

黄河滨州白龙湾至兰家河段河势演变特点及治理对策

种法同,赵晓东,钟传利*

(山东黄河河务局工程建设中心,山东 济南 250011)

摘要:黄河滨州白龙湾至兰家河段为黄河下游弯曲性河段,近年来由于水沙条件变化,河势发生显著变化,局部河段主溜走向改变并左移,威胁堤防安全。通过资料分析、现场调研与测验、基本理论分析等方法,重点研究小浪底水库运用以来该河段的河道演变情况,提出了相应的治理对策。研究表明,主溜走向的改变是河势左移的主要原因,汛期洪水加剧了河势摆动。针对河势变化,提出了白龙湾险工下延5道垛、王平口控导下延3道垛等治理措施,以增强工程导流能力,减少“横河”“斜河”对堤防的危害。

关键词:黄河下游;弯曲性河段;水文情势;河势调整机理;治理对策

中图分类号:TV85;TV882.1

文献标志码:A

文章编号:1002-4026(2026)01-0111-10

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Evolution of the river regime and strategies for the management of the Yellow River Section from Bailongwan to the Lanxia River in Binzhou, China

CHONG Fatong,ZHAO Xiaodong,ZHONG Chuanli*

(Construction Center of Shandong Yellow River Conservancy Bureau, Jinan 250011, China)

Abstract: The section of the Yellow River from Bailongwan to the Lanxia River in Binzhou, China, is a curved section of the lower reaches of the Yellow River. In recent years, notable changes in the river regime have occurred due to alterations in water and sediment conditions. In certain sections, the mainstream lines have shifted leftward, posing a threat to the safety of the levees. Through data analysis, field investigations and measurements, and basic theoretical analysis, this study focuses on the channel evolution in this reach since the operation of the Xiaolangdi Reservoir and proposes corresponding management strategies. The study shows that the changes in the mainstream lines are the primary cause of the leftward river regime migration and that flood events during the rainy season further intensify the river's swing. In response to the river

收稿日期:2025-02-09 修回日期:2025-04-10

基金项目:山东黄河河务局科技项目(鲁黄规计[2020]25号)

作者简介:种法同(1989—),硕士研究生,高级工程师,研究方向为水利工程建设与管理。E-mail:452108003@qq.com

*通信作者,钟传利,正高级工程师,研究方向为水利工程建设与管理。E-mail:493380592@qq.com

regime changes, multiple management strategies are proposed, such as extending five spur dikes downstream of the Bailongwan risk control project and extending three spur dikes downstream of the Wangpingkou guiding structure, to enhance the project's flow-guiding capacity and reduce the hazards of the "cross-river" and "oblique-river" flows to the levees.

Key words : lower reaches of the Yellow River; curved river section; hydrological regime; river regime adjustment mechanism; management strategies

黄河滨州白龙湾至兰家河段位于黄河下游艾山至利津窄河段内,属弯曲性河段,河道长 22.3 km,相应堤防是保障滨州李庄、里则等 4 个乡镇(街道)约 40.46 万人口防洪安全的重要屏障,河段内分布着小开河、兰家引黄闸等重要引水工程,总设计引水流量 91 m³/s,灌溉面积 154 万亩(1 亩≈666.7 m²),防护意义重大。近年来,由于水沙条件变化,河势发生显著变化,局部河段主溜走向改变,导致河势左移。2018 年汛期,黄河下游 2 000 m³/s 以上洪水持续时间较长,加剧了白龙湾至兰家河段主溜的摆动,多年未靠河(或靠水靠溜)的大崔险工和王平口控导工程重新靠溜,汛期发生了根石坍塌险情,如进一步发展,将直接威胁到黄河大堤安全。此后,运行管理单位加密日常运行观测,采用机械配合人工抛石(散抛块石)的方式对大崔险工和王平口控导工程进行抢护,但是难以彻底解决问题。为保障堤防安全,开展该河段河势演变特点及治理对策研究具有重要现实意义。

本文通过资料分析、现场调研与测验、基本理论分析等方法,重点研究小浪底水库运用以来该河段的河道演变、河势变化机理及治理对策,旨在为该河段的河道整治规划提供技术支撑。

1 研究区域概况

黄河下游艾山至利津窄河段河道长 282 km,占山东黄河河道长的 44.9%,堤距为 0.5~5 km,河槽宽为 0.3~1.2 km,河床平均纵比降为 0.101‰,河道曲折系数为 1.18~1.21,遇较大洪水易漫滩,防洪压力较大^[1]。由于人类活动的日益加剧和自然气候的变化,1986 年以来,黄河下游出现了严重的主河槽淤积萎缩现象,河道主河槽淤积严重。黄河平滩流量是指下游河道主河槽(主槽)在洪水过程中,水位升高到与两侧滩地顶部齐平时所对应的瞬时流量值,是分析河道演变规律、制定治理措施和检验治理效果的最基础的参数之一。该河段平滩流量由 20 世纪 50 年代的 7 000~8 000 m³/s 减少到 2002 年局部河段平滩流量不足 2 000 m³/s^[2]。黄河滨州白龙湾至兰家河段堤距和主槽均狭窄,两岸堤距约 1.2~2.6 km,主河槽宽为 285~650 m,滩地宽度为 1 000~2 000 m(图 1)。该段河道纵比降约为 1/10 000,河道内滩面横比降为 1/700 左右。目前,该河段平滩流量约为 4 600 m³/s。

