

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022151

张琳琳, 娄书建, 白少智, 等. 三门峡水库渭河下游库区近期水沙及河道冲淤分析[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(12): 62-67. ZHANG Linlin, LOU Shujian, BAI Shaozhi, et al. Analysis of recent water and sediment and river erosion and silting in the lower Weihe River of Sanmenxia Reservoir[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(12): 62-67. (in Chinese)

三门峡水库渭河下游库区近期水沙及河道冲淤分析

张琳琳¹ 娄书建² 白少智¹ 冯普林¹

(1. 陕西省河流工程技术研究中心, 西安 710018; 2. 三门峡黄河明珠(集团)有限公司, 三门峡 472000)

摘要:为反映渭河防洪安全状况, 依据2002—2020年实测水水泥沙、河道断面等资料, 通过资料分析、数值计算等方法, 分析了三门峡水库原型试验运用以来渭河下游的水沙系列特点和河道冲淤特征。研究得出: 三门峡水库原型试验运用以来, 渭河临潼站1 000 m³/s以上洪峰的洪水量级和场次均呈减少趋势, 咸阳、华县站水沙特点为平水枯沙系列; 渭河下游累积冲刷泥沙2.663亿m³, 累积淤积量由原型试验运用以前的逐步增大变为逐步减小; 临潼站水沙条件是渭淤13—26断面间河段冲淤的重要影响因素, 渭淤13断面以下河段历年累积淤积体变化与汛后潼关高程升降是正向关系, 相关系数为0.82。提出了加强河道整治规划建设和现有工程管护防守、进一步降低潼关高程、加强现有水库综合效益发挥和水资源综合利用等建议。

关键词:水沙; 河道冲淤; 潼关高程; 渭河下游; 三门峡水库

中图法分类号: TV87

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2022)12-62-06

0 引言

2002年汛后三门峡水库原型试验运用以来, 渭河下游来水来沙条件及河道冲淤特性发生了很大变化。渭河下游累积淤积量在1960—2002年不断增加^[1-2], 在2002年达到最大, 为13.21亿m³; 2002年以后累积淤积量呈减少趋势^[3], 到2020年汛后渭河下游累积淤积体降低至10.56亿m³。为反映渭河下游防洪安全状况, 依据2002—2020年实测水水泥沙、河道断面等资料, 对三门峡水库原型试验以来渭河下游水沙系列特点和河道冲淤特征进行分析。

1 渭河下游近期水沙系列特点

1.1 洪水水沙

原型试验以来2003—2020年临潼站洪峰流量 $Q \geq 1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上洪水场次40次, $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上洪水场次

3次, 大洪水场次总数和年均数都在减少; $Q \geq 1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的洪水2003—2009年频次为2.3次, 2010—2020年减少为2.2次; $Q \geq 3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的洪水2003—2009年频次为0.6次, 2010—2020年减少为0.5次; $Q < 1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的年份有2008年、2015年、2016年。2018年以来大洪水发生的频次有所增加。临潼站2003—2020年不同时期各级洪水场次统计见表1。

表1 临潼站2003—2020年不同时期各级洪水场次统计表

时期	项目	洪峰量级/(m ³ ·s ⁻¹)				
		$\geq 1\ 000$	$\geq 2\ 000$	$\geq 3\ 000$	$\geq 4\ 000$	$\geq 5\ 000$
2003—2009年	总数	16	7	4	3	2
	年均场次	2.3	1.0	0.6	0.4	0.3
2010—2020年	总数	24	11	5	2	1
	年均场次	2.2	1.0	0.5	0.2	0.1
2003—2020年合计	总数	40	18	9	5	3
	年均场次	2.2	1.0	0.5	0.3	0.2

2003—2020年临潼站 $Q \geq 1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上洪水场次年平均洪量、输沙量与含沙量分别为14.24亿m³、0.47亿t、32.9 kg/m³; 2003—2005年 $Q \geq 1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上洪水场次年平

