

文章编号:1005-0930(2023)05-1110-015 中图分类号:TV147 文献标识码:A  
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.05.005

# 黄河下游三官庙至韦滩河段主流摆动规律及其驱动机制

张春晋<sup>1,2,3</sup>, 张敏<sup>2</sup>, 姚文艺<sup>2</sup>, 李勇<sup>2</sup>, 马东方<sup>2</sup>

(1.中国水利水电科学研究院,水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室,北京 100048;2.黄河水利科学研究院,水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室,河南 郑州 450003;3.河海大学,水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

**摘要:**随着三门峡、小浪底、陆浑、故县以及河口村等骨干水库群的联合调度运用,黄河下游的水沙过程发生了显著的改变.近年来,特殊的水沙条件引起黄河下游三官庙至韦滩河段的河势发生改变,造成了滩地大量坍塌,并且危及到两岸村庄与堤防安全.为了明确三官庙至韦滩河段的主流摆动规律及其驱动机制,采用资料分析与理论研究,阐述了三官庙至韦滩河段的河道与工程概况,分析了该河段水沙过程与河道冲淤变化特征.同时,根据不同时期该河段的河势调整特点及其与水沙过程之间的响应关系,预估了不同流量过程条件下的河势演变趋势.研究表明,从短期来看,长历时大水冲刷形成的河槽较为稳定,加之河道整治工程的不断完善,河势将按照治导线行走的概率增大.但是从长期来看,随着骨干水库群的投入使用与工农业用水量的增长,黄河下游持续小水的可能性将偏大,主流则会在河道内摆动.

**关键词:**畸形河势;水沙变化;冲淤特性;河势调整;主流摆动;治导线

黄河下游三官庙至韦滩河段位于花园口至夹河滩河段,属于典型的游荡性河道,其上距花园口水文站约50km,下距夹河滩水文站约40km.该河段河床宽浅,主流摆动频繁,极易形成横河与斜河等畸形河势,造成滩地坍塌,甚至危及村庄与堤防的安全<sup>[1]</sup>.1988年治理以来,三官庙至韦滩河段一直是游荡性河道治理中河势最不理想,并且与规划治导线吻合程度最差的河段之一.2012年以前,九堡、三官庙及韦滩等控导工程的靠河程度均不好,河势与规划治导线几乎相反,并且畸形河势不断地发展.2013~2017年,九堡和三官庙控导工程靠河程度明显得到改善,送溜效果提升,但是三官庙控导工程的整体制导效果还不是很好,主流在三官庙控导工程附近形成“S”型的畸形河湾,随后在黑石控导工程的下

收稿日期:2022-08-24;修订日期:2023-01-05

**基金项目:**水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室开放基金项目(IWHR-SEDI-2022-07);黄科院发展基金项目(黄科发-202006);河南省青年科学基金项目(212300410201);河南省面上科学基金项目(212300410373);黄河水科学研究联合基金项目(U2243220);国家自然科学基金项目(52009047)

**作者简介:**张春晋(1989—),男,博士,高级工程师.E-mail:zhangchunjintyut@163.com

**通信作者:**张敏(1979—),女,博士,正高级工程师.E-mail:zmiii@163.com

首进入下游.2018年以后,黄河下游连续遭遇大流量过程,尤其是2020年调水调沙期间花园口水文站达到1996年以来最大的洪峰流量 $5\,520\text{m}^3/\text{s}$ ,特殊的水沙条件致使韦滩控导工程靠河长度增长,该时期主流虽然在韦滩控导工程下首形成了向北的横流,但是基本按照治导线的流路方向行河.

近年来,随着三门峡、小浪底、陆浑、故县及河口村等骨干水库群的联合运用,不仅对黄河下游的洪峰流量大幅削减,还对三官庙至韦滩河段的局部河势演变产生了较大的影响.2011年汛前,三官庙控导工程滩地阻水导流,使得主流在韦滩控导工程上首发生坍塌坐弯,形成“ $\Omega$ ”型的畸形河湾,随后该河湾处于缓变阶段.直至2018年,同岸相邻的两个弯道间距缩短,凹岸弯顶坍塌后退,使得主流持续在韦滩控导工程下首坐弯.河势的持续演变将引起滩地坍塌,进而严重威胁着滩区人民的生命财产安全.2018~2020年持续大水,使得三官庙至韦滩河段的河势演变趋势远超预期.鉴于黄河下游三官庙至韦滩河段河势演变的复杂性与危害性,探究该河段的河势调整特点具有重要的意义.