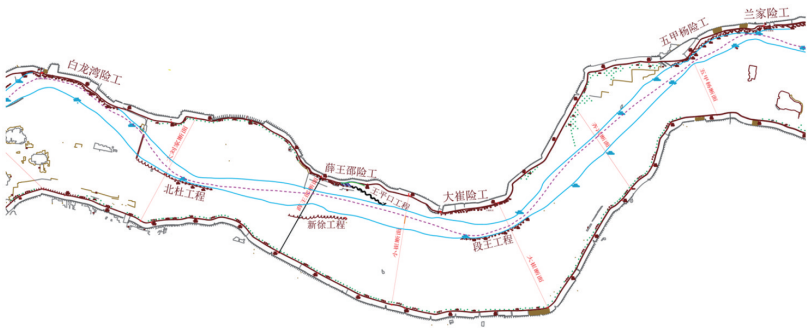


图 1 白龙湾至兰家河段河道平面图

Fig.1 Plan view of the river channel corresponding to the Bailongwan-Lanjia River section

黄河防洪工程是指为防御黄河洪水泛滥、减轻洪涝灾害,系统修建的各种工程设施的总称。白龙湾至兰家河段防洪工程体系由险工、控导工程和引黄涵闸组成。其现有险工 5 处(白龙湾、薛王邵、大崔、五甲杨、兰家),坝垛岸 241 段,工程长度 10.96 km,裹护长度 10.60 km。控导工程 4 处(北杜、新徐、段王、王平口),坝垛岸 66 段,工程长度 5.80 km,裹护长度 5.71 km。引黄涵闸 3 座,总设计引水流量 91 m³/s,设计灌溉面积 154 万亩(1 亩≈666.7 m²)。

2 水沙变化

泇口站位于山东省济南市天桥区,是距离该河段最近的水文控制站,且水文站与该河段之间没有支流汇入,水沙数据能够反应该河段的变化规律。小浪底水库自 2002 年起实施的“调水调沙”(人工制造洪水冲刷下游河道),其效果需通过泇口站数据验证,数据能真实反映水沙规律,因此选取泇口站数据开展研究。

2.1 水文特征变化

图 2 为泇口站逐年水量变化过程,可以看出,1950—1999 年泇口站径流量多年均值为 360.8 亿 m^3 ,呈逐渐减少趋势,从 1970 年以前的约 500 亿 m^3 逐渐减小至 1999 年的 100 亿 m^3 左右,且年际间径流量变化较大,最大值为 961.4 亿 m^3 (1964 年),最小值为 44.2 亿 m^3 (1997 年),比值为 21.8。黄河水利委员会从 1999 年 3 月开始正式实施黄河水量统一调度以来,与水量最小时的 1997 年相比,泇口站水量有所增加,其径流量 2000—2018 年多年均值为 190.5 亿 m^3 ,最大值为 354.5 亿 m^3 (2018 年),最小值为 78.1 亿 m^3 (2001 年),比值为 4.5。

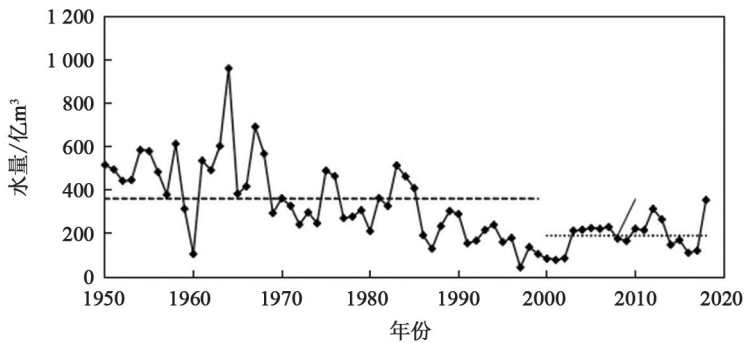


图 2 泇口站逐年水量变化过程

Fig.2 Annual variation of water discharge at the Luokou hydrological station

2.2 泥沙特征变化

图 3 为泇口站逐年沙量变化过程^[3]。可以看出,1950—1999 年泇口站沙量多年均值为 8.7 亿 t,呈逐渐减少趋势,从 1970 年以前的约 13 亿 t 逐步减小至 1999 年的 3 亿 t 左右,且年际间沙量变化较大,最大值为 21.28 亿 t(1967 年),最小值为 0.43 亿 t(1997 年),比值为 49.5。2000—2018 年泇口站沙量多年均值为 1.3 亿 t,最大值为 3.4 亿 t(2003 年),最小值为 0.16 亿 t(2016 年),比值为 21.3。

