

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0101

刘鑫,李春光,景何仿,等.黄河宁夏四排口河段河床冲淤变形的计算[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):130-138. LIU X, LI C G, JING H F, et al. Computation of river bed scouring and silting deformation in the Sipaikou Reach of the Yellow River in Ningxia[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 130-138. (in Chinese)

黄河宁夏四排口河段河床冲淤变形的计算

刘鑫¹, 李春光^{1,2}, 景何仿², 乔桥¹, 兰斌¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 北方民族大学 土木工程学院, 银川 750021)

摘要:黄河宁夏平罗四排口“Ω”型河道“裁弯取直”工程的实施,引发了该段河道河床边界条件的剧烈改变。为了掌握工程运行后该段人工开挖引河中水流运动、泥沙运移以及河床迁移演变的发育、演化规律,项目组多次赴平罗黄河四排口进行现场考察与实地取样、测量。根据所研究河段初始地形、流场分布情况以及初步预测的河床变形规律布设了一系列淤积测验断面,随后多次对其展开现场实测,得到了该段河道的河床演变规律、悬移质泥沙粒径和含沙量的分布情况与岸边丁坝影响下河道主流的演进变化规律。依据实测结果计算、分析了工程运行初期河床的平均冲淤变化程度(1.607 7 m)和河段整体冲刷量(356.490 8万 m³),根据分析结果提出了进一步加固丁坝群后左岸岸坡的建议。

关键词:黄河;四排口河段;裁弯取直;河床变形;冲淤计算;丁坝

中图分类号:TV131.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Computation of river bed scouring and silting deformation in the Sipaikou Reach of the Yellow River in Ningxia

LIU Xin¹, LI Chunguang^{1,2}, JING Hefang², QIAO Qiao¹, LAN Bin¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Civil Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The implementation of the "cut and bend" project of the Ningxia Pingluo Sipaikou Ω-shaped river channel caused a drastic change in the river bed boundary conditions. In order to grasp the development and evolution rules of water movement, sediment movement, and river bed migration and evolution in the artificial excavation of the river after the project operation, the project team went to the Sipaikou of the Yellow River in Pingluo for site inspections and field measurements. A series of sedimentation test sections were set up according to the actual terrain, current flow conditions, and preliminary forecasted river bed deformation rules of the studied river sections. The subsequent field measurements were carried out to obtain the river bed evolution laws and suspended sediments of this channel, the distribution law of particle size and sediment content, and the evolution of the mainstream of the river under the influence of shoals on the bank. Based on the actual measurement, the average degree of erosion (1.607 7 m), deposition of the river bed, and the overall scouring amount (356.490 8×10⁴ m³) of the river section were calculated and analyzed. The analysis results suggested the strengthening of the left bank slope of the Spur Group.

Key words: Yellow River; Sipaikou Reach; cut and bend; river bed deformation; erosion and sediment calculation; spur

收稿日期:2020-01-02 修回日期:2020-03-24 网络出版时间:2020-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200413.1136.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(11761005;11861003)

作者简介:刘鑫(1997—),男,陕西咸阳人,主要从事水沙运移与河床演变数值模拟研究。E-mail:ENGINEERliuxin@163.com

通信作者:李春光(1964—),男,河南驻马店人,教授,博士,主要从事计算流体力学与河流动力学数值模拟研究。E-mail:2002092@nwnu.edu.cn;cglizd@hotmail.com

水工建筑物的修建与运行会极大程度改变原始河段水流运动的边界条件^[1-2],打破河流原有的冲淤平衡状态,进而引发河流剧烈的“再造床”运动^[3-4],直至水流运动与河床、水沙边界条件再次达到相适应状态^[5-7]。针对黄河宁蒙河段特有的河势迁移与演变规律,马云等^[8]通过分析黄河宁夏段的洪水特征与河势演变规律,提出实施相应的河道整治(控导、护岸、护滩等)工程有助于进一步稳定、归顺河势,提升河段的过流水平与泄洪能力。此外为了研究河道整治工程的可行性与必要性,常需要进行相应的试验与模拟研究,而这些均建立在已知河道实际冲淤、变形资料的基础之上^[9]。由此可见河道冲淤量的测算与其分布规律的探寻是进行相应河势演变、河道整治效益研究的重要基础。在实际工程中,目前最为常用的测算方法大致有3种:断面地形法、网格地形法和输沙量平衡法等^[10-11]。有许多学者(如孙中强等^[12]、彭佳等^[13]、朱宇驰等^[14])从3种方法的计算模式、优劣程度、精度范围、误差分类等方面对其展开了剖析研究,特别是段光磊^[15]分别借助这3种方法计算了三峡水库下游宜昌至监利河段的河床冲淤变形量,并分别对影响各计算方法精度的干扰因素展开了详细的讨论,针对各研究方法的优缺点,分别在断面间距布置、网格尺寸设置与含沙量修正等方面提出了改进措施。

无论使用哪种测算方法计算河道中的冲淤量,均需要对水下地形展开测量,目前常用的测量方法有高精度全球定位技术与回声探测技术^[16-17](可直接用于测量断面流量、面积、三维流速以及水深、水面高程等数据)。景何仿等^[18]借助 ADCP 与 RTK 等仪器获得了水洞沟水库的库底地形,计算了4种预设工况下的库区淤积量与平均淤积厚度,预测了各工况下水库可运行最长时间,其结果可用于指导水洞沟水库的科学运行;祁媛媛^[19]、黄凌霄等^[20]亦借助多普勒流速剖面仪等回声探测仪器对宁夏鸭子荡水库的库区冲淤、水流运动情况进行了实测计算

与分析,并在此基础上借助图像拼接、数学形态学等方面技术研究了水库入水口、出水塔附近的流场分布情况,得到了较为精确、详细的模拟结果;乔桥等^[21]借助 M9 与 RTK 等仪器测量了黄河外滩河段24个淤积测验断面的水文、泥沙与床面地形数据,并利用断面法计算了研究区域的河床冲淤量和平均冲淤厚度,其结果可为后续该河段进一步的模拟研究奠定基础。

黄河四排口“裁弯取直”河段于2018年正式投入运行,在运行初期出现了剧烈的河床变形、河势迁移变化,目前尚无人针对黄河宁蒙河段粉细砂质河床上开展“截流”与“裁弯取直”工作所面临的相关问题展开研究,本文借助 ADCP、GIS-RTK、LPSA 等仪器通过现场实测对四排口河段的水流运动、河床变形规律展开分析讨论,为保证河道整治工程的安全、稳定运行提供理论依据。