20世纪90年代以来,黄河下游的水沙条件发生较大的改变,游荡性河道的工程靠河部位“上提下挫”现象十分明显,其中“上提”使得工程上首塌滩严重或超出工程控制范围,而“下挫”则影响工程的控导效果<sup>[2]</sup>.为此,专家学者对黄河下游游荡性河势的调整规律开展了大量的研究.钱宁等<sup>[3]</sup>研究了黄河下游游荡性河段河势演变特点及控制河势的节点类型.毕慈芬<sup>[4]</sup>探讨了黄河下游游荡性河道形态塑造与水沙条件的胁迫关系.张瑞瑾<sup>[5]</sup>基于滩区边界条件阐述了游荡性河道的河势演变趋势,提出了高含沙水流对河床突变的影响.陆中臣等<sup>[6]</sup>研究了小浪底水库清水下泄阶段黄河下游主流摆幅、主槽宽度及弯曲系数等平面特征.端木礼明<sup>[7]</sup>探索了小浪底水库运用前后黄河下游的河势演变特点.吴保生等<sup>[8]</sup>研究了水库与整治工程对白鹤镇至高村游荡性河道的河势演变机理.曹文洪<sup>[9]</sup>从河道冲淤、河床形态及河势等方面探讨了河床形态与水沙过程的互馈机制.徐国宾等<sup>[10]</sup>探究了水库调水调沙对黄河下游河势调整的影响.姚文艺和王卫东<sup>[11]</sup>依据典型河势观测资料,统计了河道主流参数的内在规律.江恩惠等<sup>[12]</sup>分析了人为干预条件下游荡性河道的演变趋势.牛玉国等<sup>[13]</sup>分析了黄河下游畸形河势的特征、形成机理、主要危害及治理对策.刘燕等<sup>[14]</sup>提出了游荡性河道整治工程布设的基本原则,探讨了工程续建前后对河势调整的影响.谢鉴衡<sup>[15]</sup>采用频率直方图探究了主流摆动方向与迁移幅度.王卫红等<sup>[16]</sup>探究了小浪底水库拦沙运用后期黄河下游游荡性河道的河势调整特点.假冬冬等<sup>[17]</sup>探究了不同水沙过程及岸滩抗冲性条件下的河势演变特征.张林忠等<sup>[2]</sup>基于裁弯比、入流角度及水沙条件等指标,提出了畸形河势的整治对策.王英珍等<sup>[18]</sup>明确了整治工程、河床边界及来水来沙对主槽摆动强度的影响.李勇等<sup>[19]</sup>分析了铁谢至高村游荡性河段的河宽与河势的时空调整过程.江青蓉等<sup>[20]</sup>阐述了黄河下游游荡性河段畸形河湾的形态参数.刘慰等<sup>[21]</sup>基于长系列花园口汛前断面实测资料,分析了黄河下游河道断面形态参数变化特征.胡一三等<sup>[22]</sup>探讨了游荡性河道主流摆动特性及整治工程与畸形河势的响应关系.许琳娟等<sup>[23]</sup>利用Mann-Kendall趋势统计法,探究了1960~2015年黄河下游游荡性河道主流的迁移摆动速率.上述研究成果明确了黄河下游典型时期游荡性河道的河势调整特征及其与水沙过程之间的响应关系.本文的创新点是通过分析水沙变化特征及小浪底水库运用前后三官庙至韦滩河段河势演变特点,明确了年均水量和年均含沙量等水沙因素对河

道主流线变化特征的影响,并结合未来水量的丰沛情况,预测了该河段的河势演变趋势。

## 1 研究区域概况

### 1.1 河道概况

黄河下游三官庙至韦滩河段位于花园口至夹河滩河段,是黄河下游较难整治的河段之一,该河段左岸为新乡原阳县,而右岸为郑州中牟县,堤距宽度为 5~15km,河道纵比降 0.0203%,属典型的游荡性河道<sup>[1]</sup>.该河段河道形态具有以下特点:(1)河槽淤积严重,槽高滩低,呈“二级悬河”之势,堤防临背悬差约 5m;(2)河床宽浅,水流散乱,畸形河势频发,主流摆动不定;(3)洪水预见期短,突发性强;(4)险工堤段较长,约占堤防长度的 70%,遇大洪水将全线吃紧,防守任务艰巨。

