

黄河中游小北干流河段 2000—2020 年河势演变特征

马素娟^{1,2}, 陶建峰¹, 张敏²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院)

摘要:基于黄河小北干流河段 2000—2020 年汛后遥感影像、实测断面资料和上游水沙数据,选取主流线摆动宽度、弯曲系数、汉道系数及心滩占比等为表征参数,分析了该河段的河势演变特征及主要影响因素。结果表明:主流线摆动宽度逐渐趋于稳定,多年均值为 451 m,呈现上段变化强烈、中段和下段较稳定的特征;弯曲系数多年在 1.0~1.3 之间,依旧呈现游荡性特征;汉道系数与心滩占比多年变化剧烈,心滩散乱且变化剧烈;上游来水量对河势变化有显著影响,弯曲系数和汉道系数与来水量和多年均值差值呈负相关关系;控导工程和天然节点共同作用,会束窄河道、归顺主流,从而影响河势变化。

关键词:河势演变;来水来沙条件;控导工程;黄河;小北干流

Characteristics of river regime evolution in the Xiaobeiganliu reach of the Middle Yellow River from 2000 to 2020//Ma Sujuan^{1,2}, Tao Jianfeng¹, Zhang Min² (1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC)

Abstract: Based on post-flood remote sensing images, measured cross-section data, and upstream water-sediment data from the Xiaobeiganliu reach of the Yellow River from 2000 to 2020, several characteristic parameters, including the swing width of the main channel, sinuosity coefficient, braiding coefficient, and central bar area ratio, were selected to analyze the evolution characteristics of the river regime in this reach and its main influencing factors. The results show that the swing width of the main channel gradually stabilized, with a multi-year average of 451 m, exhibiting strong variability in the upper section and relative stability in the middle and lower sections. The sinuosity coefficient ranged between 1.0 and 1.3 over the years, still reflecting the wandering nature of the channel. The braiding coefficient and central bar area ratio fluctuated markedly over time, with central bars being scattered and highly dynamic. Upstream inflow volume had a significant influence on river regime changes; both the sinuosity coefficient and braiding coefficient showed negative correlations with the inflow volume and its deviation from the multi-year average. Training works and natural control points worked together to narrow the channel, regularize the main flow, and thereby affect the river regime evolution.

Key words: river regime evolution; incoming flow and sediment regime; flow regulation structures; the Yellow River; the Xiaobeiganliu reach

黄河中游小北干流为典型的游荡型河流,这类河段主流游荡多变、滩槽水沙交换不畅、滩岸坍塌等问题十分突出^[1],呈现复杂、多变、随机和不均衡等演变特点^[2],治理难度大,影响因素复杂。其中,上下游水库的建设与运行,改变了河道的来水来沙条件,从而导致河势的趋势性冲淤变化^[3]。河势演变是河道整治工程需要关注的重要因素,对河段河势变化、冲淤规律等的分析,有助于掌握该类河段的演变规律并预测其演变趋势,从而提高整治工程的精准度和治理效果。

主流线摆动能够反映河道在水沙条件、控导工

程等因素影响下的整体变化,是河势演变的重要表征参数。多名学者从主流线变化角度,对小北干流河势变化规律及影响因素展开了分析。例如:余铨峥等^[4]分析了 1986—2001 年主流线摆动宽度及强度后发现,主槽摆动具有往复性,禹门口—庙前河段受水沙条件影响最为明显、摆动剧烈;郭秀吉等^[5]分析了 1990—2013 年汛后主流线形态和摆动宽度,发现小北干流上段对洪水期比较敏感,中段受年输沙量影响,下段则与多年来沙的累积作用有关;郭全明等^[6]分析了多年主流线变化与来水来沙的关系,发现主流在 2000 年后贴近右岸,河道处于持续冲刷

基金项目:国家自然科学基金项目(52071129,U2243220)

作者简介:马素娟(2000—),女,硕士研究生,主要从事河床演变及泥沙治理研究。E-mail:msj04070125@163.com

通信作者:陶建峰(1980—),男,教授,博士,主要从事河口海岸水沙过程与环境效应研究。E-mail:aoetao@hhu.edu.cn

阶段,水沙条件、河道冲淤、三门峡水库运行等都影响着河势变化。1986年龙羊峡和刘家峡水库实现联合调度,黄河中下游的水沙过程发生显著改变。与此同时,三门峡水库蓄清排浑,直至2000年,小北干流河段处于持续淤积阶段,河势变化剧烈。2000年后,尤其2002年后,小北干流进入缓慢冲刷期,再加上控导工程影响,其河势演变特点发生了变化。另外,在研究过程中,除了河道主流线摆动以外,河道的弯曲系数、汊道系数等参数也能反映水边线崩退淤积、河道冲淤情况,从而很好地反映河势变化规律。因此,有必要将主流线摆动与弯曲系数、汊道系数等参数相结合,分析小北干流河势演变规律及其影响因素。