1 黄河四排口河道整治工程概况

黄河四排口河道整治工程位于宁夏平罗县通伏乡通伏村滨河大道东侧,该河段河床由抗冲性较差的粉细砂组成,再加上该段河道的河势为特有的“Ω”型弯道,致使下泄水流受到弯道环流的作用而不断冲刷左岸,引发河道断面不断向西迁移摆动,对周边人民群众的生命财产造成严重威胁^[22]。为改变这一现状,在河道左岸修建了一系列丁坝、联坝和导流明渠等水利设施(其中丁坝与联坝的坝顶设计高程为1 100.31 m,由10道(18至27号)与边岸夹角呈30°的“下挑式”丁坝组成;所开挖导流明渠横断面采用较为稳定的梯形断面,上开口82.00 m,下开口40.00 m,开挖长度1 886.00 m,对应原型弯曲河道长度约为3 312.00 m,经计算可知裁弯比为0.57;进出口底高程差值25.00 cm,沿程纵比降约为0.130‰),用于长3.70 km的“Ω”型弯道裁弯取直,以便改变该段河道的迁移演变规律。工程运行初期与运行1年后该研究区域的航拍图见图1。

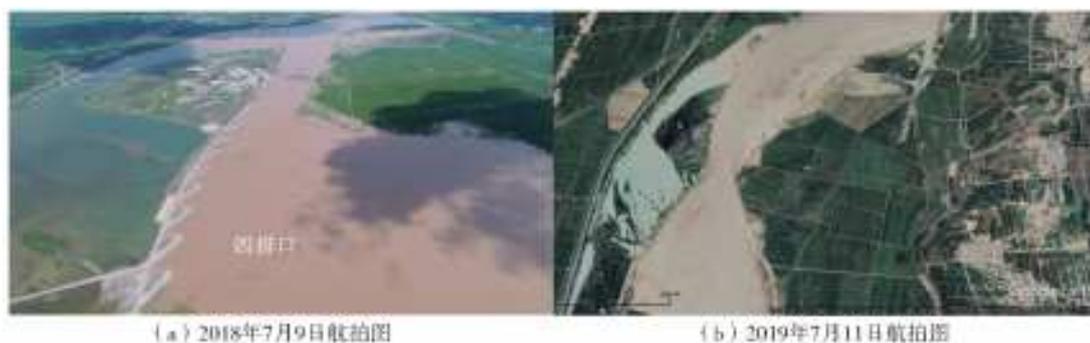


图1 研究区域卫星航拍图

Fig. 1 Satellite imagery of the study area

2 初始地形实测结果与淤积测验断面的布置

为研究该段河道在“裁弯取直”工程实施后床面地形的迁移、演变规律,项目组通过多次的现场考察与实测,最终根据研究区域实际地形与初步的河势演变预测结果,沿着水流运动方向布置了 13 道(C_{S1} 至 C_{S13}) 典型淤积测验断面,设置了控制桩号并对初始的河岸边界与水下地形展开测量。初步了解到该段河道平均河宽大致为 3 300.00 m,泄洪主槽平均宽度约为 650.00 m,河段沿程纵比降约 0.18‰;初步计算河流弯曲率约为 1.23,主流沿程摆动较为剧烈。数据处理均采用相对坐标(若与北京 54 坐标系系统统一,需对横、纵坐标分别加一定值 6.38×10^5 、 4.29×10^6 m)。研究所设淤积测验断面的详细分布情况与初始研究区域三维立体图分别见图 2、3。

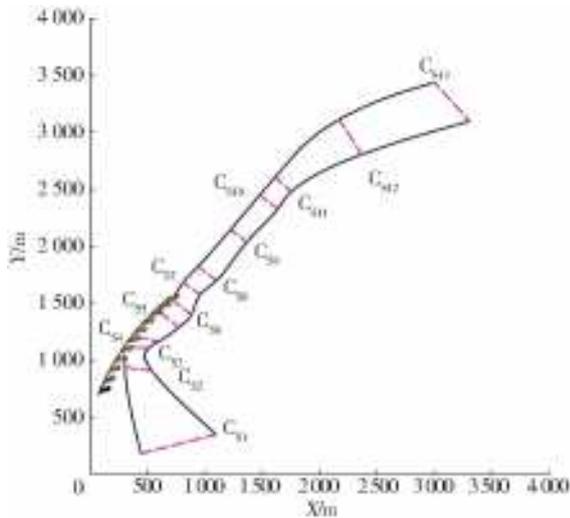


图 2 初始河道岸线与监测断面横剖面分布
Fig. 2 Cross section distribution of initial channel shoreline and monitoring section

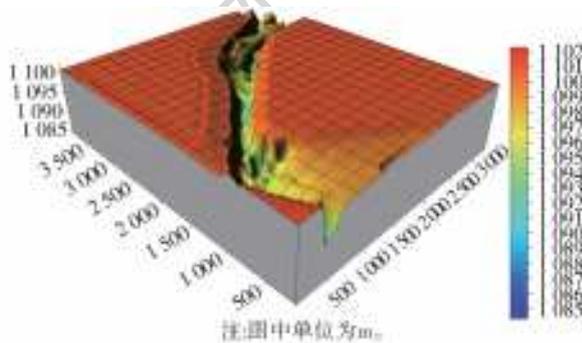


图 3 研究区域初始三维地形
Fig. 3 3D topographic map of the study area

测量时采用快艇牵引测量仪器(ADCP)沿着预设断面从河岸一侧拖曳至另一侧,为方便采样且保证数据的可靠性,每间隔 1 s 便采集 1 次数据,详细记录预设断面不同垂线各细胞单元(即深度单元,可

