

1960 - 2017 年北洛河下游冲淤变化特征及其成因分析

曹绮欣¹, 关凯¹, 张冰洁^{2,3}, 包岁利²

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省河流工程技术研究中心, 陕西 西安 710018; 3. 陕西省江河水库管理局, 陕西 西安 710018)

摘要: 基于1960-2010年北洛河状头站实测水沙及1960-2017年北洛河下游淤积断面测验资料,采用原型观测的方法,统计分析了北洛河下游泥沙淤积量、典型横断面及河道纵比降变化,采用Mann-Kendall趋势检验法对状头站的径流量及输沙量变化趋势进行显著性检验,探讨了北洛河下游冲淤变化特点及其成因。结果表明:1960-2017年洛淤1~洛淤21河段累计淤积泥沙 $2.870 \times 10^8 \text{ m}^3$,期间滩面淤高、河道纵比降自1965年的1.618‰持续增大至2017年的1.941‰,三门峡水库蓄水初期及高含沙洪水是河道淤积的主要时期,其中1994年高含沙大洪水河段泥沙淤积量占累计淤积量31.3%;水沙条件及潼关高程是影响北洛河下游冲淤变化的主要原因,2000年以来,北洛河下游径流量、输沙量显著减小,2000-2010年状头站多年平均汛期输沙量比1960-2010年减少67.5%,漫滩大洪水少有发生,加之在三门峡水库原型试验按非汛期最高水位不超过318.0 m运用期间潼关高程缓慢下降,北洛河下游冲淤态势总体保持稳定。

关键词: 冲淤量; 水沙条件; 潼关高程; 北洛河下游

中图分类号:TV147

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)02-0074-07

The variation characteristics and cause of scouring and silting in the lower Beiluo River from 1960 to 2017

CAO Qixin¹, GUAN Kai¹, ZHANG Bingjie^{2,3}, BAO Suili²

(1. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center of Rivers, Xi'an 710018, China; 3. Shaanxi River Reservoir Management Bureau, Xi'an 710018, China)

Abstract: Based on the observation data of flow and sediment of Zhuangtou Station of Beiluo River in the period of 1960-2010 and test results of the cross section of sedimentation in the lower Beiluo River in the period of 1960-2017, the variation characteristics and cause of scouring and silting in the lower Beiluo River were studied. Changes of sedimentation amount, typical cross section and river bed slope were analyzed with prototype observation method. And then, the trend of runoff volume and sediment transport amount of Zhuangtou Station was tested with Mann-Kendall method. The results showed that the cumulative sedimentation amount of Luoyu 1-Luoyu 21 reach was $2.870 \times 10^8 \text{ m}^3$ in the period of 1960-2017, during which the floodplain height and river slope increased from 1.618‰ in 1965 to 1.941‰ in 2017. The initial storage period of Sanmenxia Reservoir and hyper-concentrated sand flood period were the major sedimentation periods of the river. During flood period in 1994, the sedimentation of Luoyu 1-Luoyu 21 reach accounted for 31.3% of the total cumulative sedimentation. The flow and sediment condition and Tongguan elevation are the main reasons of variation of scouring and silting in lower Beiluo River. The runoff and sediment transport amount of lower Beiluo River decreased significantly since 2000. The average sediment transport amount from 2000 to 2010 of Zhuangtou Stations decreased by 67.5%, compared with that from 1960 to 2010. And overflowing flood was a rare occurrence. With the implementation of maximum water level of 318.0 m since the prototype experiments started in Sanmenxia Reservoir, Tongguan elevation grad-

收稿日期:2019-07-04; 修回日期:2019-10-11

基金项目:2016年度陕西省科学技术研究发展计划项目(2016CG-05); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM7281)

作者简介:曹绮欣(1987-),女,广东罗定人,工程师,主要从事河流水文泥沙、防洪减灾及水沙数值模拟等河道治理与研究工作。

ually dropped, generally, the scouring and silting situation maintained stable.