本文基于2000—2020年小北干流汛后遥感影像、龙门站水沙数据、汛后主流线位置和测验断面实测数据中的河底高程等实测资料,分析了主流线摆动宽度、弯曲系数、汊道系数、心滩占比等参数变化,研究了小北干流河势演变规律及上游来水来沙条件、控导工程对河势演变的影响,以期为黄河小北干流河段河道治理提供参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

小北干流位于黄河中游禹门口至潼关河段(图1),由禹门口处不足百米的峡谷扩宽为数公里,呈南偏西20°方向流至潼关^[7],平面形态上两端宽、中间窄,呈哑铃状,沿程有汾河、洛河及最大支流渭河汇入。根据河道特性及地形特点,可将其分为3段:上段为禹门口(CS68断面)至庙前(CS61断

面),该段入口处有较大的滞沙区,尾部有支流汾河汇入,河势变化较大,冲淤变化剧烈;中段为庙前(CS61断面)至夹马口(CS54断面),该段河势受两岸基岩控制,河宽较窄、河床抗冲力强;下段为夹马口(CS54断面)至潼关(CS41断面),渭河、洛河在此段汇入,形成汇流区,河势变化剧烈,具有很强的滞洪滞沙作用^[1]。

1960年,小北干流下游113.5 km处修建了三门峡水库。1973年以来,三门峡水库采用蓄清排浑的运行方式,小北干流经历了冲淤平衡期(1974—1985年);1986年后,上游水库联合控制进入小北干流的水沙条件,水沙搭配较差,小北干流进入持续淤积期(1986—2002年);2003年三门峡水库采用“原型”试验,小北干流进入缓慢冲刷期(2003—2011年)^[7]。2000—2020年来水来沙量显著减小,且来沙量减小幅度大于来水量,年均来沙量为1.6亿t,年均来水量为207亿m³,分别减小了46%、42%,对河势变化产生了重要影响。为稳定河势,2000年以来,小北干流沿岸修建了多处控导工程,如清涧湾下延工程、南榭工程、牛毛湾等^[6],这些控导工程在归顺主流、束窄河道、稳定河势上发挥了重要的作用。

1.2 数据来源

选取2000—2020年汛后小北干流河段Landsat7、Landsat8系列卫星遥感资料,为提高影像中地物的清晰度,选取影像时限定云量不超过10%。

主流线实测数据采用2000—2020年陕西河务局、山西河务局汛后河势查勘报告中1:50000河势图,并从中提取2000—2020年小北干流断面河底高程数据,用于计算主流线摆动宽度、分析心滩变化和工程对河势变化的影响等内容。

小北干流水沙控制站分别有入口处的干流龙门水文站、支流汾河河津水文站和出口处的潼关水文站。据历年水沙数据统计结果,河津站多年平均来水量和来沙量分别为龙门站的2%和3%^[8],因此不计入汾河的来水来沙量,小北干流河段的上游来水来沙条件近似用龙门站的水沙条件表示。2000—2020年龙门站水沙数据来源于黄河泥沙公报(<http://www.yrcc.gov.cn/>)和中国河流泥沙公报。