自定义设置分层情况)处的三维流速、水深等数据^[1]。由于该测量仪器(ADCP)所测数据均采用 ENU 坐标系(东坐标、北坐标、垂向坐标),而在进行数据处理时,为研究典型断面的纵向流速分布、横向环流分布以及断面流量的计算,均采用断面局部坐标系(垂直于断面为纵向,沿着断面为横向和垂向),因此需要对原始数据进行一个简单的坐标转换。由于所研究河段长度仅 4.530 km,因此在计算时可以忽略参考椭球(常用 WGS84 椭球)长短轴、曲率半径以及偏心率等因素的影响,通过简化可得如下 ENU 坐标系与断面局部坐标系的转换关系^[21]。

$$\begin{cases} u = V_e \times \sin A + V_n \times \cos A \\ v = V_e \times \cos A + V_n \times \sin A \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_e 为东向流速, m/s; V_n 为北向流速, m/s; u 代表纵向流速, m/s; v 表示横向流速, m/s; A 为横向流速与东向流速的夹角($^\circ$)。

3 黄河四排口河段典型断面测量结果

3.1 实测河岸线变动情况的对比分析

表 1 对 2018 年 7 月 17 日、10 月 21 日与 11 月 25 日累计 3 次的实测河道岸线“崩退”“淤进”等情况进行了汇总(以 2018 年 7 月数据为基准,向内淤积为负,向外冲刷为正)。从宏观、常历时角度观察分析发现,截流工程对原河道的河势演变产生了较大影响,截流后河宽增大幅度较为明显,边岸冲淤、崩塌较为严重,河道水流的边界条件变化较为剧烈,再造河床运动十分显著。此外,从表 1 还可以看出,该段河道上、中、下 3 段河势的变化存在较为明显的差异。

(1) 断面 C_{S1} 、 C_{S2} 左岸河岸线“崩退”幅度较小,均在 50 m 左右。右岸由于进入汛期,水位上升,浅滩被淹没,因此岸线扩展幅度高达 150~600 m。

(2) 断面 C_{S3} 至 C_{S6} 位于布设有丁坝群的河段区域,受到岸边丁坝“挑流”作用的保护,因此左侧河床、河岸未出现大面积的淤积、冲刷现象。右岸一方面由于进入汛期,水位上升,大面积的浅滩被淹没;另一方面由于过流断面面积相对较小,流速急剧增大,形成了一种类似“瓶颈状”的特殊过渡河段,右侧河床被剧烈冲刷;再加上与上游进口河段以布有岸边丁坝(沿水流方向依次是 18 至 27 号)的弯曲河道相连,局部阻力增大,泄流不畅,出现壅水现象,进一步加宽了河谷水面的宽度。

(3) 断面 C_{S7} 至 C_{S11} 受到强烈的坝后回流作用,在丁坝遮挡的区域,流速急剧下降,而主流区流速增

加,从而形成高速度剪切面,流场脉动程度十分强烈(在左侧河道位置处形成了一个长半径约 128.824 m、短半径约 71.939 m 的逆时针运动的相对规则的椭圆形旋涡)。造成坝后左岸岸坡发生持续性冲刷,岸线“崩退”幅度 200~300 m;而右侧河床区域则在弯

道环流的作用下,出现了大面积的淤积现象,岸线“淤进”幅度 150~250 m。

(4)断面 C_{S12} 、 C_{S13} 右岸出现较为微弱的淤积,而左岸变化不大,说明坝后水流与河床边界条件基本可以达到相适应。

表 1 以 2018 年 7 月数据为基准的典型断面处岸线“淤进”“崩退”情况
Tab.1 "silting in" and "collapsing" of shoreline at typical section based on July 2018

典型监测断面	断面控制点间距(左)/m			断面控制点间距(右)/m		
	7—10月	10—11月	7—11月	7—10月	10—11月	7—11月
C_{S1}	58.956 8	36.867 9	95.824 7	-11.500 8	-207.578 6	-219.079 4
C_{S2}	50.923 7	0.937 0	51.850 7	135.915 4	-568.857 1	-432.941 7
C_{S3}	-14.464 7	16.269 2	1.804 5	6.097 0	-475.816 6	-469.719 6
C_{S4}	-11.232 6	14.473 8	3.241 2	210.279 1	-470.201 5	-259.922 4
C_{S5}	-17.3292	6.220 0	-11.109 2	188.560 0	-287.494 6	-98.934 6
C_{S6}	-22.094 5	16.394 2	-5.700 3	158.797 4	-116.474 1	42.323 3
C_{S7}	46.392 4	31.957 6	78.350 0	90.700 0	-35.510 9	55.189 1
C_{S8}	201.745 4	4.095 2	205.840 6	-74.804 7	-6.029 3	-80.834 0
C_{S9}	263.498 7	23.248 7	286.747 4	-105.496 8	-71.480 9	-176.977 7
C_{S10}	270.114 6	28.064 6	298.179 2	-122.232 0	-188.764 1	-310.996 1
C_{S11}	201.934 7	39.045 7	240.980 4	-163.209 0	-238.195 1	-401.404 1
C_{S12}	15.955 4	1.275 1	17.230 5	-54.675 4	-33.239 9	-87.915 3
C_{S13}	36.505 1	1.675 4	38.180 5	-38.232 6	-307.742 5	345.975 1

注:由于 11 月份该段河道的过流流量急剧减小,至 11 月 25 日下泄流量仅 932.121 m^3/s ,约为 7 月 11 日流量(1 447.322 m^3/s)的 64.4%、10 月 25 日流量(2 681.040 m^3/s)的 34.76%。水位大幅度下降,因此本文仅详细分析 7 月至 10 月河道岸线的变化情况。

3.2 多次实测河床高程变形情况的对比分析

从表 1 分析结果可知:该河段河势演变趋势与幅度存在较为明显的差异,故将其分成上、中、下与附加部分 4 段分别进行具体分析。

3.2.1 上游进口段(断面 C_{S1} 、 C_{S2})实测河床高程结果比较

上游进口段(断面 C_{S1} 、 C_{S2})实测河床高程结果比较见图 4。

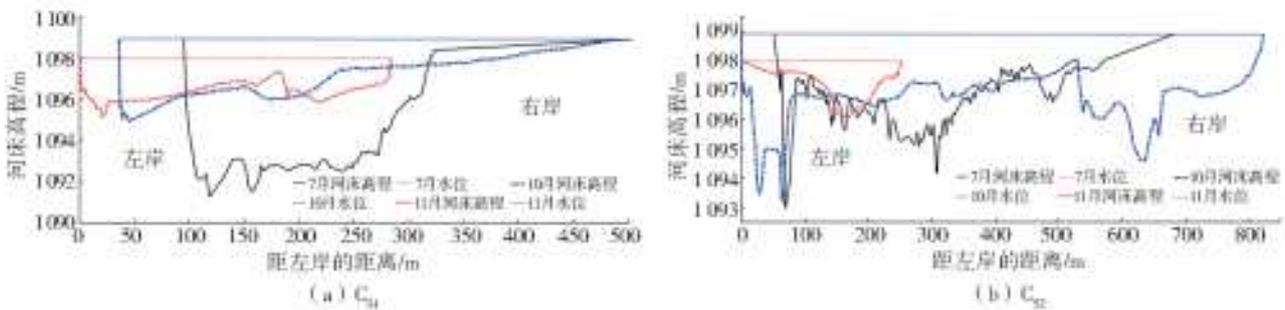


图 4 上游进口段(断面 C_{S1} 、 C_{S2})实测河床高程
Fig.4 Measured bed elevation of upstream inlet section (section C_{S1} 、 C_{S2})