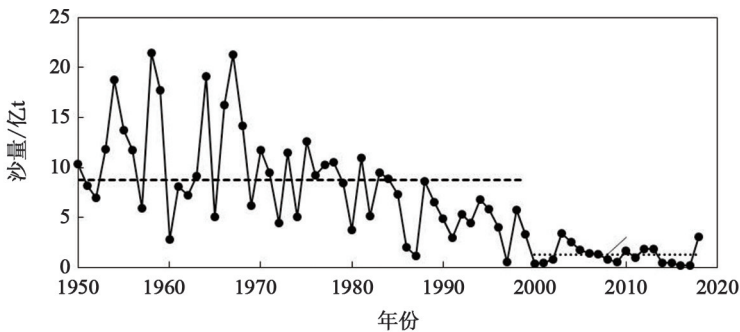


图 3 泇口站逐年沙量变化过程

Fig.3 Annual variation of sediment load at the Luokou hydrological station

3 河道演变分析

3.1 河道近期演变分析

为反应白龙湾至兰家所在河段局部河势变化情况,套绘了近十年河道平面图以及大刘家、薛王邵、小崔(二)2000—2018 年的断面图,以揭示河道近期演变规律。

3.1.1 河道平面变化

溜指河流中流速较大的主流带,溜向即主流带的水流方向,黄河主溜指的是黄河河道中流速最快、水流最集中、动力最强的核心水流带,它是河流能量和泥沙输移的主要通道。图 4 为 2001—2015 年白龙湾至兰家河段主溜线套绘图,该时期除 2002 年和 2003 年大崔险工和五甲杨险工前主溜摆幅较大外,其他时期该河段主溜保持相对稳定,2004—2015 年期间,该河段主溜最大摆幅约 240 m,2002 年和 2003 年,大崔险工和五甲杨险工前主溜摆幅达 200 m。

图 5 为 2015—2018 年白龙湾至兰家河段主溜线套绘图,该时期北杜至段王所在河段河道平面变化较大。2016 年开始,该段河势左移,主溜紧靠左岸滩地,左岸滩岸坍塌严重,主溜向左岸摆动达 260 m。2018 年洪水期间,该段河势继续左移,大崔险工前原有宽 100 m 左右的滩地全部坍塌入水,多年未靠河的王平口控导和大崔险工重新靠水靠溜。王平口控导和大崔险工因靠溜而发生险情,大崔险工新 1 号坝上首的滩岸靠主溜,水溜距大堤最近处仅为 18 m,与 2015 年汛前主溜相比,2018 年汛后主溜向左岸最大摆动达 430 m。

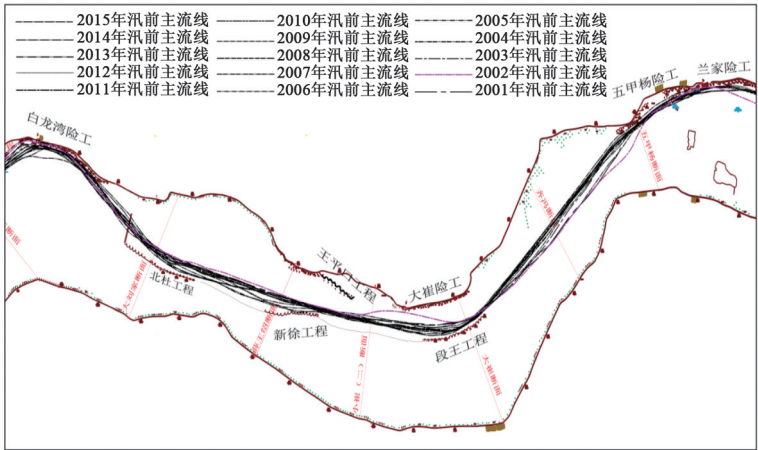


图 4 2001—2015 年白龙湾至兰家河段主溜线套绘图

Fig.4 Superimposed mainstream lines in the Bailongwan-Lanjia River section from 2001 to 2015

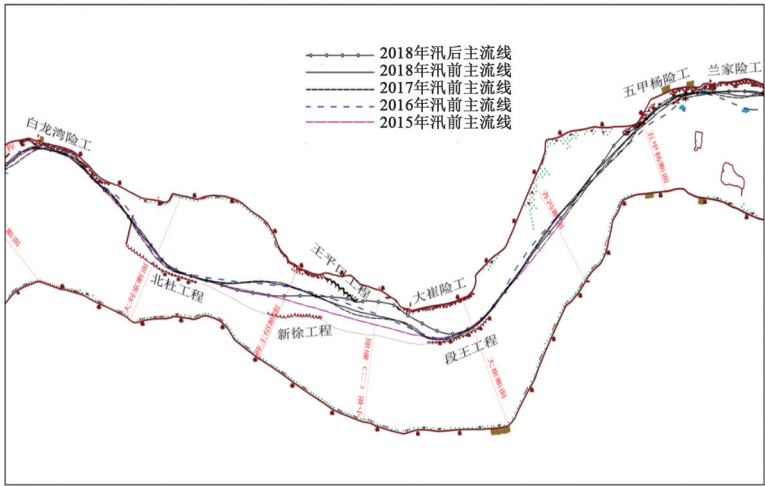


图 5 2015—2018 年白龙湾至兰家河段主溜线套绘图

Fig.5 Superimposed mainstream lines in the Bailongwan-Lanjia River section from 2015 to 2018