2 研究方法

2.1 遥感影像处理

遥感影像经预处理后,采用ArcGIS软件提取河道水边线、心滩等水体信息。这些信息的提取方法通常有水体指数法^[9-11]和手绘提取法^[2,12-13]。由于

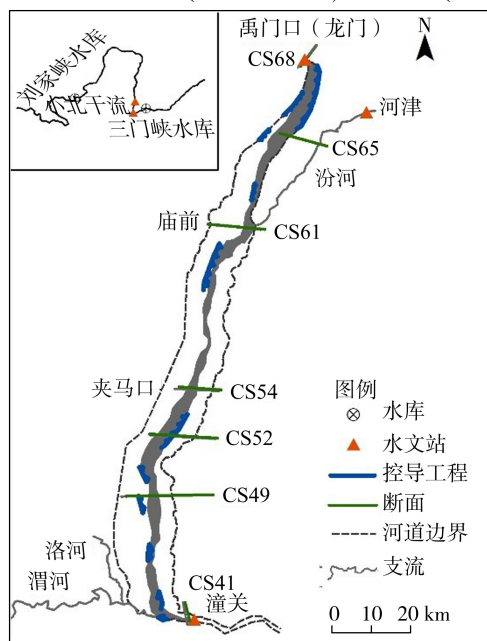


图1 黄河小北干流典型断面示意图

小北干流的水边线、心滩等水体信息容易用肉眼辨识,因此结合河道空间分布和地貌特点,采用手绘方式勾画每年河道水边线及心滩(图2)。

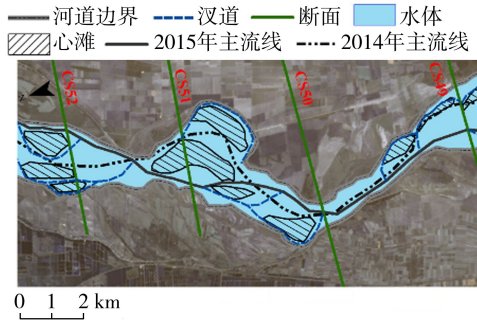


图2 2015年汛后遥感影像提取结果

2.2 河势表征参数计算方法

2.2.1 主流线摆动宽度

主流线是河道中各断面水流流速最大点的连线,其摆动宽度 ΔS 可由当年与前一年主流线起点距差值的绝对值表示:

$$\Delta S = |S_1 - S_2| \quad (1)$$

式中: S_1 为某一断面前一年主流线距起点的距离; S_2 为相同断面当年主流线距起点的距离。

由于小北干流相邻两个断面间距不等,因此计算河段平均的主流线摆动宽度时,首先确定每年的主槽范围及主流线位置,然后计算每年各断面的摆动宽度,最后采用Xia等^[14]提出的基于对数转换的几何平均与断面间距加权平均相结合的方法,每一河段的主流线摆动宽度为:

$$\Delta \bar{S} = \exp \left[\frac{1}{2\Delta x_i} \sum_{i=1}^{N-1} (\ln |\Delta S_{i+1}| + \ln |\Delta S_i|) \Delta x_i \right] \quad (2)$$

式中: $\Delta \bar{S}$ 为加权平均的主流线摆动宽度; N 为断面个数; ΔS_{i+1} 、 ΔS_i 分别为 $i+1$ 、 i 断面的主流线摆动宽度; Δx_i 为 $i+1$ 断面与 i 断面之间的距离。

2.2.2 弯曲系数

弯曲系数 P 是描述河道弯曲程度的参数,为真实的河段长度与河段两端直线距离的比值:

$$P = (l_1 + l_2) / 2L \quad (3)$$

式中: L 为两个断面间河段的直线距离; l_1 为河段左岸边界实际长度; l_2 为河段右岸边界实际长度。

2.2.3 汉道系数

汉道系数 P_T 反映了河道分汉程度,为汉道长度 L_B 与主流线长度 L_M 的比值:

$$P_T = \sum L_B / \sum L_M \quad (4)$$

2.2.4 心滩占比

心滩占比 w 反映河道冲淤程度,为心滩总面积 A 与水体面积 A_s 的比值:

3 结果与分析

3.1 主流线摆动宽度变化特征

图3为由式(1)和(2)计算得到的小北干流河段和3个分河段的主流线摆动宽度情况。如图3所示,小北干流河段的主流线摆动宽度范围为200~910 m,多年均值为451 m,其中2008—2009年主流线摆动宽度最大。2008年以前,摆动宽度大多维持在多年均值以下,2007年以后逐年增加,2009年摆动宽度达到最大值904 m,随后2010—2020年摆动宽度变化逐渐趋于稳定。

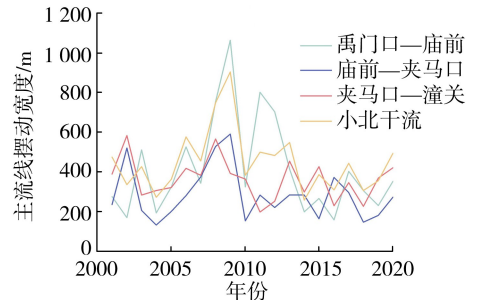


图3 2000—2020年小北干流和分河段主流线摆动宽度变化

从3个分河段的主流线摆动宽度结果来看,整个小北干流河段主流线摆动宽度变化呈上段大、中段和下段小的特点。其中,禹门口—庙前、庙前—夹马口和夹马口—潼关河段主流线最大摆动宽度分别为1063、590、583 m,多年平均摆动宽度分别为434、315、355 m,尤其需要注意的是,2007—2014年间,禹门口—庙前河段主流线摆动最为强烈,最大值与最小值差值达863 m,庙前—夹马口、夹马口—潼关河段变化相对较稳定。

3.2 弯曲系数变化特征

图4为小北干流和分河段弯曲系数变化。由图4可知,小北干流河段弯曲系数在1.0~1.3之间变化,2003年和2013年达到附近年份的峰值,分别为1.28和1.31,2017—2020年降至1.1左右。