收稿日期: 2022-04-25

第一作者信息: 张琳琳, 女, 高级工程师, E-mail: 515938489@qq.com。

通信作者信息: 冯普林, 男, 正高级工程师, E-mail: fplsgj@163.com。

基金项目: 渭河中下游河床演变及规划应用研究(SHY18-15); 三门峡水库(渭河下游)库区原型试验研究(SHY20-10)。

均洪量、输沙量与含沙量分别为 30.52 亿 m³、1.41 亿 t、46.3 kg/m³，与多年均值相比属丰洪丰沙时期，洪水过程含沙量高于多年均值；2009—2014 年 Q≥1 000 m³/s 以上洪水场次年平均洪量、输沙量与含沙量分别为 13.47 亿 m³、0.42 亿 t、31.5 kg/m³，与多年均值相比属平洪平沙时期，洪水过程含沙量小于多年均值；2017—2020 年 Q≥1 000 m³/s 以上洪水场次年平均洪量、输沙量与含沙量分别为 19.41 亿 m³、0.33 亿 t、17.0 kg/m³，与多年均值相比属丰洪枯沙时期，洪水过程含沙量低于多年均值。临潼站原型试验以来 Q≥1 000 m³/s 各场次洪量与输沙量统计见表 2。

表 2 临潼站原型试验以来洪峰流量 Q≥1 000 m³/s 各场次洪量与输沙量统计表

时期	洪水过程洪量/亿 m ³		洪水过程输沙量/亿 t		洪水过程平均含沙量/(kg·m ⁻³)
	总量	年均	总量	年均	
2003—2007 年	97.9	19.58	4.56	0.91	46.6
2009—2014 年	80.8	13.47	2.55	0.42	31.5
2017—2020 年	77.6	19.41	1.32	0.33	17.0
2003—2005 年	91.6	30.52	4.24	1.41	46.3
2003—2020 年	256.3	14.24	8.43	0.47	32.9

原型试验以来临潼站 Q≥1 000 m³/s 以上洪水过程洪水沙量变化有较大差异：①2003—2020 年年均洪量总体呈减小趋势，近年来略有增加，洪水输沙量年均持续减小规律更为明显；②2003—2007 年水沙相对更不协调，含沙量 46.6 kg/m³，占多年均值的 195.0%；③2017—2020 年洪量较 2003—2020 年有所增加，沙量进一步减少，洪水含沙量为原型试验以来最小时期，有利于洪水冲刷。

1.2 年水沙系列

泾渭河下游各站不同时段径流量统计见表 3。由表可

表 3 泾渭河下游各站不同时段径流量统计表

年份	咸阳			张家山			华县		
	总数/亿 m ³	年平均/亿 m ³	占 1960 年以来比例(%)	总数/亿 m ³	年平均/亿 m ³	占 1960 年以来比例(%)	总数/亿 m ³	年平均/亿 m ³	占 1960 年以来比例(%)
2003—2010 年	228.06	28.51	76.80	56.82	7.10	59.61	421.95	52.74	82.77
2011—2015 年	161.24	32.25	86.88	35.06	7.01	58.86	290.14	58.03	91.07
2016—2020 年	176.40	35.28	95.04	19.42	6.47	54.32	300.52	60.10	94.32
2003—2020 年	565.70	31.43	84.67	111.31	6.96	58.44	1 012.61	56.26	88.29
1960—2020 年	2 264.18	37.12	100.00	702.94	11.91	100.00	3 887.01	63.72	100.00

表 4 泾渭河下游各站不同时段输沙量统计表

年份	咸阳			张家山			华县		
	总数/亿 m ³	年平均/亿 m ³	占 1960 年以来比例(%)	总数/亿 m ³	年平均/亿 m ³	占 1960 年以来比例(%)	总数/亿 m ³	年平均/亿 m ³	占 1960 年以来比例(%)
2003—2010 年	2.34	0.29	34.52	8.16	1.02	54.84	10.09	1.26	48.65
2011—2015 年	0.85	0.17	20.23	2.47	0.49	26.34	2.76	0.55	21.24
2016—2020 年	0.82	0.16	19.05	1.84	0.61	32.80	3.00	0.60	23.17
2003—2020 年	4.01	0.22	26.19	12.47	0.78	41.94	15.84	0.88	33.98
1960—2020 年	51.19	0.84	100.00	109.68	1.86	100.00	158.27	2.59	100.00