Key words: scouring and silting amount; flow and sediment condition; Tongguan elevation; lower Beiluo River

1 研究背景

黄土高原水土流失严重、生态环境脆弱,是黄河流域主要的产沙区。20世纪50年代实施的水土保持治理及1999年实施的退耕还林(草)等工程措施,通过增加植被覆盖率、改善土壤层的水源涵养能力、拦蓄地表径流等,极大影响了黄土高原多沙河流的下垫面条件,改变了流域的水文循环过程及水沙情势。

北洛河作为黄河的二级支流,为典型的多泥沙冲积河流,其上游属于黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区,是流域主要的产沙区。受三门峡水库回水淤积、高含沙水流及三口汇流的影响,北洛河下游水沙运动及河床演变规律复杂,引起了诸多学者的关注和研究。齐璞等^[1]根据北洛河实测的水沙及断面测验资料,分析了北洛河的河床演变特征及冲淤特性;井涌等^[2]、莫莉等^[3]、鲁俊等^[4]、董起广等^[5]、康玲玲等^[6]和古明兴^[7]基于北洛河干流水文站实测的径流、输沙量系列,通过 Mann-Kendall、Spearman 检验等统计分析方法,揭示了流域水沙的趋势性变化,结果均表明21世纪以来北洛河径流量、输沙量均呈趋势性减少;梁国亭等^[8]和侯素珍等^[9]则通过原型观测、一维水沙数学模型及物理模型等方法,分析北洛河改道入黄的影响,探讨其可行性。

近20年以来,北洛河流域径流量及输沙量出现趋势性减少,学界利用水文分析法、水土保持分析法等,定量分析了气候变化、人类活动等因素对径流及输沙量的影响。一部分学者认为降雨等气象因素是流域减水的主要影响因素^[3,6,10],另一部分学者则认为水土保持措施等人类活动对径流的影响居于首位^[4,11-12];流域减沙的成因则较为复杂,主要与流域水土保持治理、退耕还林、气候条件、径流、国家政策等相关^[3-4,6,13-17],其中水土保持治理、退耕还林等人类活动是流域减沙的核心驱动力。另一方面2002年11月三门峡水库开始原型试验,其运行方式对潼关高程及渭河下游冲淤特性影响显著,渭河华县以下河段连年有冲有淤、总体冲刷,期间潼关高程略有降低^[18-19]。

从现有的研究成果来看,前人对北洛河的研究多集中在水沙特性与变化^[2-7]、河床形成机理分析^[1]、北洛河改道入黄^[8-9]及水土保持^[15,17,20]等方面,但系统地分析北洛河下游冲淤变化特征的研究

尚不多见。在流域水沙条件变化、三门峡水库运行调度方式改变的背景下,理清北洛河的冲淤变化特点,对统筹北洛河流域防洪减灾工作、渭河全线整治工程建设、控制与稳定潼关高程、推进高含沙洪水研究等方面有重要意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

状头水文站是北洛河下游的控制水文站,于1933年5月建站,现位于蒲城县永丰镇蔡村西禹公路洛河桥边。本次收集到状头站1960-2010年实测水沙数据,资料来源于《黄河流域水文年鉴》。

三门峡水库建库以来库区汛前及汛后均进行淤积断面测验工作,本次收集到1960-2017年北洛河汛前及汛后实测淤积断面资料,测验河段上起上蔡村(洛淤21),下至朝邑(洛淤1),断面编号为洛淤1~洛淤21,测验河段全长约100 km,基本涵盖了北洛河下游河段。北洛河流域水系图见图1。



图1 北洛河流域水系图

2.2 研究方法

本文基于北洛河实测的水沙资料系列及淤积断面资料,通过原型观测,统计分析了北洛河河道冲淤量、横断面变化、纵比降变化。采用 Mann-Kendall 趋势检验法对状头站的径流量及输沙量变化趋势进行显著性检验,探讨北洛河下游的水沙条件变化。

(1) Mann-Kendall 趋势检验。对于时间序列 x , Mann-Kendall 趋势检验的统计量为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 分别为时间序列的第 i 、第 j 个数据值; n 为数据样本的长度; S 服从正态分布, 其均值为 0。当 $n > 10$ 时, 标准的正态统计变量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\text{Var}(S)$ 为方差, 在给定的置信水平 α 上, 如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则在置信水平 α 上, 时间序列存在明显的上升或下降趋势。

(2) Mann-Kendall 突变检验。对于时间序列 x , 构造一个秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$r_i = \begin{cases} +1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (4)$$

在时间序列为随机的假设下, 统计量定义为:

$$UF_k = \frac{|s_k - E(s_k)|}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: $E(s_k)$ 和 $\text{Var}(s_k)$ 分别为 s_k 的均值和方差; UF_k 服从标准正态分布。