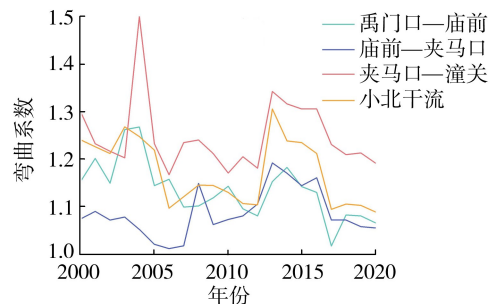


图4 2000—2020年小北干流和分河段弯曲系数变化

从3个分河段弯曲系数变化可知,夹马口—潼

关河段弯曲系数变化较大,2004 年出现异常值,达到了 1.5,由于支流来水量较大且持续时间长,河道边界冲刷崩退严重。庙前一夹马口河段两侧山地抗冲能力较强,河道边界变化小,该河段弯曲系数变化较平缓,一直为 1.1 左右。弯曲系数下段变化较大,上段次之,中段较小。

3.3 心滩变化特征

小北干流心滩繁杂(图 5),对来水量敏感性较高,多处心滩变化存在时间极短,但也存在周期较长的心滩,一般分布于小北干流入口处和支流汇入口上游位置。

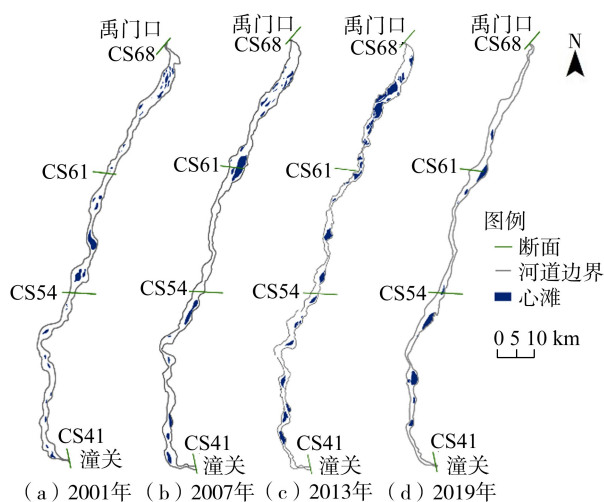


图 5 不同年份心滩分布

如图 5(b)~(d) 所示,禹门口—庙前河段入口处左岸存在繁乱且巨大的心滩,几乎常年存在,面积达 30 万 m^2 左右,庙前断面附近多年存在小心滩,但不稳定,存在时间极短。庙前一夹马口河段心滩集中在河段中部,部分心滩存在时间较长,位置不变但心滩面积不断增大,最终与岸滩贴合,形成边滩。夹马口—潼关河段心滩分布散乱,位置及大小不稳定,2013 年附近年份,多个小心滩合并成较大心滩。尤其在渭河汇入口上游,存在多个小心滩或合并为单个大心滩,形状面积变化频繁,最大能达到 16 万 m^2 ,呈长条状分布。

3.4 汉道系数和心滩占比变化特征

图 6 为小北干流和分河段汉道系数和心滩占比变化。由图 6 可知,汉道系数变化规律与心滩占比相似,心滩增加,汉道增加,汉道系数增大,反之则汉道系数减小。小北干流整个河段心滩占比处于 6.1%~25% 之间,汉道系数处于 0.4~1.3 之间,差值较大,参数变化剧烈。2013 年前,汉道系数处于 0.4~0.8 之间,差值较小,从 2013 年开始,心滩面积逐年增多,心滩占比两次达到峰值,均为 25%,汉道系数同样呈上升趋势,在 2015 年达到最大值 1.3,

随后逐年减小且小于多年均值 0.6。3 个分河段汉道系数和心滩占比变化与整体变化相似,都在 2015 年附近几年变化剧烈,其余年份变化相对平缓。上段心滩占比变化较小,多年处于 10% 附近,由于入口处心滩变化剧烈,使得汉道系数变化较大,其中 2013 年达到最大值 1.5,随后逐年减小,最小值趋近于 0;中段心滩占比自 2013 年呈现增长趋势,在 2015 年达到 28%。汉道系数同样在 2013—2015 年变化剧烈,2015 年达到峰值 1.3;下段心滩占比和汉道系数变化剧烈,多年达到峰值,心滩占比最大值为 30%,为最小值的 3 倍多,汉道系数在 2010 年和 2015 年达到峰值 1.5。