知，咸阳站 2003—2020 年平均径流量占 1960—2020 年系列均值的 84.67%，属平偏枯水；其中，2003—2010 年水量均值为 28.51 亿 m³，占多年均值的 76.80%，2011—2015 年水量均值为 32.25 亿 m³，占多年均值的 86.88%，2016—2020 年水量均值为 35.28 亿 m³，占多年均值的 95.04%。张家山站 2003—2020 年平均径流量占 1960—2020 年系列均值的 58.44%，属枯水系列；其中，2003—2010 年水量均值为 7.10 亿 m³，占多年均值的 59.61%，2011—2015 年水量均值为 7.01 亿 m³，占多年均值的 58.86%，2016—2020 年水量均值为 6.47 亿 m³，占多年均值的 54.32%。华县站 2003—2020 年平均径流量占 1960—2020 年系列均值的 88.29%，属平水系列；其中，2003—2010 年水量均值为 52.74 亿 m³，占多年均值的 82.77%，2011—2015 年水量均值为 58.03 亿 m³，占多年均值的 91.07%，2016—2020 年水量均值为 60.10 亿 m³，占多年均值的 94.32%。

渭河下游咸阳、华县站和泾河张家山站 2003—2020 年不同时段输沙量统计见表 4，由表可知，咸阳站 2003—2020 年平均输沙量占 1960—2020 年系列均值的 26.19%，属特枯沙期；张家山站占 41.94%，属特枯沙期；华县站占 33.98%，属特枯沙期。

泾渭河下游各站 2003—2020 年不同时期平均含沙量及来沙系数变化情况见表 5，由表可知，咸阳站 2003—2020 年平均含沙量 6.29 kg/m³，来沙系数 0.21 (kg·s)/m⁶；张家山站平均含沙量 123 kg/m³，来沙系数 26.45 (kg·s)/m⁶；华县站平均含沙量 15.6 kg/m³，来沙系数 0.31 (kg·s)/m⁶。

表5 泾渭河下游各站不同时期含沙量和来沙系数统计表

年份	咸阳站年平均值		张家山站年平均值		华县站年平均值	
	含沙量/(kg·m ⁻³)	来沙系数/(kg·s·m ⁻⁶)	含沙量/(kg·m ⁻³)	来沙系数/(kg·s·m ⁻⁶)	含沙量/(kg·m ⁻³)	来沙系数/(kg·s·m ⁻⁶)
2003—2010年	8.90	0.32	156.40	30.69	22.71	0.46
2011—2015年	4.46	0.12	66.52	10.29	9.17	0.16
2016—2020年	3.94	0.11	129.47	42.11	10.67	0.23
2003—2020年	6.29	0.21	123.27	26.45	15.60	0.31

2 渭河下游河道冲淤变化情况

2.1 原型试验前河道冲淤概况

从建库初期到2002年9月,渭河下游累计淤积泥沙13.22亿m³。其中,1960年4月至1973年10月,渭河下游累计淤积泥沙10.0746亿m³;1973年10月至1991年9月,渭河下游淤积泥沙0.3645亿m³;1991年10月至2002年9月,渭河下游淤积泥沙2.7791亿m³。渭河下游各断面间建库初至2002年9月不同时期单位河长淤积量分布见图1。由图1可以看出,渭河下游泥沙淤积的重

心在临潼(渭淤26断面)以下河段,其中渭淤1—10断面间累积淤积8.5811亿m³,占渭河下游累积淤积量的64.92%;渭淤10—26断面间累积淤积3.7654亿m³,占累积淤积量的28.49%;渭淤26断面以上累积淤积0.2714亿m³,占累积淤积量的2.05%。1973年10月至2002年9月,渭河下游淤积泥沙3.1436亿m³,其中渭淤1—10断面间淤积1.9504亿m³,占渭河下游同期淤积量的62.04%;渭淤10—26断面间淤积0.6969亿m³,占同期淤积量的22.17%;渭淤26断面以上淤积0.2923亿m³,占同期淤积量9.3%,呈“全河段淤积”状态。