同理再令时间序列 x 逆序, 重复上述求解过程, 且令 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$ 。当 $UF_k > 0$ 时序列呈上升趋势, $UF_k < 0$ 时序列呈下降趋势; 若 UF_k 及 UB_k 两线出现交点, 交点对应时刻为突变开始时刻。

3 结果分析与讨论

3.1 冲淤变化特征

3.1.1 冲淤量 表 1 为 1960-2017 年三门峡水库各运行时期北洛河下游的淤积量统计成果。由表 1 可知, 1960-2017 年汛后洛淤 1~洛淤 21 河段累计淤积泥沙 $2.870 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中洛淤 1~洛淤 10 河段累计淤积泥沙 $2.103 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为北洛河下游主要的淤积河段, 洛淤 10~洛淤 21 河段累计淤积泥沙 $0.767 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 1 1960-2017 年三门峡水库各运行时期北洛河下游淤积量统计成果

三门峡水库 运行时期	时段/(年-月)	北洛河下游分段淤积量/ 10^8 m^3		
		洛淤 1~洛淤 21	洛淤 1~洛淤 10	洛淤 10~洛淤 21
枢纽改建前	1960-09-1966-05	0.528	0.450	0.079
第一期改建期	1966-05-1969-10	0.782	0.628	0.154
第二期改建期	1969-10-1973-10	-0.029	-0.048	0.019
	1973-10-1985-10	0.099	0.053	0.046
蓄清排浑运用期	1985-10-2002-10	1.623	1.219	0.404
	2002-10-2010-10	-0.091	-0.050	-0.042
	2010-10-2017-10	-0.042	-0.149	0.107
建库以来	1960-04-2017-10	2.870	2.103	0.767

北洛河下游的河床淤积主要集中在两个时期: 一是三门峡水库蓄水初期的 1960 年 9 月-1966 年 5 月, 水库处于蓄水拦沙及原规模敞泄滞洪排沙阶段, 河道泥沙淤积快速发展, 洛淤 1~洛淤 21 河段累计淤积泥沙 $0.528 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占截止 2017 年累积淤积总量的 18.4%, 其淤积重心洛淤 1~洛淤 10 河段累计淤积量达 $0.450 \times 10^8 \text{ m}^3$; 二是漫滩高含沙大洪水发生的年份, 滩面大幅度淤高, 下游河段累计淤积量出现跳跃性的增加, 其中 1966 年汛期洛淤 1~洛淤 21 河段淤积泥沙 $0.653 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1994 年汛期洛淤 1~洛淤 21 河段淤积泥沙 $0.898 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分别占截止 2017 年累计淤积量的 22.8% 及 31.3%, 主要淤积部位均集中在洛淤 1~洛淤 10 河段。

北洛河下游累计淤积量下降, 则主要出现在

1988 年汛期、2003 年汛期及 2010 年汛后至 2015 年汛前。1988 年及 2003 年汛期北洛河遭遇小流量高含沙洪水(均不漫滩), 北洛河下游汛后河槽显著展宽, 河槽普遍冲刷, 1988 年汛期、2003 年汛期洛淤 1~洛淤 21 河段累计冲刷泥沙分别为 0.184×10^8 、 $0.117 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2010 年汛后至 2015 年汛前, 洛淤 1~洛淤 10 河段累计冲刷泥沙 $0.200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 洛淤 10~洛淤 21 河段累计淤积泥沙 $0.068 \times 10^8 \text{ m}^3$, 洛淤 1~洛淤 21 河段累计冲刷泥沙 $0.132 \times 10^8 \text{ m}^3$, 表现为下冲上淤, 冲刷部位溯源发展。

3.1.2 横断面 1960-1985 年和 1985-2017 年洛淤 5#断面的横断面套绘图分别见图 2 和 3。由图 2 和 3 可知, 三门峡水库蓄水前, 洛淤 5#断面左岸滩唇高程 337.5 m, 河槽宽度 113 m, 深泓高程 330.9