3.1.2 河道横断面变化

为直观地反映河道横断面变化情况,套绘了大刘家、薛王邵、小崔(二)2000—2018 年的断面图。由图可知,北杜工程至段王工程之间的河道变形较大,主溜线最大摆幅达 380 m。

大刘家断面位于北杜工程 9 号垛附近,断面宽约 2 500 m,河槽宽约 360 m(图 6(a))。河槽右岸受北杜控导工程约束,右滩唇较为稳定。小浪底水库运用以来,该断面主要以下切冲深为主,左岸展宽为辅。2018

年与 2004 年相比,深泓点高程降低 2.78 m,平均河底高程降低 1.54 m(图 6(b))。2013 年和 2015 年左滩唇横向摆动较大,其他时段维持相对稳定,2018 年与 2004 年相比,左滩唇向左展宽约 16 m,深泓点横向左右摆动较为剧烈(图 6(c)),年最大摆幅达 200 m。综合上述分析可知,大刘家断面滩岸横向变化维持相对稳定。

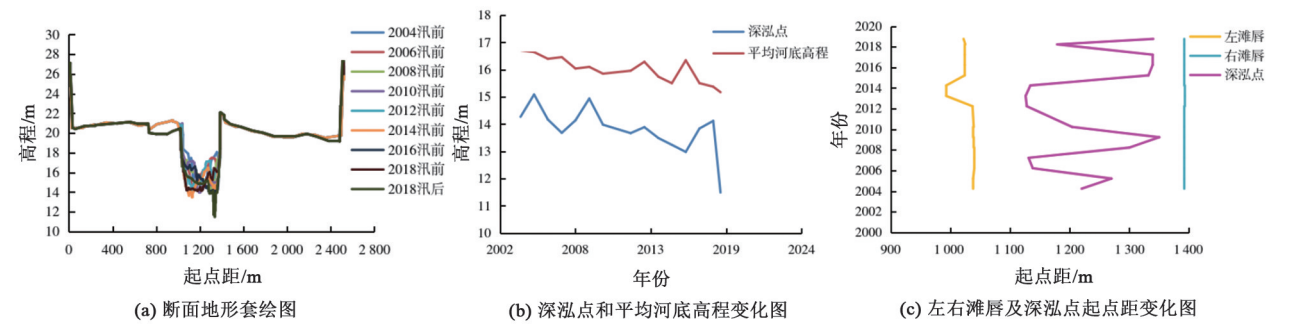


图 6 大刘家断面图
Fig.6 Cross-section at Daliujia

薛王邵断面与新徐工程 3 号垛交叉,断面宽约 1 800 m,河槽靠左,河槽宽约 650 m(图 7(a))。河槽右岸受新徐控导工程约束,右滩唇较为稳定。小浪底水库运用以来,该断面河槽既有冲深,又有展宽。2018 年与 2000 年相比,深泓点冲刷约 3.3 m,平均河底高程降低 1.97 m(图 7(b));左滩唇向左展宽约 60 m,深泓点向左移动约 380 m(图 7(c))。综合上述分析可知,薛王邵断面深泓点横向摆动较大。

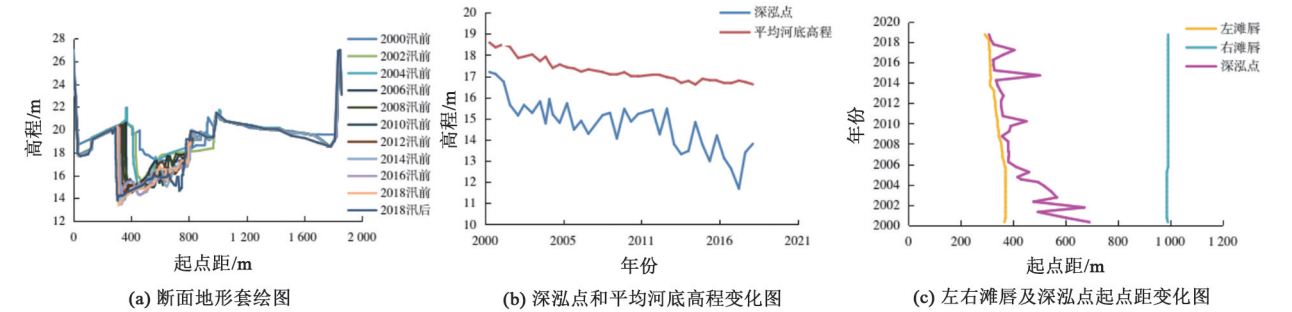


图 7 薛王邵断面图
Fig.7 Cross-section at Xuewangshao

小崔(二)断面位于大崔险工 3 号垛上游 760 m,断面宽约 2 300 m,河槽靠左,河槽宽约 425 m(图 8(a))。该断面河槽既有冲深,又有展宽,2004 年以来,深泓点冲深约 2.56 m,平均河底高程维持相对稳定(图 8(b))。2017 年之前,左右滩唇相对较稳定,2018 年左滩唇横向向左展宽约 160 m;深泓点横向左右摆动剧烈,与 2017 年相比,2018 年深泓点向左摆动约 200 m(图 8(c))。综合上述分析可知,小崔(二)断面滩岸及深泓点横向摆动幅度均较大。