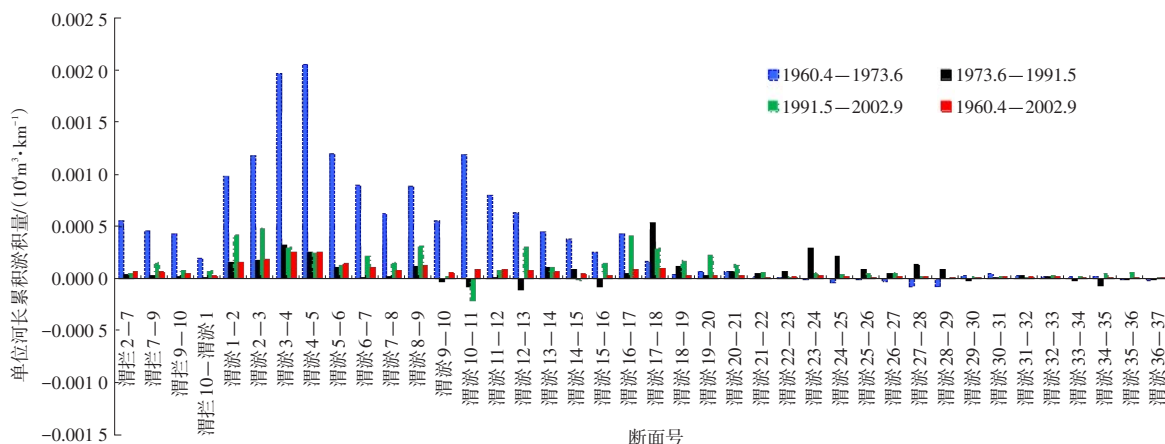


图1 渭河下游各断面间建库初至2002年不同时期单位河长淤积量分布图

2.2 原型试验以来河道冲淤变化

2.2.1 不同量级洪水的冲淤特性

渭河下游的冲淤主要取决于汛期洪水的量级及其含沙量,各型洪水都具有涨冲落淤的特性。一般情况较大洪水时冲槽淤滩,如2003年洪水;接近平槽的中型洪水往往使主槽冲刷,增大主槽过洪能力;高含沙小洪水常造成主槽贴边淤积,减小主槽行洪断面,如2006年、2008年、2016年多次高含沙小洪水,致使渭河下游2006年汛期淤积泥沙0.2803亿m³,2008年汛期淤积泥沙0.2393亿m³,2016年汛期淤积泥沙0.2916亿m³,且大都淤积在主槽内,如渭淤9断面2011—2013年主槽过水面积减小了58.1%。

2003年8—10月洪水,渭淤4、10断面汛前、汛后主槽宽和主槽面积变化见表6。由表6可知,主槽普遍展宽刷深,主槽面积增大,渭淤4、10断面河槽宽分别增加237 m、48 m,是汛前的3.42倍、1.25倍;河槽面积分别增大1 030 m²、1 005 m²,是汛前的3.93倍、2.95倍;河底最深点分别降低3.7 m、0.3 m。

表6 2003年8—10月洪水前后典型断面主槽特性变化

时间	渭淤4		渭淤10	
	主槽宽/m	主槽面积/m ²	主槽宽/m	主槽面积/m ²
汛前	98	351	191	515
汛后	335	1 381	239	1 520
差值	237	1 030	48	1 005

2.2.2 不同来源洪水的冲淤特性

分析2003年以来典型致灾洪水来源资料,可以看出,渭河下游洪水主要来源于渭河咸阳以上,泾、洛河中上游和泾、渭河共同来水。以渭河咸阳以上来水为主时,一般情况下洪水平稳,含沙量小,对河道冲淤影响较小,洪水过程的冲淤量不大,如“2003.8”主峰洪水、“2011.9”“2005.10”洪水;泾河来水为主时,含沙量大,对渭河河道冲淤影响大,洪水过程冲淤量较大,如“2003.8”首场洪水;泾渭河共同来水、且洪峰流量大于1500 m³/s时,渭河下游常以冲刷主槽为主,其冲刷深度一般为0.1~0.5 m,如“2018.7”洪水。说明不同来源洪水冲刷能力不同。

2.2.3 分河段淤积体变化

渭河下游各断面间不同时期单位河长累积淤积量分布见图2。由图2可见,渭河下游2002年9月至2020年10月累计冲刷泥沙2.663亿m³,其中渭拦4—渭淤1断面间冲刷0.0822亿m³,渭淤1—10断面间冲刷0.5143亿m³,渭淤10—26断面间冲刷0.6359亿m³,渭淤26断面以上河段冲刷1.4306亿m³。渭河下游上段冲刷幅度大,下段淤积严重。

三门峡水库建库初至2020年10月渭河下游累积淤积泥沙10.56亿m³,其中建库初期至2002年9月累积淤积泥沙占125.19%,2002年9月至2020年10月累计冲刷泥沙占25.22%。可以看出,2002年以前渭河下游累积淤积量呈增长趋势,2002年以后累积淤积量逐步减少。