m。1960年9月三门峡水库开始蓄水,在经过蓄水拦沙、滞洪拦沙两个阶段的运用方式后,1966年汛后洛淤5[#]断面左岸滩唇高程抬高至340.5 m,河槽宽度缩窄为72 m,深泓抬高至335.8 m,较蓄水前河槽宽度缩窄41 m,深泓抬高4.9 m,滩面及河槽均大幅度淤高。1973年三门峡水库进入蓄清排浑运用阶段,至1985年北洛河下游泥沙淤积得到较好的控制,洛淤5[#]断面河槽宽度比1973年展宽38 m。蓄清排浑运用期1985-2002年期间,由于20世纪90年代渭河上游来水大幅度减少,渭河下游累积性淤积^[21]进一步加剧了北洛河下游淤积的发展,洛淤5[#]断面左岸滩面平均抬升0.6 m,右岸滩面平均抬升0.9 m,深泓向左摆动22 m,河槽缩窄58 m。2002年三门峡水库原型试验以来,北洛河下游漫滩洪水出现次数显著减少,洛淤5[#]河槽逐年刷深、缩窄,至2017年汛前,左岸滩唇高程为342.55 m,较2002年汛后降低0.29 m;河槽逐渐向右移动,至2017年汛前深泓累计摆动56 m。总体而言,北洛河下游自20世纪60、70年代筑堤后,其滩面淤积抬高,逐渐发展为地上悬河,至2017年汛前洛淤5[#]断面滩面较左岸地面高约1.2 m。

3.1.3 河道纵比降 点绘洛淤1~洛淤21河段1965、2002及2017年的深泓纵断面图见图4。根据图4计算河段平均比降可知,自三门峡水库建成运行以来,北洛河下游河道平均比降逐渐增大,洛淤1~洛淤21全河段平均比降由1965年汛后的1.618‰增大至2002年汛后的1.920‰,变幅达18.6%。1965年汛后至2002年汛后,深泓点呈现两端降低、中间抬高的态势。河口段深泓降低幅度大,洛淤1~洛淤3河段深泓高程降低0.75~1.03 m;洛淤4~洛淤18河段深泓抬高0.16~2.97 m,悬河发育。2002年三门峡水库原型试验以来,北洛河下段洛淤1~洛淤12深泓点变化不大,上段洛淤13~洛淤21深泓点仍缓慢抬高,抬升高度为0.05~1.25 m。已有研究表明,北洛河淤积末端在洛淤17~洛淤18断面附近^[22],受水库锥体淤积形态的演变特点影响,淤积向上游发展,洛淤1~洛淤21平均河道比降由2002年汛后的1.920‰增大至2017年汛后的1.941‰,河道平均比降增大的趋势并未发生扭转,地上悬河进一步发育。

3.2 冲淤变化成因分析

3.2.1 水沙条件

(1)来水来沙量。受流域降雨减少及水保措施效果逐步显现的影响,近年来北洛河下游减水减沙

显著^[3-4]。本文整理了北洛河状头站1960-2010年径流量及输沙量资料序列,见图5;采用Mann-Kendall趋势检验法对状头站的径流量及输沙量变化趋势进行显著性检验,结果见图6和7;状头站1960-2010不同年代汛期输沙量见图8;状头站汛期输沙量与北洛河下游河道冲淤量关系见图9。

图5~8表明,北洛河状头站年径流量与输沙量分别从1995年及1980年开始出现趋势性的减少。其中输沙量在2000年后大幅减小,减沙主要集中在汛期(图8),2000-2010年汛期年平均输沙量为 0.216×10^8 t,比1960-2010年汛期多年平均输沙量 0.655×10^8 t减少67.5%。

由图9可知,汛期输沙量与下游河道泥沙冲淤量存在正相关关系,随着汛期输沙量减小,北洛河下游淤积量亦相应减少,在适当的水沙搭配下河槽将发生冲刷。已有成果指出枯水期冲刷及汛期淤积是北洛河特有的演变特性^[1],2002年以来洛淤5[#]断面趋于窄深发展,河槽宽深比减小。在当前枯水枯沙的条件下,汛期输沙量、河槽宽深比减小,均有利于北洛河下游河道减淤,近期洛淤1~洛淤21河段的冲淤变化总体保持稳定。

(2)高含沙洪水。1966年7月27日4:30,状头站洪峰流量 $3\ 360\text{ m}^3/\text{s}$,最大含沙量 $977\text{ kg}/\text{m}^3$,该次洪水前后洛淤5[#]横断面套绘图见图10。分析图10可知,高含沙洪水河槽贴边淤积,洛淤5[#]横断面河槽平均缩窄26 m,左岸滩地平均淤高1.1 m,河槽刷深0.1 m。1994年9月1日8:30,状头站洪峰流量 $6\ 280\text{ m}^3/\text{s}$,最大含沙量 $805\text{ kg}/\text{m}^3$,高含沙洪水淤滩刷槽,洛淤5[#]横断面河槽刷深0.7 m,滩地平均淤高0.84 m,深泓向左摆动21 m。这两年汛期是北洛河下游河床淤积量大幅增加的年份,1966及1994年汛期洛淤1~洛淤21河段泥沙淤积分别占截止2017年累计淤积量的22.8%及31.3%。