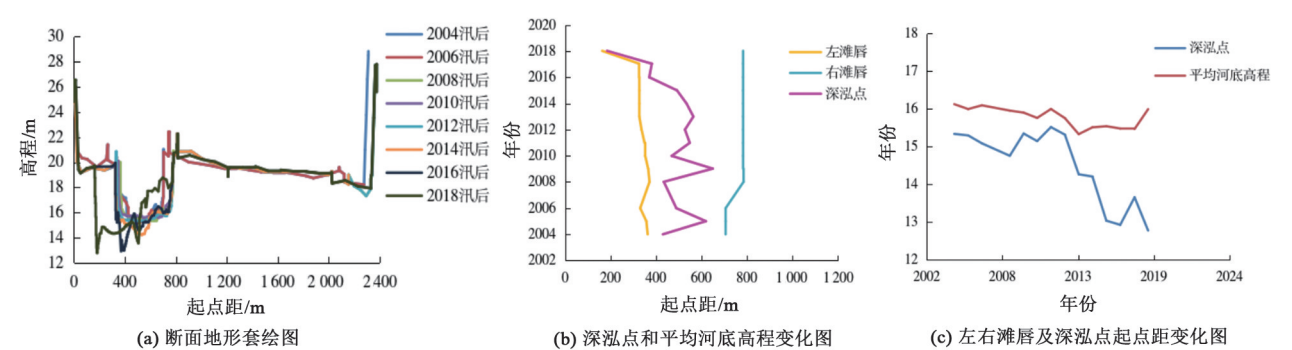


图 8 小崔(二)断面图
Fig.8 Cross-section at Xiaocui (II)

3.2 河道演变趋势分析

解放初期的 1954 年,白龙湾至兰家所在河段曾出现薛家湾险工、王平口控导和大崔险工靠溜的河势状况,之后随着河势的调整,主溜逐渐偏离左岸,薛家湾险工、王平口控导和大崔险工相继脱河。小浪底水库运用以来,由于河势的摆动,多年未靠河的王平口控导和大崔险工再次靠水靠溜。

未来水沙变化趋势分析表明,黄河下游很长一段时间仍维持小水的局面,由于长期小水清水的作用,该河段河道滩岸及深泓点仍然会在一定范围内发生变化。另外,短时期内王平口控导和大崔险工靠水靠溜的状况不会改变,若河势继续紧贴左岸行走,汛期中水时主溜下挫则可能发生钻裆河势(主流从两处工程之间的空隙直冲堤防的河势)。

4 局部河段河床演变原因分析

4.1 水沙条件影响

本文重点研究小浪底水库运用以来该河段的河道演变、河势变化机理及治理对策,小浪底水库运用后,黄河下游长期处于低含沙小流量的水流过程,因此只考虑长期小水和短期中水对局部河段河床演变的影响。

4.1.1 长期小水的影响

(1)小浪底水库运用以来小水出现频率

随着上中游骨干水库逐步投入运用,中游产沙环境得到显著改善,黄河下游水沙条件发生了较大变化^[4]。自小浪底水库 2000 年运用以来,除调水调沙期外,尤其是 2016 年至 2017 年,黄河下游全年处于低含沙小流量的水流过程。表 1 为小浪底水库运用后花园口站不同日均流量级出现频率统计,实测资料统计表明,小浪底水库运用后花园口站一年内小于 1 000 m³/s 流量(Q)出现的平均频率为 78.6%,最大频率为 98.1%(2000 年),1 000~3 000 m³/s 流量出现的平均频率为 19.0%,3 000 m³/s 以上流量出现的平均频率为 2.4%。2016 年和 2017 年,黄河下游花园口站 3 000 m³/s 以下流量一年内出现的频率达到 100%。

表 1 花园口站不同日均流量级出现频率统计

Table 1 Frequency statistics of daily average discharge levels at the Huayuantou hydrological station

年份	出现频率/%		
	$Q<1\,000\text{ m}^3/\text{s}$	$1\,000\text{ m}^3/\text{s}\leq Q<3\,000\text{ m}^3/\text{s}$	$Q\geq 3\,000\text{ m}^3/\text{s}$
2000	98.1	1.9	0.0
2001	96.2	3.8	0.0
2002	93.4	6.3	0.3
2003	75.3	24.7	0.0
2004	86.9	12.8	0.3
2005	83.8	14.2	1.9
2006	66.3	29.3	4.4
2007	81.1	14.2	4.7
2008	91.9	5.1	3.1
2009	89.3	7.7	3.0
2010	81.6	14.8	3.6
2011	68.2	27.9	3.8
2012	42.1	53.8	4.1
2013	69.3	24.4	6.3
2014	83.0	15.6	1.4
2015	63.6	35.6	0.8

表 1(续)

年份	出现频率/%		
	$Q<1\,000\text{ m}^3/\text{s}$	$1\,000\text{ m}^3/\text{s}\leq Q<3\,000\text{ m}^3/\text{s}$	$Q\geq 3\,000\text{ m}^3/\text{s}$
2016	93.7	6.3	0.0
2017	91.5	8.5	0.0
2018	37.3	55.1	7.7
平均	78.6	19.0	2.4

