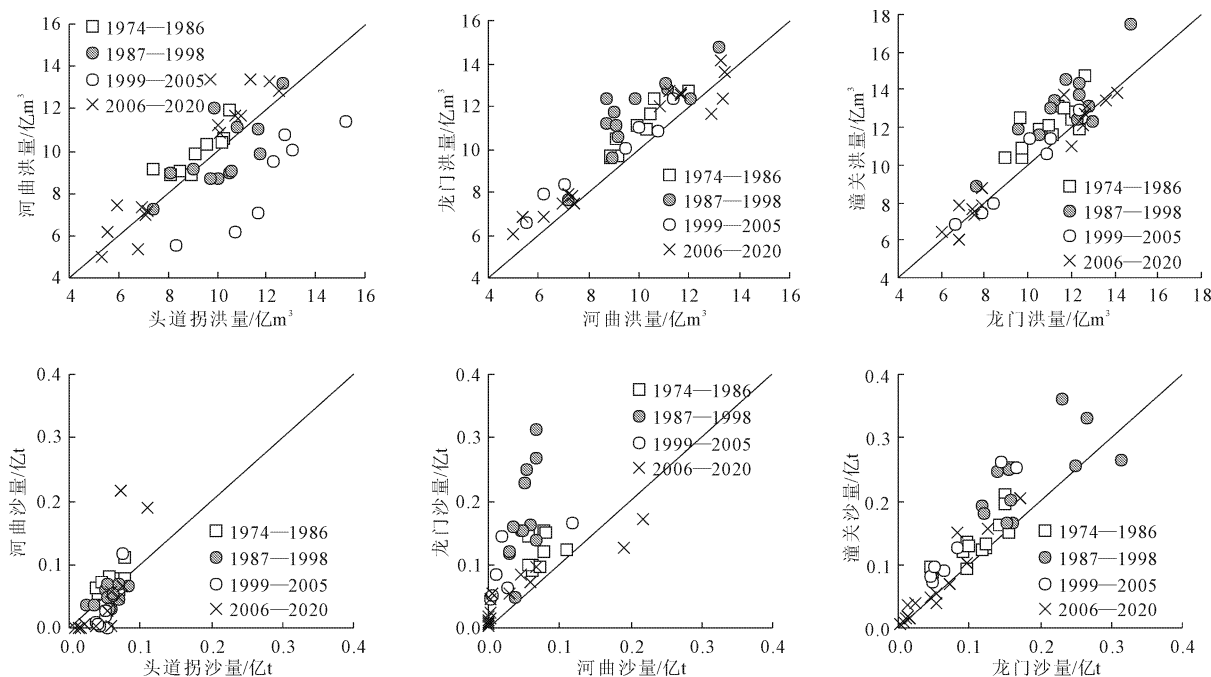


图6 头道拐到潼关站洪量和沙量变化

4 潼关高程变化

桃汛洪水演进到潼关断面,对潼关高程具有一定冲刷作用。三门峡水库 1974 年蓄清排浑运用以来至万家寨水库运用前,桃汛洪水期当三门峡坝前水位低于 320 m 时潼关高程一般表现为冲刷,流量越大、坝前水位越低,潼关高程冲刷下降值越大^[4],当坝前水位低于 316 m 后洪峰流量大于 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 即发生冲刷。1986 年—1998 年潼关站桃汛洪峰平均值 $2670 \text{ m}^3/\text{s}$,期间坝前最低水位平均值 317.6 m,潼关高程平均下降 0.18 m;1999 年—2005 年,桃汛洪峰平均值 $1680 \text{ m}^3/\text{s}$,坝前最低水位平均值 315.4 m,潼关高程平均下降 0.03 m,可见,洪峰流量减小直接影响潼关高程的冲刷下降。2006 年开始万家寨水库根据“桃汛试验”方案进行补水调度,其中 2006 年—2012 年潼关洪峰平均值为 $2537 \text{ m}^3/\text{s}$,坝前最低水位平均值 312.7 m,潼关高程平均下降 0.11 m;之后,受开河期头道拐洪量减小和万

家寨水库补水能力降低的影响^[12-16],潼关洪峰在 $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下,洪量减小,潼关高程有冲有淤,平均基本平衡。

可见,优化桃汛洪水期万家寨水库的调度,增大桃汛洪峰对潼关高程的冲刷作用,对控制潼关高程抬升具有重要作用。

5 结论

(1) 头道拐桃汛洪峰多年平均为 $2084 \text{ m}^3/\text{s}$,经过北干流河道到潼关多为增加,天然情况下增值较大,天桥和万家寨水库运用后增值减小或为负值,2006 年桃汛试验后洪峰增值增加。区间府谷以上受水库运用的影响,瞬时洪峰增值很大,沿程至潼关均为衰减过程。最大含沙量的变化受水库排沙运用的影响更大,当出库站含沙量超过 40 kg/m^3 快速衰减,小于 20 kg/m^3 时沿程增加的几率较高。