淤积测验断面 C_{S1} 位于所研究河段的进口位置,是为减少上游河床形态对来水、来沙分布的影响而设置的。从 3 次测量结果可以很明显地看出:该断面处河道主槽发生了较大偏移,由 7 月份的“窄深型”河道逐渐向 10、11 月的“宽浅型”河道演进,尤其是 7 至 10 月,断面主槽位置淤积较为严重,河床平均抬高 4 m 左右。这是因为与原始天然河道相比,“裁弯取直”工程实施之后,河道拐弯位置

更偏向上游,偏转角度更小,即:增大了局部阻力系数,导致泄流能力下降,引发壅水现象,导致下泄水流流动速度降低,水流挟沙力减小,因此河道主槽发生淤积。相比而言,右岸变化不太明显,这是因为右岸为大面积的浅滩,水深较小,流速较低,水流含沙量不高,且弯道环流作用微弱,因此未出现大面积淤积现象。

淤积测验断面 C_{S2} 位于 19 号丁坝垂直流向断面

(河底高程整体差距较小,最深处位于河道中央,将近 5 m,平均水深约为 3 m,断面整体呈“宽浅型”分布,局部地形突变可能是由于测量失真引起的),此后水流运动将会受到岸边丁坝群的强烈影响。从 3 次测量结果的高程套绘图可以看出:该断面向左、右岸均有不同程度的演进,演进幅度 50~100 m,7 至 10 月的河道主槽深度变化较为微弱,但 10 月以后,

由于下泄流量持续减小,水流挟沙力大大降低,河道主槽开始淤积,至 11 月,河道主槽已完全脱离原始位置,偏向于河道右岸。

3.2.2 中游丁坝导流段(断面 C_{S2} 至 C_{S6}) 实测河床高程结果比较

中游丁坝导流段(断面 C_{S2} 至 C_{S6})实测河床高程结果比较见图 5。

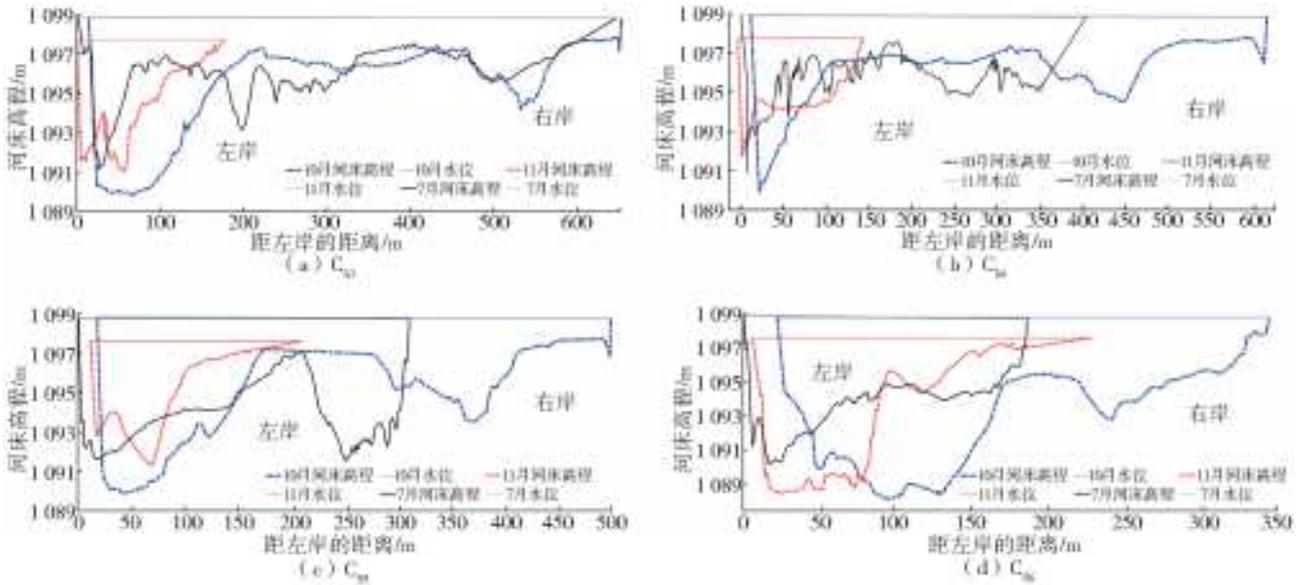


图 5 中游丁坝作用段(断面 C_{S3} 至 C_{S6}) 实测河床高程

Fig. 5 Measured river bed elevation in the middle spur dike action section (section C_{S3} - C_{S6})

淤积测验断面 C_{S3} 位于 21 号丁坝垂直流向断面(最大水深将近 10 m,位于左岸,右岸水深整体较小,最深处约为 3 m,整体呈一种“左低右高”的近梯形分布),该断面左、右岸岸线变化较微弱,平均摆动幅度不足 20 m,两岸边坡基本保持稳定。只是在岸边丁坝群的“挑流”作用下,下泄主流开始向右岸发生偏移,造成河道主槽右侧发生剧烈冲刷,平均冲刷幅度约 5.024 m,10 月以后,随着下泄流量减小又逐渐发生淤积;而右岸的岸边滩地有冲有淤,总体变化不大。