(2)小水对河势的影响

影响 1:上游来溜方向发生改变。横向稳定与河岸稳定密切相关,从物理机制来看,河岸稳定的决定性因素主要包括主溜的顶冲位置及其流向,以及河岸土壤的抗冲性能。主溜的走向,可以影响局部河岸的冲刷。白龙湾险工来溜方向的改变是造成王平口至大崔河段河道平面变化的主要原因。2015 年汛期,在持续约 10 d $2\,000\sim 3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 洪水作用下,白龙湾险工下首河势下挫,主溜紧贴左岸行走。由于洪水历时较短,下挫河势没有得到充分发展,在小水时主溜在简易桥头前发生坐弯,导致北杜工程主溜顶冲点上提,受北杜工程上首弯道挑溜的影响,新徐工程前主溜向左摆动达 260 m,大崔险工前主溜左移约 160 m。

影响 2:顺直流路向弯曲流路发展。在长期的小水作用下,不仅会导致河势上提,来溜方向发生改变,而且还会引起部分河段顺直流路向弯曲流路发展。如 2014 年初,新徐工程前是顺直流路,河宽达 400 m,主溜偏右岸,到了 2016 年 3 月,主溜左移,靠近左岸,右岸因凸岸淤积,多处心滩出露,由于 2016 年和 2017 年全年都是小流量过程,水流挟沙能力较小,加之右岸因凸岸淤积心滩出露,流速减小,进一步降低了水流的挟沙能力,导致右岸心滩逐渐被淤成滩岸。截至 2018 年汛前,主溜紧贴左岸行走,河宽因右岸淤积减小为 260 m,不仅如此,右岸因淤积而凸入河里的滩岸导溜作用明显,从而加剧了左岸的坍塌。

4.1.2 短期中水的影响

(1)2018 年汛期中水的影响

来溜方向发生改变后,短时期内会保持稳定,如汛 come 来水流量较大,中水会加剧滩岸及深泓点的摆动。2018 年汛前,新徐工程前主溜紧贴左岸行走的局面已形成,2018 年汛期泇口站流量超过 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的天数达到了 51 d(图 9),长时期的中水冲刷,导致王平口控导和大崔险工前滩岸坍塌较为剧烈,此次洪水期间,大崔险工前原有宽 100 m 左右的滩地全部坍塌入水,多年未靠河的王平口控导和大崔险工因靠溜而出险。

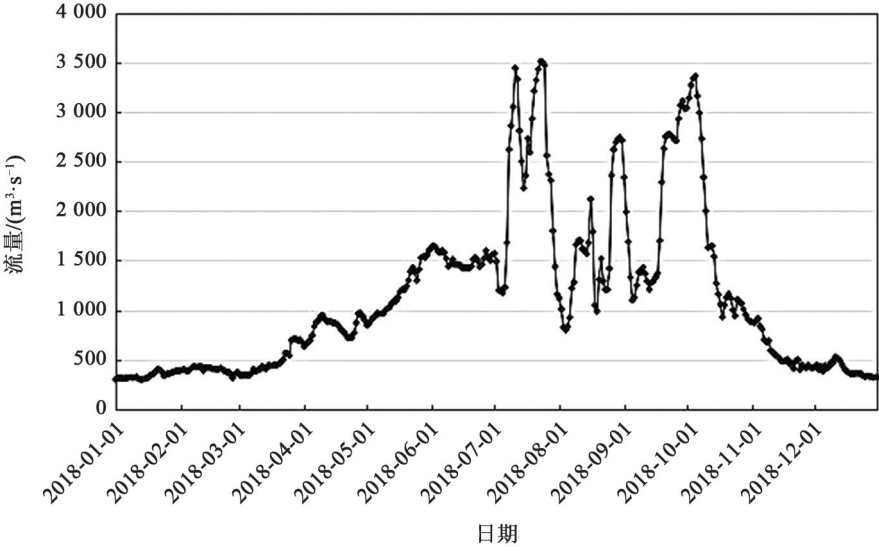


图 9 2018 年泇口水文站流量过程

Fig.9 Discharge hydrograph at the Luokou hydrological station in 2018

(2)2021 年汛期中水的影响

2021 年 9 月下旬以来,黄河山东段经历了 36 年来最大秋汛、33 年来最大洪水,泺口水文站最大流量达 5 250 m³/s。2021 年泺口水文站日均流量超过 2 000 m³/s 的天数达到了 81 d,其中,秋汛期日均流量超过 2 000 m³/s 的天数达到了 50 d。长时期的中水流量过程,使得白龙湾至兰家河段的局部河势发生了明显调整,该河段河势流路仍然靠左岸工程行走,北杜工程主溜上提,6 号垛以下靠溜,新徐工程仍然不靠河,王平口控导 8 号垛靠溜,其下主溜右移,王平口滩区滩岸及大崔险工均不再靠溜,段王至兰家河段河势相对稳定。