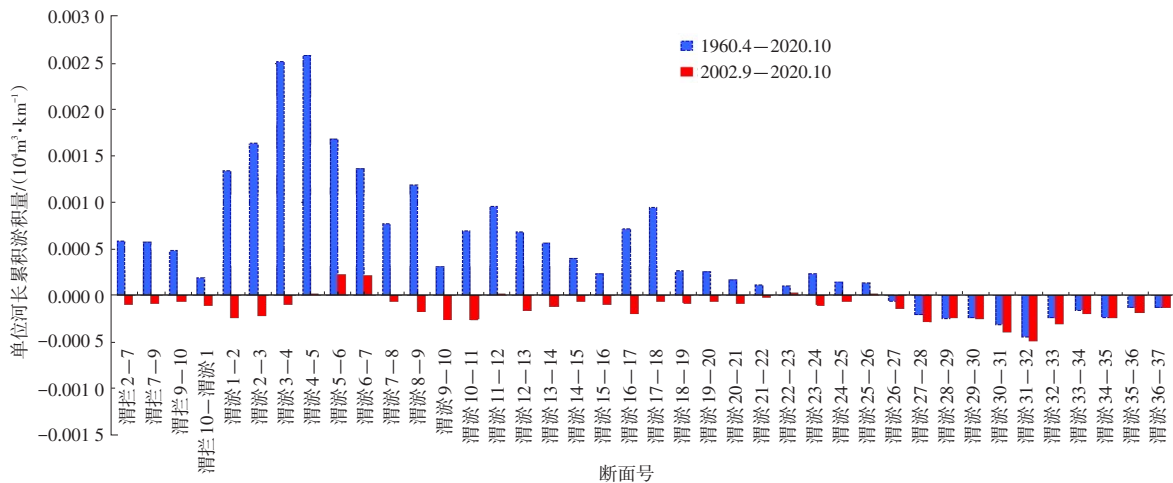


图2 渭河下游各断面间不同时期单位河长累积淤积量分布图

2.3 河槽过洪能力变化

综合水文站与典型断面河槽过洪能力分析成果,结合河段内查勘河道情况,确定渭河下游近期(2012—2020年)河槽过洪能力见表7。由表7可见,渭淤33断面2020年过洪能力较2012—2019年增大了250~1150 m³/s;临潼站2020年过洪能力较2012年、2013年、2017年、2018年增大了40~500 m³/s,较其他年份减小了100~400 m³/s;渭淤17断面2020年过洪能力较2012—2019年增大了0~1330 m³/s;华县站2020年过洪能力较2012年、2013年增大了100 m³/s,较其他年份减小了100~220 m³/s;渭淤4断面2020年过洪能力较2014年、2015年减小了60~150 m³/s,较其他年份增大了40~300 m³/s。

2020年渭河下游各河段河槽过洪能力为:西安、咸阳河段4750 m³/s左右,高陵、临潼河段3700 m³/s左右,渭南

城区河段4230 m³/s左右,华县、大荔堤防河段2900 m³/s左右,华阴、大荔围堤河段3100 m³/s左右。渭河下游河槽过洪能力总体较2012年有所提升,其中渭河下游上段过洪能力增大明显,下段增幅很小。

表7 渭河下游近期(2012—2020年)河槽过洪能力统计

年份	m ³ /s				
	渭淤33	临潼站	渭淤17	华县站	渭淤4
2012年	3800	3200	2900	2800	3000
2013年	3600	3200	2900	2800	3000
2014年	4000	3900	3500	3100	3250
2015年	4200	4100	3600	3100	3160
2016年	4400	3800	3800	3100	3000
2017年	4500	3600	3800	3000	3000
2018年	4500	3660	4230	3120	3060
2019年	4500	3900	3800	3000	2800
2020年汛后	4750	3700	4230	2900	3100

3 河道冲淤变化因素分析

3.1 典型断面河槽形态与水沙关系

N年末华县站平槽过洪能力取决于前N年的年平均流量、含沙量和汛前潼关高程指标的几何均值。据对华县站1974—2020年平槽流量与水沙及潼关高程关系的分析,发现N=4时,华县站平槽过洪能力与水沙及潼关高程关系的相关性最好,见图3,其拟合关系式为:

$$Q_{\text{华县}} = 717.45Q_{\text{几何均值}}^{0.79008} S_{\text{几何均值}}^{-0.1030} (Z - 324.0)_{\text{几何均值}}^{-1.6792} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{华县}}$ 为华县站平槽过洪能力, m^3/s ; S_N 为第N年华县站年均含沙量, kg/m^3 ; Z_N 为第N年汛前潼关高程, m 。