典型监测断面 C_{S4} 、 C_{S5} 、 C_{S6} 位于丁坝群所处位置(河床断面形状呈现“左低右高”型分布,河道主槽偏向左岸位置,纵向平均流速约为 1.232 m/s(7 月),由于水流运动持续受到岸边丁坝的“挑流”作用,下泄主流向河道中央偏移,左岸流速减缓,再加上丁坝的抗冲性相比原始河道更强,因此左岸岸线基本维持稳定,仅局部位置存在微弱的冲淤;而右岸由于流速较大,发生了较为剧烈的冲刷,岸线不断向右岸崩退、迁移,平均冲刷、崩退幅度 200 m 左右,大大增加了水面宽度,出现了河势向东剧烈摆动的现象。

3.2.3 中游坝后引河段(断面 C_{S6} 至 C_{S10}) 实测河床高程结果比较

中游坝后引河段(断面 C_{S6} 至 C_{S10})实测河床高程结果比较见图 6。

淤积测验断面 C_{S7} 位于丁坝群末端(27 号丁坝垂直流向断面)。在坝后回流剧烈的淘刷作用下,床面出现了一个长半径约 184.493 m、短半径约 119.248 m 的“漏斗状”深坑,水深最高处高达 20.01 m,但由于距离 27 号丁坝较远,因此并不会危及岸边丁坝的安全、稳定运行。7 月时河道主槽大致位于河床中央,随着汛期来临,下泄流量不断增大(由 1 447.322 m^3/s 缓慢递增至 2 681.040 m^3/s),再加上上游来流的运动形态在丁坝群的调整下逐渐向河床右侧偏移,造成河床右岸发生剧烈冲刷,岸线“崩退”幅度约 110 m。10 月以后,随着下泄流量减少(由 2 681.040 m^3/s 急剧递减至 932.121 m^3/s),水流挟沙力降低,丁坝对水流的调整作用减弱,主流逐渐回归左岸,造成左岸冲刷、右岸淤积,过流剖面逐渐转化为“宽浅型”断面。

淤积测验断面 C_{S8} 、 C_{S9} 、 C_{S10} 位于丁坝群后人工开挖引河所处位置。从整体角度分析,该段河床最

大水深位置有逐渐靠近左岸的趋势,即深泓线不断向左迁移、演进,河道中心处流速较大。由图 6 可知,7 月时河床形态还维持着人为开挖所保留的“梯形”断面形态,随着流量不断增大,坝后回流作用持

续增强,因此引发了左岸岸坡的持续冲刷,河道主槽位置逐渐向左岸偏移。特别是 C_{S9} 断面的河宽发育愈加明显,右岸流速大小较其余区域急剧减小导致靠近河岸边线的淤积程度增大。

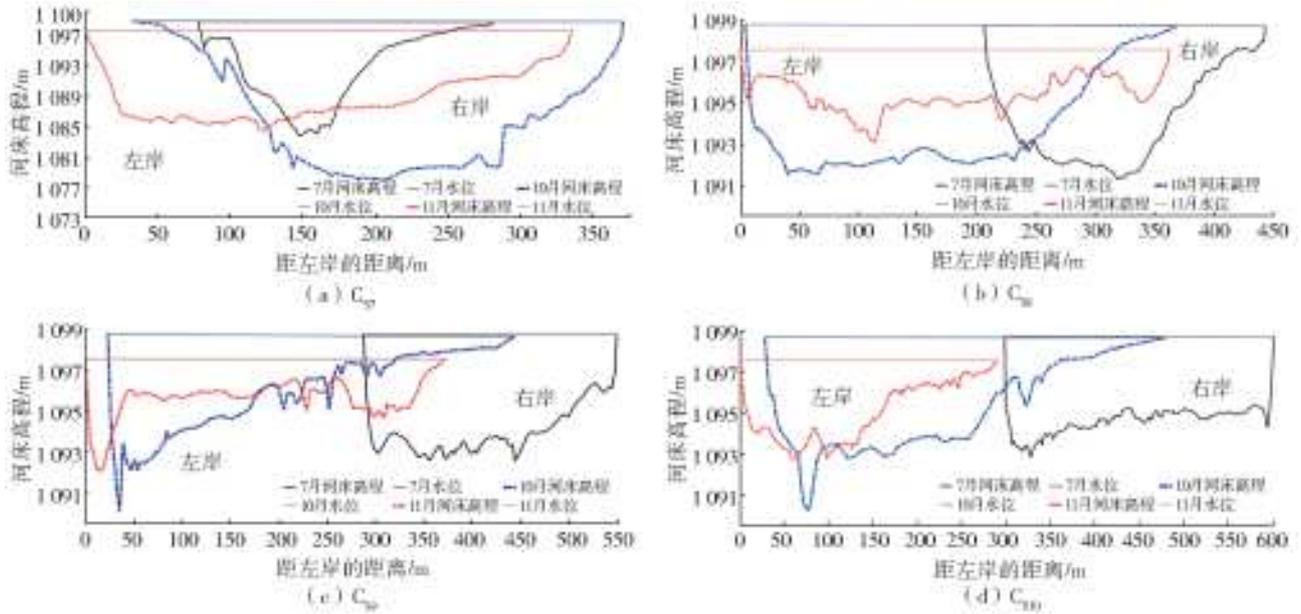


图 6 下游坝后引河段(断面 C_{S7} 至 C_{S10})实测河床高程

Fig. 6 Measured river bed elevation at downstream reach of downstream dam (section C_{S7} - C_{S10})

3.2.4 下游引河出口段(断面 C_{S10} 至 C_{S13}) 实测河床高程结果比较

下游引河出口段(断面 C_{S10} 至 C_{S13})实测河床高程结果比较见图 7。

淤积测验断面 C_{S11} 位于所开挖引河与原始河道接洽的位置,而断面 C_{S12} 、 C_{S13} 则是为了缓解岸边丁坝对下泄水流影响而额外增设的研究剖面,可以看

到位于引河末端的 C_{S11} 断面河床形态变化极其剧烈,泄洪主槽完全从右岸移动到左岸外(横向迁移距离约 550 m),其余研究剖面(C_{S12} 、 C_{S13})的河道水面宽变化不大,展宽幅度不足 50 m,只是原来横在河床中部的滩地被完全冲刷掉,平均冲刷厚度约 5.02 m,此外泄洪主槽也从原来的河道两岸逐渐偏移至河道中央。