4.2 河床边界条件影响

4.2.1 可动边界宽度的影响

为防止右岸坍塌,固定中水河槽,配合控导工程控导主溜,修建了北杜、新徐、段王工程。北杜至段王工程之间为长约 5 500 m 的直河段,由于距离较远,泥沙在直河段淤积或来溜方向变化时极易发生河势摆动。另外,新徐工程对岸为王平口控导,王平口控导下首左右岸大堤之间均为由粉质壤土组成的可动边界(图 10),这为主溜摆动提供了空间范围。

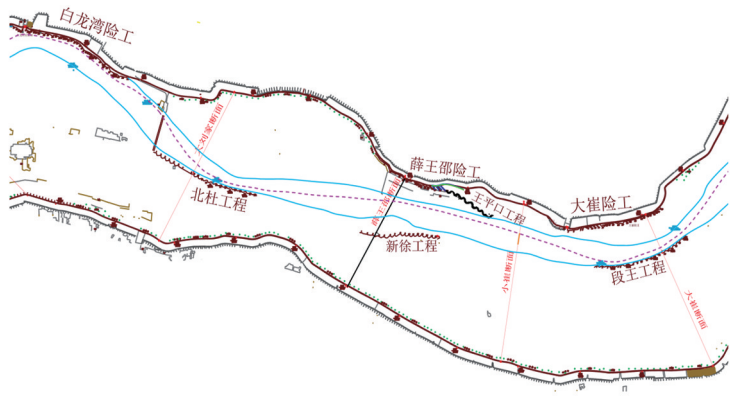


图 10 王平口工程附近左右岸可动边界

Fig.10 Movable boundaries on the left and right banks near the Wangpingkou project

4.2.2 河床及河岸组成的影响

在河流地貌动力学视角下,河岸土体抗侵蚀能力与其物质组成存在显著耦合关系,相较于粉质壤土和沙质壤土,黏土通常具有更优的抗冲刷性能。由于黏性土颗粒间存在黏结力的作用,黏性土以多颗粒成片或成团的形态起动^[5],而非黏性土颗粒间不存在黏结力的作用,非黏性土颗粒则以单颗粒形式起动,因此,黏性土的起动流速要比非黏性土大,其抗冲性也比非黏性土好。如果河岸表面黏土覆盖层很厚,就不易发生严重的局部冲刷现象,粉质和沙质壤土不仅抗冲性能差,而且崩塌的土体极易被水流分解成散粒而被水流带走。

黄河下游河岸多由砂土或粉质、沙质壤土组成,黏性土含量较少,因而河岸土体颗粒组织较为松散,抗冲能力较弱。对于由中密及稍密细沙或粉质、沙质壤土组成的河岸,不仅抗冲能力极弱,而且崩塌的土体极易分解成散粒而被水流带走;在水流冲刷能力很强和土质抗冲能力极弱的条件下,如果河岸抗冲性沿程比较均一,则河岸将以较大的崩塌速度基本上平行后退,岸线呈连续的“锯齿形”或“香蕉形”^[6]。

根据黄河下游滩岸及河道泥沙沙样物理力学性质试验成果^[7-8],河段内大刘家断面、小崔断面和齐冯断面主槽及滩面土质类别均属于粉质壤土,上述分析表明,对于由粉质壤土组成的河岸,不仅抗冲能力极弱,而且崩塌的土体极易分解成散粒而被水流带走^[9-10]。

5 治理对策研究

黄河滨州白龙湾至兰家河段治理以防御泺口 11 000 m³/s 洪水,确保大堤安全为目标。通过治理,继续完善控导工程,巩固白龙湾至兰家河段河势控制能力。

5.1 白龙湾险工下延

白龙湾险工位于黄河左岸滨州惠民县境内,对应大堤桩号(234+480)~(236+886)。工程始建于 1857 年,现状工程长 2 406 m,共有坝岸 53 段,砌护长 2 334.4 m。

2016 年以来,受来水流量偏小影响,白龙湾险工下首的滩地持续坐弯,水流经滩弯挑溜后冲向北杜工程上首,北杜工程着溜点持续上提,受北杜工程上首弯道挑溜的影响,主溜左移,致使新徐工程前左岸坍塌严重,王平口滩区坍塌长度、平均坍塌宽度、最大坍塌宽度分别为 1 400 m、54 m 和 167.5 m,多年未靠河的王平口控导工程和大崔险工靠溜出险。从该河段河势发展来看,白龙湾险工来溜方向的改变是造成王平口至大崔河段河势左移的主要原因,若不采取相应工程措施,河势有继续上提、左移的可能,滩岸持续坍塌将危及大堤安全。

因此,建议采取以下加固方案:从白龙湾险工下首 53 号垛垛头起始,沿滩岸向下游延伸新建 5 座垛体,总长度 410 m,垛体半径 15 m,垛间距 80 m,下延工程可增强白龙湾险工导流能力,避免白龙湾险工下首小水坐弯河势的发生。