黄河下游三官庙至韦滩河段位于河南中北部,地势平缓倾斜,属于冲积性平原地貌.该区域洼地、高地、河漫滩地及背河洼地等地形地貌广泛分布,是黄河下游改道泛滥最为频繁的河段之一.该河段年均气温 14.5℃,年均降水 627mm,年均无霜期 221d,降水主要集中在 7~8 月.夏季雨量较大,温暖湿润,冬季蒸发偏大,寒冷干燥,属于温带季风气候.由于该河段滩地高差小,地势平坦,适合种植小麦与玉米等作物.地层岩性上部为第四系全新统冲积层,岩性以粉土与粉质黏土为主,下部为第四系上更新统冲积层,岩性以粉质黏土与细砂为主。

### 1.2 工程概况

黄河下游三官庙至韦滩河段河道工程如图 1 所示。

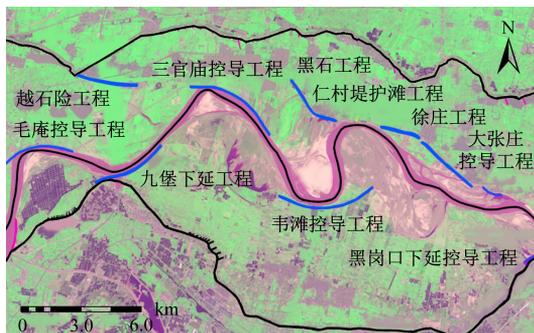


图 1 三官庙至韦滩河段河道工程

Fig.1 Sanguanmiao-Weitan reach river project

**1.2.1 堤防工程** 黄河下游三官庙至韦滩河段设防标准按花园口站防御 22 000m<sup>3</sup>/s 洪水标准设防,两岸现状堤顶高程满足 2000 年设防标准,堤顶宽度为 12m,临、背河边坡为 1:3。

**1.2.2 整治工程** 黄河下游三官庙至韦滩河段整治工程涉及控导、险工及护滩等.控导包括三官庙、韦滩、大张庄、黑岗口上延及黑岗口下延等工程.护滩包括九堡下延、黑石、仁村堤、徐庄及三教堂等工程.险工包括九堡及黑岗口等

工程.黑岗口上延、三官庙及韦滩等控导工程分别始建于 1995 年、1999 年和 2000 年,其余工程均始建于 20 世纪 60 年代.三官庙控导工程位于黄河左岸,大堤桩号 135+000~139+700.韦滩控导工程位于黄河右岸,大堤桩号 55+050~56+550<sup>[1]</sup>.

**1.2.3 涵闸工程** 黄河下游三官庙至韦滩河段有祥符朱、于店、黑岗口等涵闸工程.祥符朱与于店两座涵闸位于大堤左岸,设计流量分别为 30m<sup>3</sup>/s 和 10m<sup>3</sup>/s,黑岗口涵闸位于大堤右岸,设计流量为 50m<sup>3</sup>/s。

**1.2.4 桥梁工程** 郑州官渡黄河大桥位于黄河下游三官庙至韦滩河段上游 13.5km,桥长 7.4km,2019 年竣工通车.已批复修建的 G230 封丘至开封黄河大桥位于该河段下游

8km,桥长 14.7km.

## 2 黄河下游水沙及冲淤特征

### 2.1 水沙变化特征

根据 1950~2020 年实测水沙资料,黄河下游的花园口、高村、艾山以及利津等水文站的年均水量与年均沙量变化基本同步,并且变化趋势也较为接近.黄河下游年水沙量呈现波动的变化特征,并且年际变化幅度大,见图 2 与图 3.小浪底水库运用以前,花园口站年水量与年沙量呈现减小的变化趋势,并且年际波动明显<sup>[24]</sup>.1986~1999 年,花园口水文站的年均水量、年均沙量及年均含沙量分别为  $276.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $6.84 \times 10^8 \text{ t}$  及  $24.75 \text{ kg/m}^3$ ,相较于 1950~1985 年花园口水文站年均水量  $457.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、年均沙量  $12.11 \times 10^8 \text{ t}$  及年均含沙量  $26.47 \text{ kg/m}^3$ ,三者分别降低了 39.60%、43.52% 及 6.50%.小浪底水库运用以后,在 2000~2020 年,花园口站年均水量、年均沙量及年均含沙量分别为  $278.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.10 \times 10^8 \text{ t}$  及  $3.96 \text{ kg/m}^3$ ,相较于 1986~1999 年花园口水文站的年均水量增长了 0.63%,而年均沙量与年均含沙量却分别减少了 83.92% 及 84.0%.小浪底水库运用前后,年均水量略有增加,而年均沙量却大幅锐减.1950~1985 年,花园口站年均水量、年均沙量及年均含沙量与多年均值相比分别高 24.08%、55.06% 及 24.98%.1986~1999 年,花园口站年均水量、年均沙量与多年均值相比分别低 25.05% 和 12.42%,而年均含沙量与多年均值相比高 16.86%.2000~2020 年,花园口站年均水量、年均沙量及年均含沙量与多年均值相比分别低 24.58%、85.92% 及 81.30%,如表 1 所示.