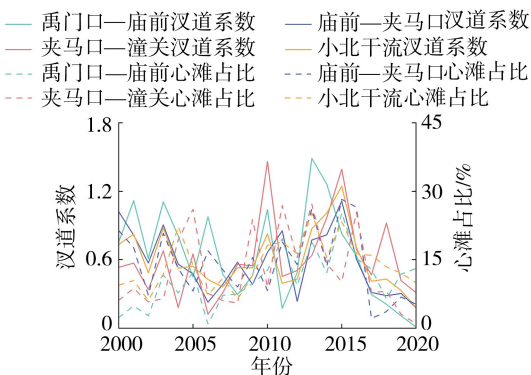


图 6 2000—2020 年汉道系数和心滩占比变化

3.5 河势变化的原因分析

3.5.1 来水来沙条件对河势的影响

20 世纪 60 年代以前,水沙变化主要由于气候因素,而 1960 年以后,气候和人类活动共同影响了进入小北干流的水沙^[15]。自 1960 年三门峡水库建立以来,小北干流来水来沙量呈显著下降趋势。图 7 为 1980—2020 年龙门站进入小北干流河段的来水来沙量变化过程。从图 7 可以看出,由于上游水库的联合调度以及三门峡水库的蓄清排浑运行方式,截至 2000 年,来水量较前 20 年均值减少了 42%,来沙量减少了 46%,但因为来水来沙搭配不均衡,小北干流在 1986—2002 年一直处于持续淤积期。余铨峥等^[4]研究表明,小北干流在 1986—2002 年内主流线摆动宽度最大值为 1 144 m,2001 年摆动宽度最小,为 597 m,禹门口—庙前河段主流线摆

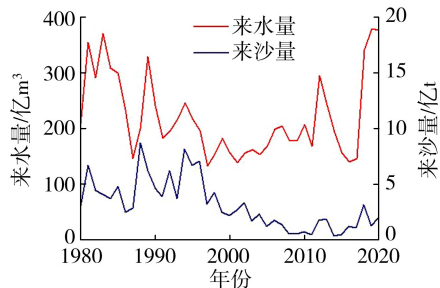


图 7 1980—2020 年小北干流来水量与来沙量

动宽度最大,多年均值为 1 151 m,整个小北干流主流线摆动宽度呈上段大、中段和下段小的特点。

2003 年后,由于三门峡水库原型实验、上游水库的使用,小北干流来水来沙量进一步减少,但来沙量减少量大大超过了来水量减少量,河道出现了“枯水枯沙”新特征,逐渐变为缓慢冲刷状态^[7,16-17]。2000 年以后,多年主流线摆动幅度最大值只有 904 m,多年均值为 451 m,禹门口—庙前河段多年摆动宽度依旧是最大,多年均值为 434 m,较 2000 年以前数值均有所下降,整个小北干流主流线摆动宽度仍然呈上段大、中段和下段小的特点。总的来说,水库的修建大幅度减少了小北干流上游的来水来沙量,在束窄主流线摆动宽度上有一定作用。

在 2000—2020 年间,2018—2020 年为丰水年,来水量相较其他年份多 1.5~2.0 倍,大水归顺河道,水流动力增加,增强了挟沙能力,弯曲系数为 1.1 左右,心滩减少,汉道系数降至 0.4 左右,直至 2020 年呈逐年降低趋势。2012—2013 年为丰水丰沙年,来沙量超过多年均值 2 倍,而来水量仅超过 0.5 倍,即来沙量变化远超过来水量变化,水流挟沙能力不足,泥沙易落淤。2014—2016 年来水量减少,且小于多年均值,河道淤积更加严重,弯曲系数在 2013 年增加到 1.3,到 2016 年连续多年处于 1.2~1.3 之间。2012 年开始,心滩不断增多,到 2015 年心滩面积达到最大值,汉道系数也在 2012 年起呈上升趋势,到 2015 年达到 1.3,为多年最大值。综上所述,水沙变化大大影响了河势变化,在来沙量变化幅度较小的情况下,弯曲系数、汉道系数和心滩占比呈现小水增大、大水减小的规律,而在来沙量变化幅度远大于来水量变化时,以上表征参数则受年来沙量影响较大。

为研究水沙变化与表征参数的关系,将弯曲系数 P 和汉道系数 P_T 与来水量和多年均值(2000—2020 年)的差值 ΔQ (亿 m^3) 的关系用线性函数拟合(图 8)。在建立相关关系过程中,由于某些年份为丰水丰沙年或枯水丰沙年,水沙搭配较差,河道淤积严重,河弯和汉道显著增多。另外在丰水年份,泥沙粒径发生任意改变^[18],都使河道发生大规模冲淤变化,修建控导工程能够归顺河道,使弯曲系数发生非规律性变化,汉道系数和弯曲系数产生突变,此类数据在建立相关函数时,会削弱水沙变化与表征参数的相关性,所以在进行拟合时将此类数据去除。最终得出弯曲系数、汉道系数与来水量和多年均值差值呈线性相关,相关系数 R 分别为 0.87、0.84。由图 8 可以得出,来水量为弯曲系数和汉道系数变化的主导因素,来水量相较于多年均值越大,弯曲系