(2) 洪量和沙量总体呈沿程增加趋势,最大含沙量减小但平均含沙量增加,其中潼关与龙门站沙

量具有很好的关系,经过小北干流河段具有多来多排的特点。

(3) 天桥水库排沙运用可能造成比较高的瞬时含沙量,但从府谷到吴堡含沙量衰减很快,水库下游洪水期沙量总体为沿程增加。万家寨水库运用初期,头道拐到潼关洪峰衰减、洪量减少,不利于潼关高程的冲刷。

(4) 桃汛洪水对控制潼关高程抬升具有重要作用。建议桃汛期万家寨水库的调度继续保持一定的出库流量指标,到潼关站能维持在 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上,发挥桃汛洪水对河道的有利作用;同时洪水期水库可以进行适当排沙,不会对龙门以下河段冲淤产生明显影响。

参考文献:

- [1] 胡彩虹,吴泽宁,窦明,等. 黄河中游洪水特性及洪水资源化分析[J]. 人民黄河,2006,28(12):35-36.
- [2] 刘龙庆,蒋昕晖,陶新,等. 黄河中游“03.7”洪水特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(4):63-66.
- [3] 张丽,达朝媛. 黄河中游水沙变化特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(4):7-12.
- [4] 侯素珍,王平. 桃汛洪水对潼关高程的作用分析[J]. 泥沙研究,2005,30(1):53-56.
- [5] 翟家瑞,任伟. 万家寨水库运用对桃汛降低潼关高

程的影响[J]. 泥沙研究,2005,30(2):1-4.

- [6] 侯素珍,王平,张翠萍,等. 桃汛期潼关高程冲刷条件研究[J]. 人民黄河,2007,29(3):16-17.
- [7] 侯素珍,林秀芝,田勇,等. 桃汛洪水冲刷降低潼关高程关键技术研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.
- [8] 田勇,侯素珍,李小平,等. 桃汛洪水冲刷降低潼关高程优化方案研究[J]. 人民黄河,2010,32(8):13-15.
- [9] 林秀芝,侯素珍,常温花,等. 2008 年利用并优化桃汛洪水冲刷潼关高程试验效果分析[J]. 水资源及水工程学报,2009,20(4):77-79.
- [10] 侯素珍,田勇,林秀芝,等. 优化桃汛洪水冲刷降低潼关高程试验效果分析[J]. 人民黄河,2011,33(6):24-26.
- [11] 侯素珍,胡恬,路新川,等. 万家寨水库排沙运用效果分析[J]. 泥沙研究,2021,46(6):9-15.
- [12] 王富强,王雷. 近 10 年黄河宁蒙河段凌情特征分析[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(4):28-32.
- [13] 刘吉峰,杨建,霍世青,等. 黄河宁蒙河段冰凌变化新特点分析[J]. 人民黄河,2012,34(11):12-14.
- [14] 郜国明,邓宇,张宝森. 黄河内蒙古河段应急分洪区设置与运用研究[J]. 人民黄河,2010,32(9):16-17.
- [15] 张金良,鲁俊. 黄河内蒙古河段河道冲淤演变与凌情响应机制[J]. 水科学进展. 2021,32(2):192-200.
- [16] 刘晓岩. 2014—2015 年度黄河凌情特点分析[J]. 人民黄河,2015,37(11):28-32.

(上接第 203 页)

- [28] 王洋. 地铁上盖大底盘多塔层间隔震结构的抗地震倒塌性能分析与控制[D]. 西安:长安大学,2022.
- [29] 公路桥梁高阻尼隔震支座:JT/T 842—2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [30] Hayashikawa T, Julian F D R. Proc. 13WCEE, Vancouver, B. C., Canada, 2004, Paper No. 3332.
- [31] Fujita T, Suzuki S, Fujita S: High damping rubber bearings for seismic isolation of buildings. (1st report, Hysteretic restoring force characteristics and analytical models)[J]. Transaction of Japan Society of Mechanical Engineer, 1990, 56(523):658-666.

- [32] Kato H, Mori T, Murota N, et al. A new hysteresis model based on an integral type deformation-history for elastomeric seismic isolation bearings[C]. 2012, 15th WCEE.
- [33] Masaki N, Mori T. Validation of hysteresis model of deformation-history integral type for high damping rubber bearings[C]. 2017, 16th WCEE.
- [34] Bridgestone Corporation, Seismic isolation product lineup[Z]. Seismic Isolation & Vibration Control Products Business Department, Tokyo, Japan, 2017.