1988年8月14日6:24状头站洪峰流量 $1\ 590\text{ m}^3/\text{s}$,最大含沙量 $400\text{ kg}/\text{m}^3$,洪水不漫滩,分析图11可知,高含沙洪水冲刷河槽,汛后河槽过水面积比汛前增大 225.6 m^2 ,最深点刷深0.4 m。2003年8月27日10:00状头站洪峰流量 $537\text{ m}^3/\text{s}$,最大含沙量 $261\text{ kg}/\text{m}^3$,洪水不漫滩,高含沙洪水冲刷河槽,汛后河槽过水面积比汛前增大 103.4 m^2 ,最深点抬高0.2 m。这两年汛期是北洛河下游河床大幅冲刷的年份,1988及2003年汛期洛淤1~洛淤21河段分别冲刷泥沙 $0.184 \times 10^8\text{ m}^3$ 及 $0.117 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

从上述分析可知,高含沙洪水对北洛河河床的

塑造具有大冲大淤的特点,主要表现为高含沙大洪水 水滩面淤积、高含沙中小洪水河槽冲刷。

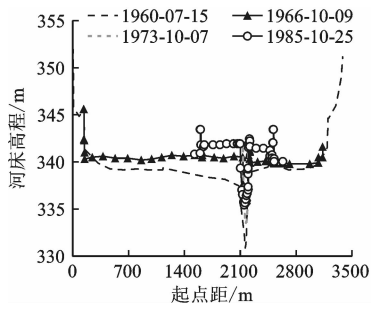


图2 1960-1985年洛淤5#横断面套绘图

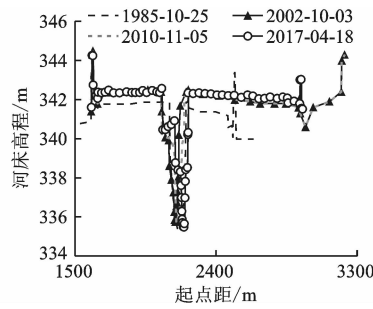


图3 1985-2017年洛淤5#横断面套绘图

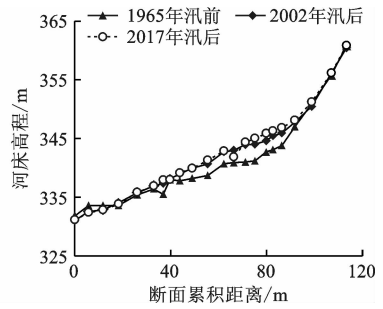


图4 北洛河下游河道深泓纵断面图

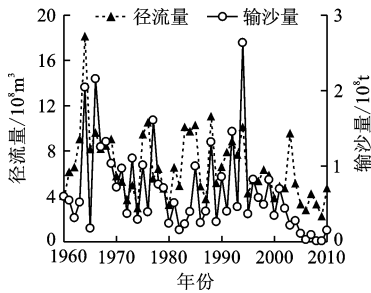


图5 1960-2010年状头站径流量、输沙量变化图

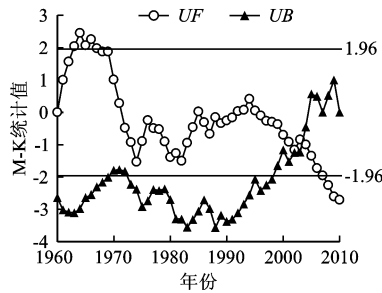


图6 1960-2010年状头站径流量系列Mann Kendall 检验

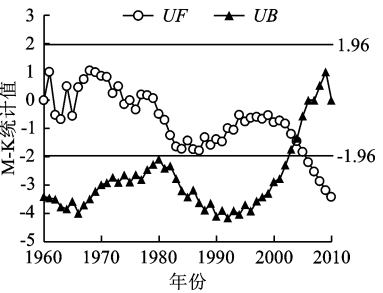


图7 1960-2010年状头站输沙量系列Mann Kendall 检验

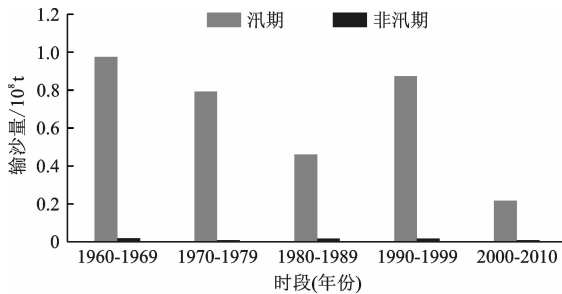


图8 1960-2010年状头站不同年代汛期输沙量

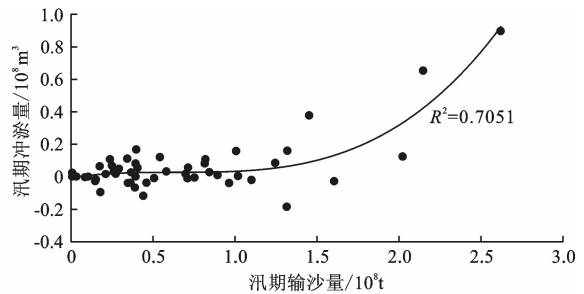