相关系数 $R=0.84$, 反映出华县站平槽过洪能力与年均流量的几何均值成正比, 与含沙量及汛前潼关高程成反比, 这一关系式包含了决定河槽过洪能力变化的几个主要影响因素。

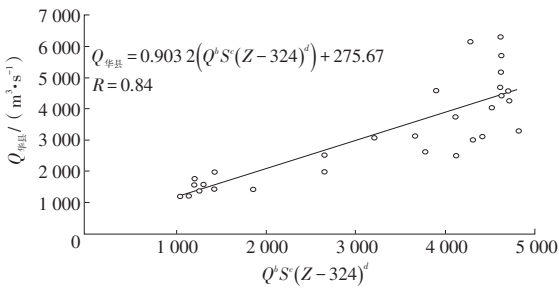


图3 华县站过洪能力与水沙条件及潼关高程关系

3.2 分河段年度淤积量与水沙关系

点绘渭河下游(渭淤13—26)河段2003年以来年度淤积量与临潼站水沙条件关系(图4)。可以看出,关系点据比较散乱,但仍有明显趋势,说明临潼站水沙条件是渭河下游(渭淤13—26)河段冲淤的重要影响因素。

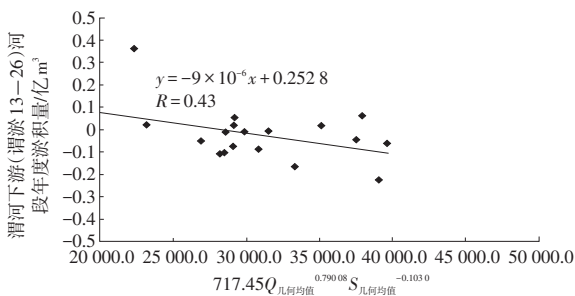


图4 渭河下游(渭淤13—26)河段2003年以来年度淤积量与临潼站水沙关系

点绘渭河下游(渭淤13以下)河段2003年以来年度淤积量与华县站水沙的关系(图5)。可以看出,关系点据散

乱,说明华县站水沙条件不是渭河下游(渭淤13以下)河段冲淤的主导性因素。

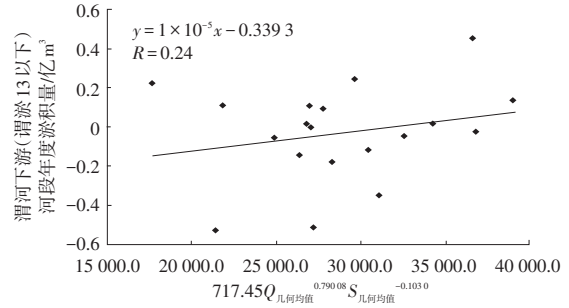


图5 渭河下游(渭淤13以下)河段2003年以来年度淤积量与华县站水沙关系

3.3 潼关高程对河道冲淤的影响

点绘渭河下游渭淤13断面以下河段1973年以来累积淤积体与汛后潼关高程变化过程(图6)。可以看出,渭河下游渭淤13断面以下河段累积淤积体与汛后潼关高程变化趋势相似,其变化滞后于汛后潼关高程变化。



图6 渭淤13断面以下河段1973年以来年度累积淤积体与汛后潼关高程变化

点绘渭淤13断面以下河段1973年以来累积淤积体与汛后潼关高程关系(图7)。可以看出,渭河下游渭淤13断面以下河段累积淤积体与汛后潼关高程具有较好的相关性,其相关系数为0.82,说明渭河下游渭淤13断面以下河段累积淤积体变化与汛后潼关高程升降关系密切。

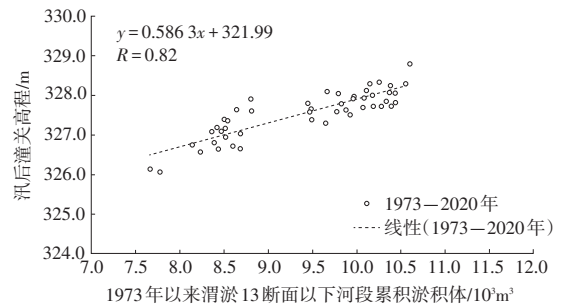


图7 渭淤13断面以下河段1973年以来累积淤积体与汛后潼关高程关系

4 结论与建议

(1)原型试验以来2003—2020年临潼站洪峰1 000 m³/s以上洪水场次40次,5 000 m³/s以上洪水场次3次。洪水过程年均洪量14.24亿m³,年均沙量0.47亿t,洪水过程平均含沙量32.9 kg/m³。渭河临潼站1 000 m³/s以上洪峰的洪水量级和场次均呈减少趋势。