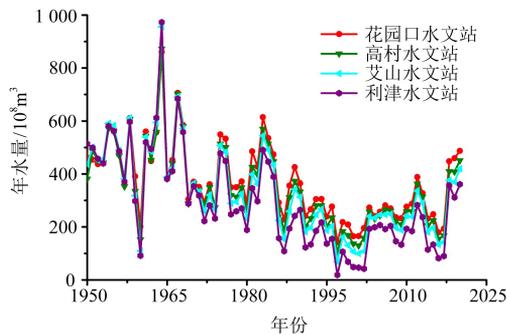


图2 黄河下游年水量变化

Fig.2 Variation of annual water volume in the lower Yellow River

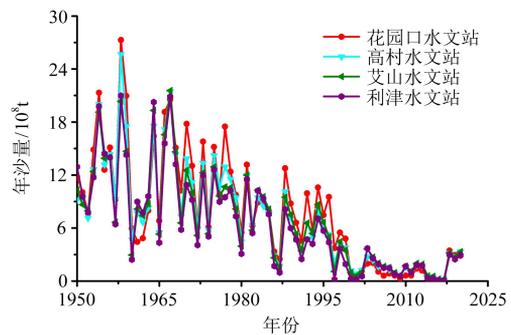


图3 黄河下游年沙量变化

Fig.3 Variation of annual sediment volume in the lower Yellow River

表1 花园口站年均水沙量

Table 1 Annual average water and sediment volume at Huayuankou station

年份	年均水量/ $10^8 \text{ m}^3$	年均沙量/ $10^8 \text{ t}$	年均含沙量/ $(\text{kg/m}^3)$
1950~1985	457.50	12.11	26.47
1986~1999	276.33	6.84	24.75
2000~2020	278.06	1.10	3.96
1950~2020	368.70	7.81	21.18

## 2.2 冲淤变化特征

在小浪底水库运用前的 1952~1999 年,存在两个明显的冲刷期,其中 1961~1964 年、1981~1985 年分别冲刷  $21.53 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $5.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,前者是由于天然来水偏丰导致,后者

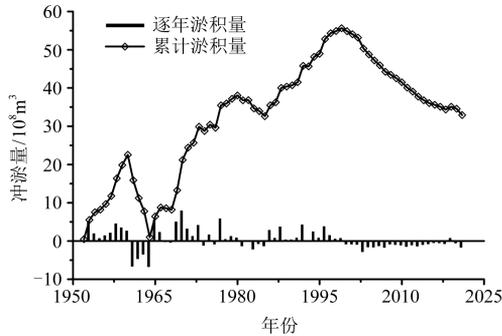


图4 黄河下游冲淤量变化

Fig.4 Variation of scouring and siltation in the lower Yellow River

是三门峡水库蓄清排浑运用与上游有利的水沙条件共同作用<sup>[25-26]</sup>.除去 1967 年(冲刷  $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ )、1968 年(冲刷  $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ )、1974 年(冲刷  $1.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ )、1976 年(冲刷  $0.82 \times 10^8 \text{ m}^3$ )、1993 年(冲刷  $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ )等发生间歇性的冲刷之外,其余年份均发生淤积<sup>[26]</sup>,严重淤积涉及 1965 年、1969 年、1970 年以及 1977 年等,分别淤积了  $5.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $7.93 \times 10^8 \text{ m}^3$  以及  $5.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ .1952~1999 年,黄河下游河段的淤积量高达  $55.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ .小浪底水库运用以后,除去 2019 年下游淤积  $0.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,

黄河下游进入相对稳定的冲刷期,2000~2021 年累计冲刷量可达  $22.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ .1952~2021 年,黄河下游河段累计淤积量为  $32.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,如图 4.小浪底至利津主要水文站包括小浪底、花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、泺口及利津.高村以上为游荡性河段,高村至艾山为过渡性河段,艾山以下为弯曲性河段.高村与艾山可以分别作为划分河段的分界点.