图9 状头站汛期输沙量与下游河道冲淤量关系

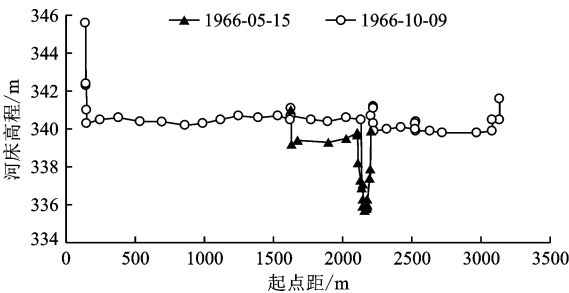


图10 1966年7月27日洪水前后洛淤5#横断面套绘图

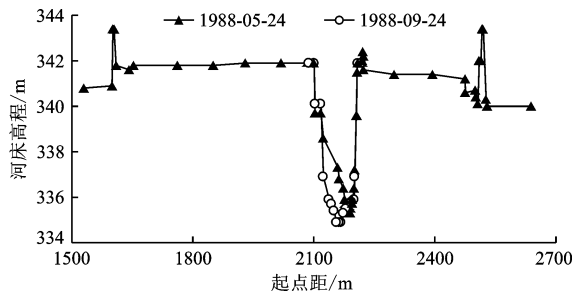


图11 1988年8月14日洪水前后洛淤5#横断面套绘图

(3)洪水场次与量级。统计的1965-2017年不同时段北洛河状头站500~1000、1000~2000、2000~3000及3000 m³/s以上的洪水场次见表2。表2数据表明,北洛河下游洪水以中小洪水居多,20世纪70年代和90年代洪水场次多、量级大,70年代、90年代分别发生17场、15场洪水,2000 m³/s以上的洪水分别出现2次、3次;2000年以来,北洛

河下游洪水场次与量级均显著减小,2001-2017年洪峰流量大于500 m³/s的洪水仅出现过4次,期间最大洪水发生于2001年8月19日,状头站洪峰流量1350 m³/s,其余年份均未出现超1000 m³/s的洪水。近20年来,北洛河下游漫滩大洪水发生次数大幅减少,高含沙大洪水造成滩面淤高的现象少有出现,同时期河道的泥沙淤积量除受局部侵蚀基准

面升降影响外基本维持稳定的态势。

表 2 1965-2017 年不同时段北洛河状头站
不同量级洪水场次统计

时段 (年份)	洪水流量量级/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)				合计
	500 ~ 1000	1000 ~ 2000	2000 ~ 3000	3000 以上	
1965-1970	3	2	0	1	6
1971-1980	12	3	1	1	17
1981-1990	4	1	0	0	5
1991-2000	10	2	2	1	15
2001-2010	2	1	0	0	3
2011-2017	1	0	0	0	1
合计	32	9	3	3	47

3.2.2 潼关高程 根据河床演变的基本理论,局部侵蚀基准面对河道的纵剖面起控制作用。黄河潼关河床狭窄,卡口形态显著,是黄洛渭的局部侵蚀基准面。潼关高程与三门峡水库的运行方式密切相关,根据黄河泥沙公报及已有相关研究成果,点绘的 1960-2017 年潼关高程与北洛河下游河道淤积体累计淤积量过程线见图 12。