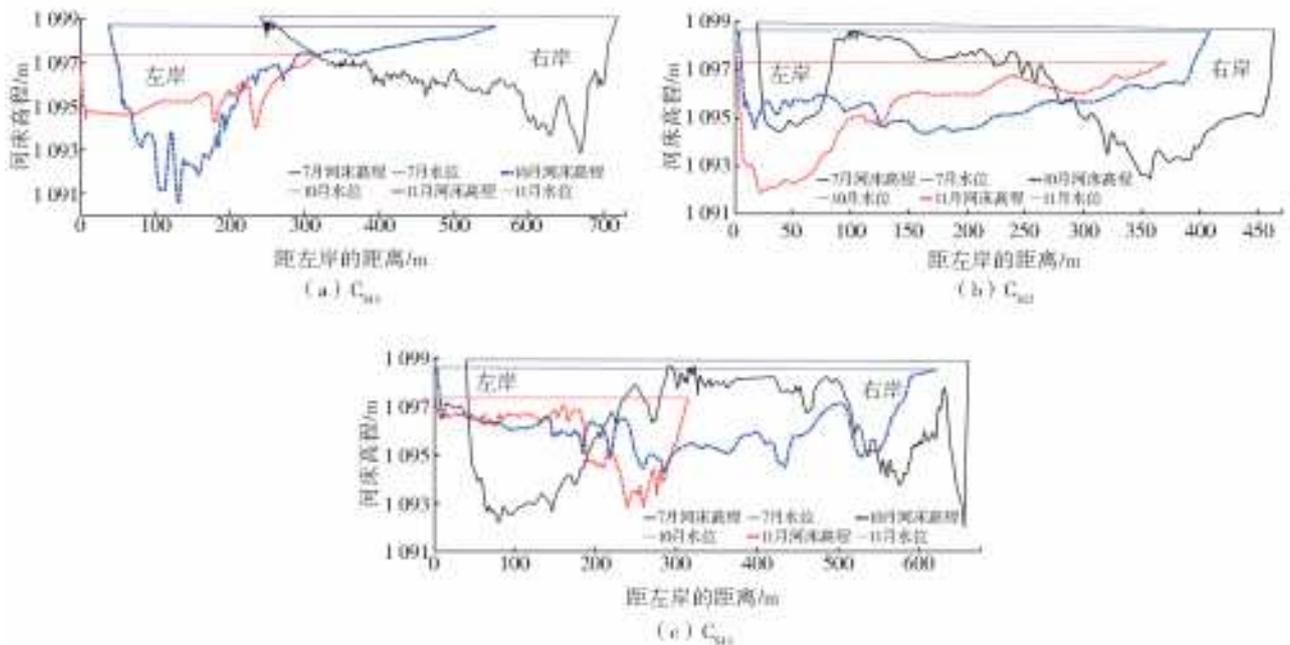


图 7 下游引河出口段(断面 C_{S11} 至 C_{S13})实测河床高程

Fig. 7 Measured river bed elevation at the downstream river diversion exit section (section C_{S11} - C_{S13})

3.3 研究区域内泥沙粒径的组成与分布

借助深水取样器在每个淤积测验断面邻近左岸、靠近右岸以及河中央处分别取浑水水样 1 份(共计 3×13 份),并利用室内激光粒度分析仪(LPSA)对所采浑水样进行泥沙粒度分析,分别得到了各个典型监测断面不同位置处的悬移质泥沙中值粒径、质量含沙量等参数,其统计结果见表 2、图 8。

表 2 2018 年 11 月各断面悬移质泥沙中值粒径

Tab.2 Median diameter of suspended sediment at various sections in November 2018

单位: μm				
断面号	靠近左岸处	河中心处	靠近右岸处	平均中值粒径
C _{S1}	17.690	13.310	8.100	13.030
C _{S2}	15.350	12.650	6.130	11.380
C _{S3}	16.020	11.250	13.480	13.580
C _{S4}	18.550	11.630	6.840	12.340
C _{S5}	13.980	21.590	24.390	19.990
C _{S6}	18.850	15.420	14.230	16.170
C _{S7}	18.500	16.750	9.180	14.810
C _{S8}	13.520	13.960	13.310	13.600
C _{S9}	14.900	15.240	9.520	13.220
C _{S10}	19.370	15.530	24.870	19.920
C _{S11}	20.850	15.300	22.300	19.480
C _{S12}	19.610	17.140	9.970	15.570
C _{S13}	12.630	18.000	13.230	14.620
平均值	16.910	15.210	13.500	15.210

分析各研究剖面的悬移质泥沙粒径级配曲线、质量含沙量分布规律以及水下休止角等统计参数可

以发现:该研究河道(剖面 C_{S1}至 C_{S13})的悬移质泥沙中值粒径、质量含沙量等统计参数沿流程并非单一递增或递减,而是呈现出一种起伏不定的变化趋势,表明该段河道水流处于一种极度复杂的运动状态,水流挟沙力沿程的变化幅度较大。

(1)断面 C_{S1}、C_{S4}的泥沙中值粒径(11.380~13.580 μm)较为接近,变化幅度较小,平均值约为 12.663 μm 。这是由于该段河道河床形态变化较为微弱,再加上断面纵向平均流速(0.963~1.017 m/s)沿流程变化不大,水流挟沙力变化幅度较小。

(2)断面 C_{S4}至断面 C_{S5}的泥沙中值粒径出现突增现象,从 C_{S4}断面的 12.34 μm 变化到 C_{S5}断面的 19.99 μm 。一方面由于该段河道水面宽急剧减小,过流断面发生收缩;另一方面由于下泄水流开始受到丁坝的“挑流”作用,河道中央位置处流速激增(平均流速高达 1.502 m/s)。

(3)断面 C_{S5}至断面 C_{S9}泥沙中值粒径出现缓慢收缩现象,从最高的 19.99 μm (C_{S5})逐渐降低到 13.22 μm (C_{S9})。一方面是由于 C_{S5}断面附近的岸边“挑流”丁坝限制了河流的横向展宽,因此泄流速度较高;另一方面则是因为 C_{S5}断面后的河岸边坡将不再受到丁坝的保护,因此,在高流速作用下,岸边冲刷,水面宽缓慢增长,出现了断面平均流速沿程递减的水力学现象。

(4)断面 C_{S9}至断面 C_{S10}的泥沙中值粒径又出现微弱的递增趋势,这是由于水面宽大幅度缩减,从原来的 355.516 m 减小到 274.318 m,因此断面平均流速激增,水流挟沙能力增大。