数、汉道系数越小;来水量相较于多年均值越小,弯曲系数、汉道系数越大。

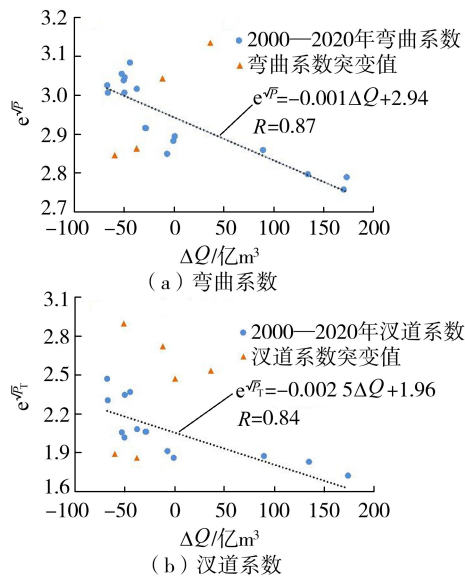
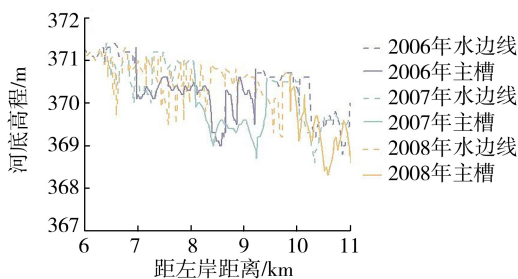


图 8 弯曲系数、汉道系数与来水量和多年均值差值的相关关系

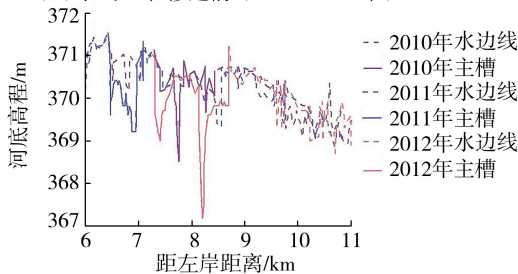
3.5.2 控导工程对河势的影响

2000 年之前,小北干流最初为自然河道,主要靠天然节点控制,主流线摆动频繁,河道变化剧烈^[5]。为稳定河势,20 世纪 70—80 年代陆续在小北干流两岸修建了清润湾、下峪口、庙前、牛毛湾等控导工程,对控制河势起到了一定作用,但主流线分散,摆动幅度较大^[6]。2000 年之后,为归顺入口主流,限制中游主流摆动,上段左岸修建清润湾调弯工程,右岸修建南榭工程,再加上大石嘴、庙前等天然节点对河势的控制,最终小北干流整体主流线摆动宽度多年均值减少了 0.04 km 左右^[4],弯曲系数逐渐稳定在 1.1 左右。控导工程调整河势作用不断增强,在束窄主槽、控制主流线摆动上起着重要作用。

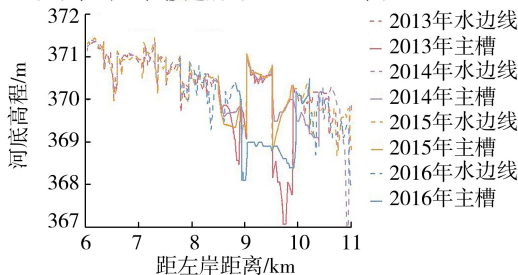
以 2009 年小北干流 CS65 断面右岸修建的控导工程为例,如图 9(a)所示,控导工程修建以前,主流线左右摆动幅度较大,摆动宽度为 2 km 左右,且河道以冲刷右岸为主,左岸淤积严重。控导工程修建结束后,如图 9(b)所示,主流线处于调整状态,摆动仍旧剧烈,在保持右岸冲刷的同时,主流线在 2010 年、2011 年向左岸偏移,2012 年向河道中间移动,一直到 2016 年(图 9(c))主流线位置稳定在距左岸距离 9~10 km 范围内,摆动幅度减小。无论是 2012—2013 年丰水年,还是 2015—2016 年枯水年,主流线位置没有较大的变动,丰水年河道明显冲刷下切,河底高程降低 1 m 左右。总的来说,控导工程从修建到发挥作用要经历一定的过程,最终在控制主流、束窄河道、调整河势中起到了重要作用,同时削弱了水沙变化对主流线摆动的影响。