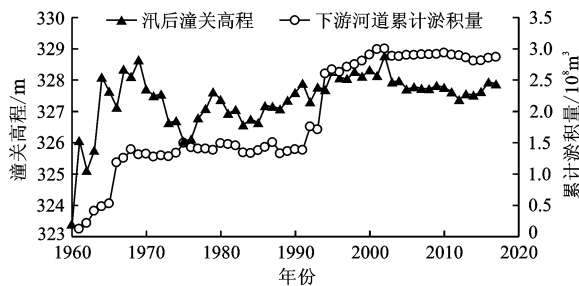


图 12 1960-2017 年潼关高程与北洛河下游河道
淤积体累计淤积量过程线

由图 12 可知,潼关高程主要经历了如下过程:1960-1969 年潼关高程为快速上升阶段,从 1960 年汛后 323.40 m 抬升至 1969 年汛后 328.65 m;1970-1975 年为冲刷阶段,1975 年汛后下降至 326.04 m;1976-1986 年呈波动变化,总体保持稳定;1986-2002 年又逐渐升高,2002 年汛后抬升至 328.78 m;2003-2012 年出现缓慢下降,2012 年汛后降至 327.38 m;2013 年以来再次进入缓慢抬升阶段,2017 年汛后为 327.88 m。北洛河下游的淤积发展,与潼关高程的变化历程有较好的同步关系,但时间响应上存在一定的滞后:1960-1968 年北洛河下游河床快速淤积,1969-1991 年淤积量总体稳定,1992-2002 年淤积量增加,2003-2010 年基本稳

定,2011-2015 年淤积量缓慢减少,2015 年后淤积量又小幅增加。

对近期三门峡水库运用控制方式分析可知,水库原型试验后库区减淤态势良好^[19]。2010 年以来三门峡水库汛期、非汛期运用水位均突破原型试验指标与“潼关高程控制与三门峡水库运用方式研究”确定的非汛期最高运用水位不超过 318.0 m 的指标,潼关高程自 2012 年汛后开始抬升,北洛河下游淤积量也相应出现增加。

4 结 论

(1)1960-2017 年汛后,北洛河下游洛淤 1~洛淤 21 河段累计淤积泥沙 $2.870 \times 10^8 \text{ m}^3$,三门峡水库蓄水初期及高含沙大洪水是河段淤积的主要时期,其中 1960 年汛前-1966 年汛前、1966 年高含沙大洪水、1994 年高含沙大洪水洛淤 1~洛淤 21 河段淤积量分别占截止 2017 年汛后累计淤积量的 18.4%、22.8% 及 31.3%。北洛河下游横断面变化表现为河滩不断抬升,河槽向窄深方向发展,而纵向变化则表现为河道平均比降持续增大,河道纵比降自 1965 年的 1.618‰ 持续增大至 2017 年的 1.941‰。

(2)水沙条件及潼关高程变化是北洛河下游冲淤变化的主要原因。高含沙大洪水对北洛河下游河床的塑造具有突变性,“94·8”高含水洪水淤滩刷槽,洛淤 5#横断面汛期河槽刷深 0.70 m,滩地平均淤高 0.84 m,深泓向左摆动 21 m。2000 年以来,北洛河下游径流量、输沙量呈显著的下降趋势,洪水场次与量级亦显著减小,在当前枯水枯沙的条件下,北洛河下游河道淤积态势总体保持稳定。潼关高程作为黄洛渭的局部侵蚀基准面,对北洛河下游的淤积发展起控制作用,两者的变化历程有较好的同步关系,但在时间响应上北洛河的淤积变化略滞后于潼关高程的变化。

(3)三门峡水库原型试验以来,北洛河减淤态势良好,建议维持水库原型试验非汛期库水位不超过 318 m 运行的原则,降低北洛河局部侵蚀基准面,减少北洛河下游河道泥沙淤积,改善河道行洪能力,恢复河道生态环境。

参考文献:

- [1] 齐璞,孙赞盈. 北洛河下游河槽形成与输沙特性[J]. 地理学报,1995,62(2):168-177.
- [2] 井涌,陈芳莉,葛芬莉,等. 北洛河源头区水沙特性变化