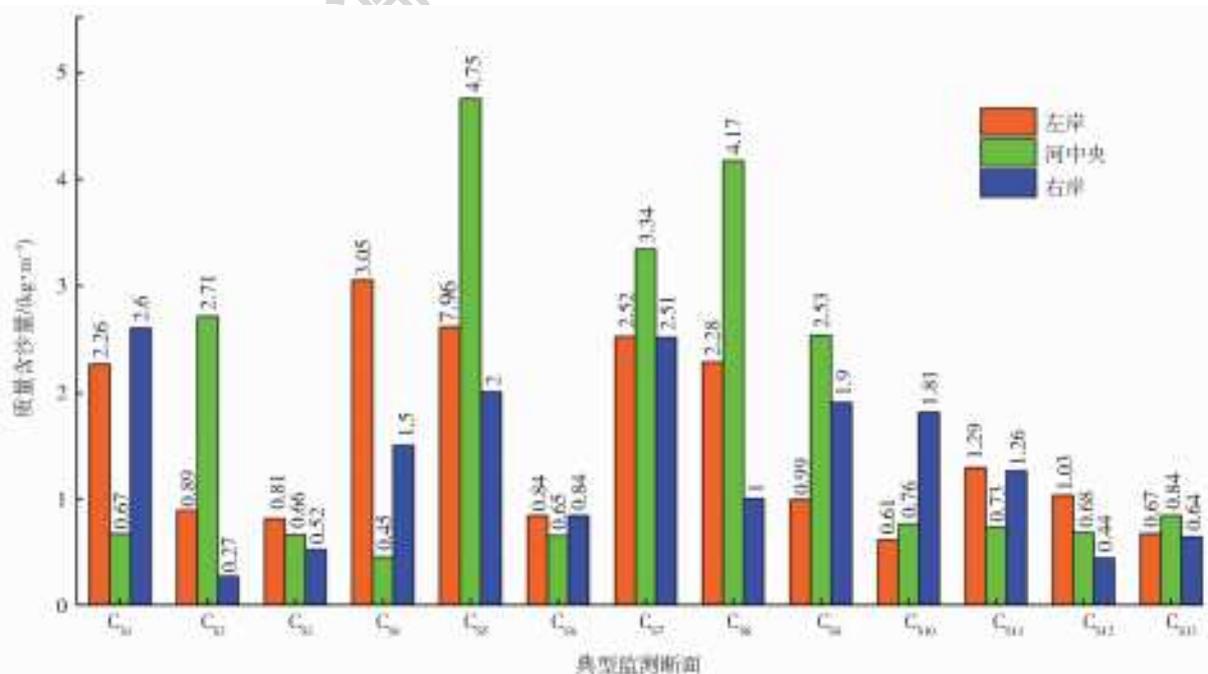


图 8 2018 年 11 月典型监测断面质量含沙量分布

Fig.8 Distribution of mass and sediment content at typical monitoring sections in November 2018

(5)断面 C_{S10} 至断面 C_{S13} ,由于河流从人工开挖下的引河(窄)回归到原始河道(宽),水流运动逐渐趋于平稳,断面平均流速缓慢下降,水流挟沙能力也因此减弱,悬移质泥沙中值粒径又开始逐渐减小。

4 河床泥沙冲淤量计算

为了量化“裁弯取直”工程运行后该河段详细的河床冲淤情况,需要利用断面法^[23-25]计算相应的河床冲淤量与冲淤厚度,即依靠淤积测验断面对河道进行离散处理,将连续河道假想地沿淤积测验断面分割为一个个棱柱体,再利用相对规则的棱柱体近似求解研究区域的泥沙冲淤量,而平均淤积厚度则可近似视为泥沙淤积量与计算区域面积的比值。显然 13 个淤积测验断面将该研究区域划分为 12 个独立单元。其详细计算结果见表 3。

表 3 研究区域不同断面处的平均冲淤量与冲淤厚度
Tab. 3 Average erosion and deposition at different sections of the study area

离散单元	断面间距/ m	冲刷量/ 万 m^3	占总冲刷量 的比例/%	平均冲刷 厚度/m
C_{S1} 至 C_{S2}	712.744 5	80.013 7	22.444 8	1.606 1
C_{S2} 至 C_{S3}	234.442 0	17.048 0	4.782 2	1.032 3
C_{S3} 至 C_{S4}	107.162 1	8.140 2	2.283 4	1.245 8
C_{S4} 至 C_{S5}	206.661 0	16.837 1	4.723 0	1.626 7
C_{S5} 至 C_{S6}	176.765 1	7.236 2	2.029 8	1.231 1
C_{S6} 至 C_{S7}	192.340 8	12.020 1	3.371 8	2.334 0
C_{S7} 至 C_{S8}	225.175 9	23.494 5	6.590 5	3.651 0
C_{S8} 至 C_{S9}	406.486 2	35.133 3	9.855 3	2.695 1
C_{S9} 至 C_{S10}	398.337 9	10.037 0	2.815 5	0.689 5
C_{S10} 至 C_{S11}	245.526 4	8.264 8	2.318 4	0.758 6
C_{S11} 至 C_{S12}	704.817 1	56.959 3	15.977 8	1.705 8
C_{S12} 至 C_{S13}	919.104 1	81.306 7	22.807 5	1.653 4
累计值	4 529.559 3	356.490 8	100.000 0	1.607 7

注:表中正值代表冲刷,负值则表示淤积,且计算值均表示“绝对”冲淤量。

经计算可知:研究区域从 2018 年 7 月 17 日至 10 月 21 日,历经 100 余天的演化发展,总冲刷量约 356.490 8 万 m^3 ,平均冲刷厚度 1.607 7 m。由于各淤积测验断面的间距分布不均(100~900 m),因此无法直观寻找冲淤量最大的单元。但通过计算平均冲刷厚度可知,冲刷最为剧烈的单元是 C_{S7} 至 C_{S8} ,累计冲刷量约为 23.494 5 万 m^3 ,平均冲刷厚度约 3.651 0 m。该位置处于丁坝群末端、引河进口位置,受到坝后回流(长半径约 128.824 m、短半径约 71.939 m 的逆时针运动的相对规则的椭圆形旋涡)的剧烈冲刷,且并未在坝后左岸修建任何防护措施,