(a) 控导工程修建前 (2006—2008年)



(b) 控导工程修建后 (2010—2012年)



(c) 控导工程修建后 (2013—2016年)

图9 CS65断面控导工程修建前、后主槽位置变化

4 结论

a. 小北干流弯曲系数多年处于1.0~1.3之间,河道形态多年呈弯曲型特征;心滩占比和汉道系数多年变化剧烈,水流散乱,心滩繁杂,汉道系数随心滩占比的变化而变化。

b. 水沙变化是影响河势变化的主要因素。其中来水量为河势变化的主导因子,弯曲系数和汉道系数与来水量和多年均值差值之间呈负相关关系。

c. 小北干流两岸控导工程修建,加上庙前、大石嘴等天然节点共同作用,主流线摆动宽度多年均值减小,主槽位置趋于稳定,控导工程在归顺主流、束窄河道、调整河势上起着重要作用,削弱了水沙变化对主流线摆动的影响。

参考文献:

[1] 刘杨,王建利,杨航.新时期黄河小北干流河道整治方法研究[J].人民黄河,2021,43(9):64-69. (Liu Yang, Wang Jianli, Yang Hang. Study on river regulation methods of Xiaobeiganliu reach of the Yellow River in the new era [J]. Yellow River, 2021, 43(9): 64-69. (in Chinese))

[2] 江恩惠,曹常胜,曹永涛,等.黄河下游游荡型河段河势演变规律[J].人民黄河,2009,31(5):26-27. (Jiang

Enhui, Cao Changsheng, Cao Yongtao, et al. Law governing changes in wandering plane-form of the lower Yellow River [J]. Yellow River, 2009, 31(5): 26-27. (in Chinese))

[3] 高璐,徐向舟,张红武.持续冲刷期内黄河下游河床演变特点分析[J].水利水电科技进展,2024,44(3):73-79. (Gao Lu, Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu. Characteristics of channel adjustment in Lower Yellow River during continuously scouring period [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 73-79. (in Chinese))

[4] 余铖峥,夏军强,周美蓉,等.黄河中游小北干流段持续淤积期的主槽摆动特点[J].湖泊科学,2021,33(3):893-904. (Yu Chengzheng, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Characteristics of main-channel migration in the Xiaobeiganliu reach of the middle Yellow River during the continuous siltation period [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 893-904. (in Chinese))

[5] 郭秀吉,侯素珍,王平.黄河小北干流主流线变化与来水来沙的关系[J].中国农村水利水电,2018(11):98-102. (Guo Xiuji, Hou Suzhen, Wang Ping. The relationship between changes of the main streamline and flow and sediment regime in Xiaobeiganliu reach of Yellow River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(11): 98-102. (in Chinese))

[6] 郭全明,张亚丽,贾玉芳,等.黄河小北干流河势变化分析及治理措施[J].人民黄河,2012,34(10):21-22. (Guo Quanming, Zhang Yali, Jia Yufang, et al. Analysis of river regime changes of Xiaobeiganliu of the Yellow River and its harnessing measures [J]. Yellow River, 2012, 34(10): 21-22. (in Chinese))

[7] 侯素珍,王平,吕秀环.黄河小北干流近期河床演变成因分析[J].人民黄河,2008,30(11):22-23. (Hou Suzhen, Wang Ping, Lyu Xiuhuan. Analysis of the causes of recent riverbed evolution in the Xiaobeiganliu reach of the Yellow River [J]. Yellow River, 2008, 30(11): 22-23. (in Chinese))

[8] 李洁,夏军强,朱呈浩.黄河小北干流河段持续淤积期深泓摆动特点及影响因素[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(4):883-892. (Li Jie, Xia Junqiang, Zhu Chenghao. Characteristics and influencing factors of thalweg migration in the Xiaobeiganliu reach of the Yellow River during the period of continuous channel aggradation [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(4): 883-892. (in Chinese))

[9] Liu Yanhui, Wang Yuanjian, Jiang Enhui. Stability index for the planview morphology of alluvial rivers and a case study of the Lower Yellow River [J]. Geomorphology, 2021, 389: 107853.

[10] 张向,李军华,江恩惠,等.基于遥感的黄河下游九堡至大张庄河段河势演变分析[J].人民黄河,2022,44(2):55-57. (Zhang Xiang, Li Junhua, Jiang Enhui, et al.