- 分析[J]. 水文, 2010, 30(4): 92-96.
- [3] 莫莉, 穆兴民, 王勇, 等. 近50多年来北洛河水沙变化特征及原因分析[J]. 泥沙研究, 2009(6): 30-36.
- [4] 鲁俊, 朱信华, 崔振华, 等. 北洛河流域水沙特性与变化原因[J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 20-24.
- [5] 董起广, 周维博, 刘雷, 等. 北洛河径流量变化特征分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(2): 20-22+29.
- [6] 康玲玲, 魏义长, 张胜利, 等. 北洛河流域近期水沙变化原因水文分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 41-43+48.
- [7] 古明兴. 北洛河流域水沙演变情势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 120-122.
- [8] 梁国亭, 姜乃迁, 丁宏生, 等. 北洛河改道入黄对渭河及潼关高程的影响分析[J]. 人民黄河, 2008(2): 23-25+79-80.
- [9] 侯素珍, 王平, 侯志军, 等. 北洛河下游改道后新河道稳定性及影响分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(9): 28-29+31.
- [10] 陈抒晨, 赵安周, 朱秀芳, 等. 径流对气候变化和人类活动的响应——以渭河流域为例[J]. 北京示范大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 472-478.
- [11] 赫晓慧, 郑紫瑞, 高亚军. 降水和人类活动对北洛河径流变化的量化研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 125-129.
- [12] 张连鹏, 刘登峰, 张鸿雪, 等. 气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 55-66.
- [13] 谢敏, 张晓明, 赵阳, 等. 北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 39-44.
- [14] 陈玫君, 穆兴民, 高鹏, 等. 北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 1-8.
- [15] 秦伟, 朱清科, 刘广全. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1325-1332.
- [16] 刘晓燕, 高云飞, 王略. 黄河主要产沙区近百年产沙环境变化[J]. 人民黄河, 2016, 38(5): 1-5+9.
- [17] 刘二佳, 张晓萍, 谢名礼, 等. 生态恢复对流域水沙演变趋势的影响——以北洛河上游为例[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 622-629.
- [18] 石长伟, 张英, 梁林江, 等. 渭河下游近期冲淤变化及其原因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 134-137+143.
- [19] 林秀芝, 董晨燕, 李丹丹. 三门峡水库淤积分析和运用方式研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 18-22.
- [20] 陈妮, 李谭宝, 张晓萍, 等. 北洛河流域植被覆盖度时空变化的遥感动态分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 206-210+327.
- [21] 屠新武, 蔡石林, 刘社强. 渭河下游水沙变化分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(12): 23-24.
- [22] 陆中臣. 三门峡水库淤积末端位置确定和预估的地貌学方法[J]. 地理研究, 1982, 1(3): 43-54.

(上接第73页)

- [21] 章茹, 孔萍, 蒋元勇, 等. 近50年鄱阳湖流域降水时空特征及其对水文过程的驱动[J]. 南昌大学学报(理科版), 2014, 38(3): 268-272.
- [22] 程诗悦, 秦伟, 郭乾坤, 等. 近50年我国极端降水时空变化特征综述[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 155-161.
- [23] 江西省水利厅. 江西河湖大典[M]. 武汉: 长江出版社, 2010.
- [24] 刘惠英, 白桦. 赣江上游章水流域水沙变化的驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 615-623.
- [25] 江西省水利厅. 江西水旱灾害[M]. 江西省水利厅, 1995.
- [26] 刘铮瑶, 董治宝, 殷淑燕, 等. 济南市极端降水变化特征及趋势分析[J]. 地球环境学报, 2013, 4(6): 1506-1512.
- [27] POWELL E J, KEIM B D. Trends in daily temperature and precipitation extremes for the Southeastern United States: 1948-2012[J]. Journal of Climate, 2015, 28(4): 1592-1612.
- [28] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术: 第2版[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [29] TABARI H, TALAEI P H. Temporal variability of precipitation over Iran: 1966-2005[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3-4): 313-320.
- [30] 蔡霞, 蔡琳, 李春华, 等. 晋北地区降水量时空变化及突变分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 247-254.
- [31] 孙周亮, 刘冀, 谈新, 等. 近50a 渭河上游汛期降雨径流多尺度时空演变[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1324-1332.
- [32] 王文圣, 丁晶, 衡彤, 等. 水文序列周期成分和突变特征识别的小波分析法[J]. 工程勘察, 2003(1): 32-35.
- [33] 冯新灵, 罗隆诚, 冯自立, 等. 中国雨日变化趋势的分形研究[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 112-117.
- [34] 朱芮芮, 李兰, 王浩, 等. 降水量的空间变异性和空间插值方法的比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(7): 25-28.