因此该位置处河床变形异常剧烈,岸线“崩退”距离高达 100 m 以上。

5 结论与展望

为了研究所开挖引河(导流明渠)在“裁弯取直”工程运行后的河势演变、河床冲淤变化规律,通过多次现场实测,从河岸的“崩退”与“淤进”、典型断面的冲淤变形、悬移质泥沙的粒径与含沙量等多个方面对其展开研究,并对工程运行初期河床冲淤程度进行了量化计算。

(1)截流工程对原河道的河势演变产生了较大影响,截流后河宽增大幅度较为明显,尤其是丁坝群末端和坝后引河段,边岸“崩退”“淤进”程度 40~300 m;河道整体迁移、摆动幅度可达 200~300 m;边岸冲淤、崩塌较为严重,河道水流的边界条件变化较为剧烈,再造河床运动十分显著。

(2)初步确定出该研究区域内悬移质泥沙中值粒径分布范围 11.38~19.99 μm ,其中 80%的泥沙粒径集中在 13.22~19.40 μm ,平均中值粒径约 15.21 μm ;含沙量(用质量含沙量衡量)较大的水域集中在 C_{S5} 、 C_{S7} 、 C_{S8} 、 C_{S9} 断面,特别是主流所在的河道主槽位置含沙量较高;此外由该段河道泥沙中值粒径、质量含沙量沿程呈现一种起伏不定的变化趋势可知,该段河道水流处于一种十分复杂的运动状态。

(3)采用认可度较高的断面法计算了研究区域河床的冲淤量与冲淤厚度,由结果可知该段河道整体上呈冲刷状态,在工程运行初期的 100 多天,整体冲刷量高达 356.490 8 万 m^3 ,平均冲刷厚度 1.607 7 m。冲刷最为剧烈的区域位于丁坝群下游 C_{S6} 断面至引河中游 C_{S9} 断面,整体冲刷量占比 19.817 6%,平均冲刷厚度 2.334 0~3.651 0 m。

通过对黄河宁夏四排口“裁弯取直”河段河床冲淤变形的实测分析,初步了解到该段河道河床的冲淤变形规律,并通过计算初步估计了该研究河段河床的变形程度,在工程运行初期短短的 100 多天,该段河道整体冲刷量高达 356.490 8 万 m^3 ,势必对邻近下游的河道、水库、灌溉取水口等水域与工农业生产活动产生剧烈影响,因此有必要对该段河道进行进一步的模拟研究,确定其最终的稳定位置。

参考文献:

- [1] 吕菊菊.黄河大柳树河段水沙运移规律及水温特性研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [2] 吴桢.海岸工程作用下海床冲淤演变预测与应用[D].杭州:浙江大学,2011.

- [3] LYU S J, FENG M Q. Three-dimensional numerical simulation of flow in Daliushu reach of the Yellow River[J]. International Journal of Heat and Technology, 2015, 33(1): 107-114. DOI: 10. 18280/ijht. 330115
- [4] HUANG L X, LI C G, ZHENG L X, et al. Edge detection algorithm of Daliushu river based on adaptive weighted morphology[P]. Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2017), 2017.
- [5] 魏炳乾, 严培, 刘艳丽, 等. 插有缓变曲线弯道水流运动的三维数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 1-7. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20150183
- [6] 李肖男, 李安强, 钟德钰, 等. 金沙江干流山区水库通航流态三维数值模拟研究[J]. 人民长江, 2018, 49(13): 38-43. DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. 13. 007
- [7] WANG Q S, PAN C H. Three-dimensional modelling of sediment transport under tidal bores in the Qiantang estuary [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(5): 662-672. DOI: 10. 1080/00221686. 2017. 1397781
- [8] 马云, 包淑萍, 陈丹, 等. 黄河宁夏河段河道演变分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(9): 38-40. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2014. 09. 012
- [9] 李想. 黄河源弯曲河流形态特征及牛轭湖演变规律[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [10] 陈帮, 李志威, 胡旭跃, 等. 藕池河形态变化与冲淤过程研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(4): 33-40. DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2009. 04. 010
- [11] 卢金友, 朱勇辉. 水利枢纽下游河床冲刷与再造过程研究进展[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12): 1-9. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20191064
- [12] 孙中强, 谷硕, 王厚杰, 等. 一种基于断面高程数据的河道冲淤计算方法: 曲线正交网格地形法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(9): 90-99. DOI: 10. 16441/j. cnki. hdx. 20170134
- [13] 彭佳, 孙东坡, 沈健. 不平衡输沙河段冲淤量计算典型因素影响探讨: 以长江三峡水利枢纽上下游河道为例[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 30-34. DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. 07. 007.
- [14] 朱宇驰. 近 50 年长江南京段河道变迁研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [15] 段光磊. 冲积河流冲淤量计算模式研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [16] 岳志春, 田福昌, 马晓阳. 黄河宁夏石嘴山河段冲淤演变及冰情分析[J]. 水力发电, 2018, 44(9): 24-27. DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2018. 09. 007.
- [17] 杨程, 吕岁菊, 李春光, 等. 基于非结构网格的三维水流数值模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 147-154. DOI: 10. 13207/j. cnki. jnwafu. 2017. 11. 019
- [18] 景何仿, 李春光, 吕岁菊, 等. 水洞沟水库泥沙淤积测算及运行方案研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 10-14. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2015. 10. 003
- [19] 祁媛媛. 鸭子荡水库泥沙淤积的数值模拟分析及调沙方案研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [20] 黄凌霄, 李春光, 郑兰香, 等. 鸭子荡水库地形前处理及二维水流运动模拟[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 47-52. DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2017. 04. 009
- [21] 乔桥, 李春光, 景何仿, 等. 黄河宁夏段外滩区域水下根石探摸研究[J]. 水力发电, 2019, 45(10): 93-97. DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342 (2019) 10-0093-05.
- [22] 桑红辉. 黄河宁夏河段二期防洪工程对国家级水产种质资源保护区影响评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [23] 姜朝. 断面法河道冲淤测验的主要问题及改进构想[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 33-37. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2017. 04. 008.
- [24] 马睿, 马良, 张罗号, 等. 黄河流域典型沙质河段冲淤量预估方法及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1277-1286. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20151432
- [25] 元媛, 卢金友, 齐孟骥, 等. 河道断面分形维数对面积测算误差的影响研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(5): 13-18. DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2017. 05. 003.