黄河下游沿程冲淤分布:高村以上游荡性河段冲淤强烈,而高村以下过渡性和弯曲性河段冲淤平缓,见表 2.1986~1999 年,黄河下游典型河段均发生了不同程度的淤积,其中高村以上游荡性河段淤积最为严重,淤积量达  $15.248 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占黄河下游总淤积量 66.27%.2000~2021 年,黄河下游典型河段均发生了不同程度的冲刷,其中高村以上游荡性河段冲刷最为严重,冲刷量达  $15.158 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占黄河下游总冲刷量 66.71%.鉴于此,小浪底水库极大改善了日益萎缩的河道,扭转了 20 世纪黄河下游全线淤积的不利形势<sup>[27]</sup>.

表 2 黄河下游不同河段冲淤量(单位:  $10^8 \text{ m}^3$ )

Table 2 Scouring and siltation volumes of different reaches of the lower Yellow River (unit:  $100 \text{ million m}^3$ )

年份	游荡性(高村以上)	过渡性(高村-艾山)	弯曲性(艾山以下)	合计
1952~1964	+0.595	+3.888	-3.476	+1.007
1965~1973	+18.876	+4.734	+5.264	+28.874
1974~1985	-2.151	+4.062	+0.835	+2.746
1986~1999	+15.248	+3.665	+4.097	+23.010
2000~2021	-15.158	-3.303	-4.262	-22.723

注:“+”表示淤积,“-”表示冲刷.

冲刷效率是指洪水期进入黄河下游的  $1 \text{ m}^3$  水量河床中冲刷并输送出下游河道出口站利津站的沙量,一般采用冲淤量与来水量的比值<sup>[28]</sup>,见图 5 和表 3. 1999 年以前,黄河

下游的冲刷效率年际波动较大,有明显的冲刷与淤积时段<sup>[29]</sup>.小浪底水库运用以后,2000~2001年水库蓄水拦沙为调水调沙准备期,因而冲刷效率不高,此时河道的冲刷效率为 $7.563\text{kg}/\text{m}^3$ ;2002~2007年为调水调沙高效运用期,下游冲刷效率有一定提升,冲刷效率为 $10.302\text{kg}/\text{m}^3$ ;2008年后,冲刷效率明显降低.2009年后冲刷效率又大幅减小,呈现出逐年降低的变化趋势,其值为 $4.526\text{kg}/\text{m}^3$ .其原因是2002~2007年清水冲刷后,河道表面已形成与大流量相适应的粗化层,水流将不再从河道中得到大量较细泥沙的补给,河道冲刷量和冲刷效率都随之减弱<sup>[30]</sup>.

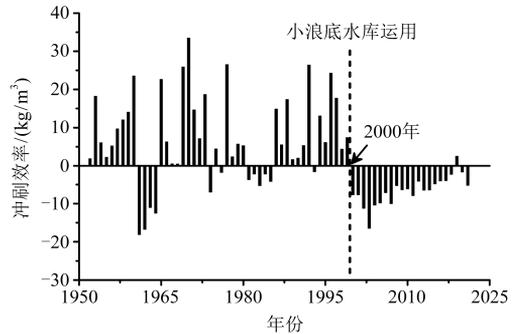


图5 黄河下游冲刷效率年际变化

Fig.5 Inter-annual variation of channel erosion efficiency in the lower Yellow River

表3 黄河下游年均冲淤量及冲刷效率

Table 3 Average annual scouring and siltation volumes and erosion efficiency in the lower Yellow River

年份	来水量/ $10^8\text{m}^3$	冲淤量/ $10^8\text{t}$	冲刷效率
1956~1960	443.417	4.577	10.664
1961~1964	608.413	-8.611	-14.348
1965~1973	417.702	5.133	14.537
1974~1985	430.569	0.366	1.565
1986~1999	274.224	2.630	9.982
2000~2001	167.615	-1.268	-7.563
2002~2007	250.811	-2.613	-10.302
2008~2019	300.721	-1.221	-4.526
2020~2021	500.167	-1.743	-3.444

注:“+”表示淤积,“-”表示冲刷.