5.2 王平口控导工程下延

王平口控导工程位于惠民薛王邵险工下首,滩岸起止桩号(46+800)~(47+833),工程长 1 115 m,护砌长度 674 m,坝 8 段,均为乱石结构。

该工程始建于 1952 年,因河势变化,1970 年全部脱溜,1976 年大水后淤埋在滩内,一直未再靠水、靠溜。2018 年洪水期间,该段河势左移,主溜紧靠左岸滩地,坝前滩岸坍塌严重,致使王平口控导工程重新靠水,7 号、8 号坝受大溜顶冲,在水流作用下,坦石底部河床泥沙流失,坦石根基破坏,发生坍塌险情。

因王平口控导工程较短,只有 8 段坝,无法将主溜挑离大崔险工新 1 号坝,2018 年洪水期间,大崔险工新 1 号坝、新 2 号坝、新 3 号坝相继出险,主溜距大堤最近处仅为 18 m。鉴于大崔险工上首滩岸坍塌较为严重,已危及左岸堤防安全,为控制滩岸继续坍塌,保护大堤安全,建议王平口控导工程下延 3 道垛,以保障堤防安全、进一步稳定河势。

5.3 两处工程下延与相关规划的关系

治导线是河道整治工程建设的依据,控导工程按制定好的规划治导线确定工程位置线。根据国务院批复的《黄河流域防洪规划》^[11],聊城陶城铺—东营垦利渔洼弯曲行河段控导工程布点基本完成,受地形及已建工程的限制,陶城铺以下河段不能根据河道整治原理规划出治导线,只按照现状工程实际情况及河势演变情况布置工程^[11]。白龙湾险工下延和王平口控导工程下延基于《黄河流域防洪规划》和本文主要研究成果进行规划治理,符合相关规划。

5.4 两处工程下延对应的水沙条件

根据前文的水沙变化研究成果,小浪底水库建成运用后,黄河发生大洪水的几率减少,3 000 m³/s 以上流量出现的平均频率为 2.4%。2016 年和 2017 年,黄河下游花园口站 3 000 m³/s 以下流量一年内出现的频率达到 100%。结合目前该河段平滩流量约为 4 600 m³/s,为使修建的工程最大限度地适应不同的水沙条件,选定整治流量为 4 000 m³/s,以基本同时应对长期小水和短期中水。后续详图设计阶段,根据整治流量,计算相应的工程设计主要标准。

6 结论和建议

通过分析小浪底水库运用以来河道演变、河势变化机理,提出了白龙湾至兰家河段治理对策,并得出以下结论和建议:

(1)白龙湾至兰家所在河段,由于近期水沙过程发生变化,河势发生较大变化,部分河段主溜摆动,工程靠溜出险,进而危及堤防安全。

(2)河道演变原因分析表明,主溜的走向可以影响局部河岸的冲刷,因此,主溜走向的改变是造成白龙湾至兰家所处河段河势左移的主要原因,汛期洪水则加剧了河势的摆动,黄河下游河岸土体抗冲能力较弱,可动性强。

(3)根据白龙湾至兰家河段河势演变特点及机理,白龙湾险工下延 5 道垛,可增强白龙湾险工导流能力,避免白龙湾险工下首小水坐弯河势的发生;王平口控导工程下延 3 道垛,将主溜挑向大崔险工 1 号坝,可以减少“横河”“斜河”从王平口控导工程和大崔险工上延护岸之间的空档直冲堤防,保障堤防安全。

(4)王平口控导工程与大崔险工之间的岸线呈凹向河心的形态,建议下一步将王平口控导工程下首和规划的大崔险工上延工程上首连接到一起,以消除现有的工程空档。

参考文献:

[1]秦梦春,白玉川,徐海珏,等.黄河下游游荡段畸形河势的时空分布及演变规律[J].水科学进展,2025,36(01):62-75.DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.006.

[2]胡春宏,张国罡.黄河下游河道主河槽萎缩特征及其判别参数研究[J].中国科学:技术科学,2010,40(10):1148-1158. DOI: 10.1007/s11431-010-0015-6.

[3]张春晋,张敏,姚文艺,等.黄河下游三官庙至韦滩河段主流摆动规律及其驱动机制[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(5):1110-1124. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.05.005.

[4]赵翔,李达,刘威,等.水沙变化条件下黄河下游游荡段稳定性研究[J].人民黄河,2025,47(5):34-39.

[5]杨美卿.淤泥的起动公式[J].水动力学研究与进展(A辑),1996,11(1):58-64.

[6]金腊华,石秀清,王南海.长江大堤窝崩机理与控制措施研究[J].泥沙研究,2001,26(1):38-43. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2001.01.006.

[7]张原锋,张凯文,王平,等.小浪底水库运用后黄河下游泥沙粒径变化规律[J].水科学进展,2025,36(4):680-692.DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.04.012.

[8]张红武,卜海磊.黄河下游河道整治工程直河段长度公式的确定[J].人民黄河,2013,35(1):1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2013.01.001.

[9]李永强,张波,刘欣.黄河下游河道整治工程布局直河段河长探讨[J].人民黄河,2014,36(8):28-30. DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2014.08.009.

[10]江恩惠,刘燕等,李军华,等.河道治理工程及其效用[M].郑州:黄河水利出版社,2008:219-222.

[11]水利部黄河水利委员会.黄河流域防洪规划[M].北京:黄河水利出版社,2008.