(2)三门峡水库原型试验以来,渭河咸阳站2003—2020年平均径流量、输沙量占该站1960—2020年多年均值的84.67%、26.19%,属平水枯沙系列;泾河张家山站2003—2020年平均径流量、输沙量占该站1960—2020年多年均值的58.44%、41.94%,属枯水枯沙系列;渭河华县站2003—2020年平均径流量、输沙量占该站1960—2020年多年均值的88.29%、33.98%,属平水枯沙系列。

(3)三门峡水库原型试验以来,渭河下游2002年9月至2020年10月累计冲刷泥沙2.663亿m³,占建库初至2020年10月渭河下游累积淤积泥沙量的25.22%,累积淤积量由原型试验运用以前的逐步增大变为逐步减小。

(4)水库原型试验以来,临潼站水沙条件是渭淤13—26断面间河段冲淤的重要影响因素,华县站水沙条件不是

渭淤13断面以下河段冲淤的主导性因素。

(5)渭淤13断面以下河段历年累积淤积体变化与汛后潼关高程升降是正向关系,其相关系数为0.82。

(6)在近期渭河下游平水枯沙系列条件和河道冲刷下切背景下,随着河槽过洪能力增大和堤防工程体系逐步完善,渭河下游防洪安全保障程度不断提高,但河道整治工程面临顶冲甚至失稳出险的概率将会增大,建议加强河道整治规划建设 and 现有工程管护防守,以免河势恶化危及堤防安全。

(7)近期渭河下游水沙条件下,秋汛洪水场次和水量明显增多,建议借助平水枯沙的有利水沙条件进一步降低潼关高程,改善渭河下游河道条件,同时充分利用现有水利枢纽设施,发挥现有水库综合效益、综合利用水资源。

参考文献

- [1] 李昌志,王兆印,吴保生,等.潼关高程下降对渭河下游河床演变的影响[J].泥沙研究,2005,4(2):45-53.
- [2] 王兆印,李昌志,王费新.潼关高程对渭河河床演变的影响[J].水利学报,2004,9(1):1-8.
- [3] 曹绮欣,冯普林,石长伟,等.渭河洪水特性与风险研究[M].郑州:黄河水利出版社,2020.

Analysis of recent water and sediment and river erosion and silting in the lower Weihe River of Sanmenxia Reservoir

ZHANG Linlin¹, LOU Shujian², BAI Shaozhi¹, FENG Pulin¹

(1. Shaanxi Engineering Research Center of River, Xi'an 710018; 2. Sanmenxia Yellow River Pearl (Group) Co, Ltd, Sanmenxia 472000)

Abstract: In order to reflect the flood control situation of Weihe River, based on the data of hydrology, sediment and river topography from 2002 to 2020, through data analysis and numerical calculation and other methods, the characteristics of water and sediment variation, river erosion and deposition and influencing factors in the lower Weihe River of Sanmenxia Reservoir were analyzed. The results show that: The flood magnitude and field frequency above 1 000 m³/s at Lintong flood peak of Weihe River showed a decreasing trend since the prototype test; Xianyang and Huaxian Stations are normal water and dry sand series. The accumulative erosion sediment is 266.3 million m³ in the lower Weihe River, and the cumulative siltation amount changed from gradually increasing before the prototype test to gradually decreasing. The water and sediment condition of Lintong station is an important factor for the erosion and silting between sections 13 and 26. There is a positive relationship between the variation of accumulative siltation volume in Weiyu section below 13 and elevation rise and fall of Tongguan after flood seasons, and the correlation coefficient is 0.82. Some suggestions are put forward, such as to strengthen the planning and construction of river regulation and the management and defense of existing projects, further reduce the Tongguan elevation, and strengthen the comprehensive benefit of reservoirs and comprehensive utilization of water resources.

Keywords: water and sediment; river erosion and silting; elevation of Tongguan station; the lower Weihe River; Sanmenxia Reservoir

责任编辑 杜晓鹤