- Analysis of river regime evolution in Jiubao-Dazhangzhuang reach of the lower Yellow River based on remote sensing [J]. *Yellow River*, 2022, 44 (2): 55-57. (in Chinese))
- [11] 窦明, 乔若辉, 郑钊, 等. 基于遥感影像的黄河下游游荡型河段主槽演变特征研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2023 (6): 120-127. (Dou Ming, Qiao Ruohui, Zheng Zhao, et al. Research on the evolution characteristics of the main channel in the Lower Reaches of the Yellow River based on remote sensing images [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(6):120-127. (in Chinese))
- [12] 裴亮, 潘丽. 基于 Landsat 8 卫星 OLI 影像的合肥市水体信息提取方法研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(9):143-146. (Pei Liang, Pan Li. Study on the method of extracting water information in Hefei based on Landsat 8 satellite OLI image [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(9):143-146. (in Chinese))
- [13] 夏军强, 程亦菲, 周美蓉, 等. 黄河下游游荡段河势演变及模拟技术 [J]. *中国水利*, 2023 (20): 20-25. (Xia Junqiang, Cheng Yifei, Zhou Meirong, et al. River regime evolution and simulation technique in wandering section of the lower Yellow River [J]. *China Water Resources*, 2023 (20):20-25. (in Chinese))
- [14] Xia Junqiang, Li Xiaojuan, Li Tao, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River [J]. *Geomorphology*, 2014, 213:255-265.
- [15] 姚文艺, 高亚军, 安催花, 等. 百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 112-120. (Yao Wenyi, Gao Yajun, An Cuihua, et al. Analysis of trend of runoff and sediment load in upper and middle reaches of Yellow River at century scale [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5):112-120. (in Chinese))
- [16] 高宗军, 冯国平. 黄河水沙变化趋势及成因分析 [J]. *地下水*, 2020, 42 (1): 147-151. (Gao Zongjun, Feng Guoping. Analysis on the trend and cause of water and sediment in the Yellow River [J]. *Ground Water*, 2020, 42 (1):147-151. (in Chinese))
- [17] 林秀芝, 董晨燕, 苏林山, 等. 黄河小北干流冲淤与水沙响应关系分析 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(5): 5-8. (Lin Xiuzhi, Dong Chenyan, Su Linshan, et al. Analysis of the relationship between scouring and silting and response of water and sediment in Xiaobeiganliu Reach of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2019, 41(5): 5-8. (in Chinese))
- [18] 余倩, 安瑞冬, 李嘉, 等. 辫状河流形态形成及演变机制分析 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(6): 40-43. (Yu Qian, An Ruidong, Li Jia, et al. Analysis of formation and evolution mechanism of braided river [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(6):40-43. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-16 编辑:俞云利)

(上接第 10 页)

- [26] 尚敏, 廖芬, 马锐, 等. 白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性定量分析研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29 (3): 742-750. (Shang Min, Liao Fen, Ma Rui, et al. Quantitative correlation analysis on deformation of Baijiabao landslide between rainfall and reservoir water level [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29 (3): 742-750. (in Chinese))
- [27] 王红艳, 张法星, 刘昶. 燕尾坎挑流消能噪声的影响因素分析 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(8): 80-83. (Wang Hongyan, Zhang Faxing, Liu Chang. Analysis of influencing factors of ski-jump energy dissipation noise with dovetail camp [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(8):80-83. (in Chinese))
- [28] 胡志华. 消力池水流噪声产生机理及影响因素研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- [29] 薛万云, 杨家修, 杜群祥, 等. 基于 CFD 的挑流泄洪雾化特性研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 16-20. (Xue Wanyun, Yang Jiaxiu, Du Shuaiqun, et al. Study on characteristics of flood discharge atomization of ski-jump jet based on CFD [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(4):16-20. (in Chinese))
- [30] Zhang Xiaosong, Wang Jianhua, Wan Decheng. An improved multi-scale two phase method for bubbly flows [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 133: 103460.
- [31] 于连杰, 赵伟文, 万德成. 含水气界面水动力噪声计算方法研究与应用进展综述 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17 (5): 85-102. (Yu Lianjie, Zhao Weiwen, Wan Decheng. Research progress and application of computational method for hydrodynamic noise from air-water interface [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 85-102. (in Chinese))
- [32] Wang Zhaoyuan, Yang Jianming, Stern F. High-fidelity simulations of bubble, droplet and spray formation in breaking waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 792:307-327.
- [33] 张袁宁, 刘刚, 童富果. 基于水气两相流的泄洪雾化机理及规律研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 2020, 35 (4): 515-525. (Zhang Yuanning, Liu Gang, Tong Fuguo. Mechanism and change law of water-air two-phase flood discharge atomization [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(4): 515-525. (in Chinese))
- [34] Song J H, Johansen K, Prentice P. An analysis of the acoustic cavitation noise spectrum: the role of periodic shock waves [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 140(4): 2494-2505.

(收稿日期:2024-12-28 编辑:雷燕)