### 3 三官庙至韦滩河段河势调整

#### 3.1 河势演变特点

溜指河流中流速较大流线带,溜向指主流带水流方向,送溜指延伸主流,靠溜指靠近主流,导溜指引导主流,着溜指紧靠主流.1957年,黄河下游三官庙至韦滩河段陆续修建了九堡下延工程及黑石工程.进入20世纪70年代初期,除了修建仁村堤护滩工程以外,该河段几乎没有修建控制河势的其他控导工程.

1970~1985年,水量丰沛,加之1975年、1976年及1982年3场大洪水过程,期间主流没有固定流路,河势散乱,主流摆动幅度为 $5\sim 7\text{km}$ ,1970~1972年与1975~1978年,主流出九堡险工后,直接送至三官庙护滩工程,后主流顺左岸顶冲至黑石工程.主流出黑石工程后,主流则向右岸偏移,随后在左岸大张庄和三教堂护滩工程附近靠河.1973~1974年,九堡险工并不靠河,主流走河道中间部位,仅在大张庄控导工程处发生靠河,之后主流送至下游右岸的黑岗口工程附近.1981~1985年,主流顺右岸行走,至三教堂护滩工程和黑

岗口工程附近发生靠河,该期间主流摆动幅度为 4.1~7.2km,见图 6.

1986 年以后,随着黄河龙刘水库群的联合调度,使得进入下游河道的水沙急剧减少,逐步加剧了水沙的不协调性.1986~1991 年,九堡下延工程送溜作用不强,主流离开九堡下延工程后开始向右岸大范围偏移,并且在韦滩控导工程形成较大的“Ω”型河湾,主流继续偏向右岸流动,随后主流在韦滩控导工程附近又走向了其下游左岸大张庄和三教堂控导工程附近.1992~2000 年,主流以偏向左岸为主,主流出九堡下延工程后,顺着左岸顶冲至黑岗口下延工程.由于水量减少,使得大洪水过程也相应地减少,该期间主流有较多类似“正弦”或“余弦”特征的河湾出现,该时期主流摆动幅度为 2.6~7.3km,见图 7.

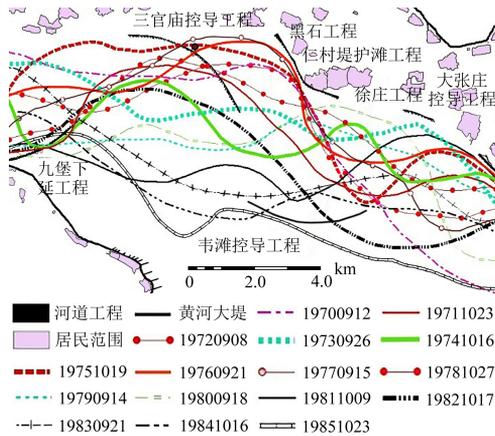


图 6 1970~1985 年河势演变

Fig.6 River regime evolution from 1970 to 1985

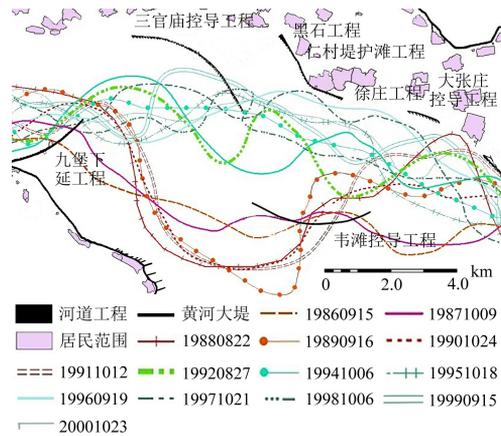


图 7 1986~2000 年河势演变

Fig.7 River regime evolution from 1986 to 2000

2000~2006 年,九堡、三官庙及韦滩等控导工程的靠河程度均不好,河势与规划治导线相反,见图 8. 2007~2012 年,三官庙至韦滩河段畸形河势持续发展,尤其 2012 年汛后,右岸畸形河湾顶已发展至九堡与韦滩控导工程连线外侧区域,畸形河势持续加剧,见图 9. 2013~2017 年,九堡控导工程发生靠河,送溜效果得到明显的提升,使得三官庙控导工程

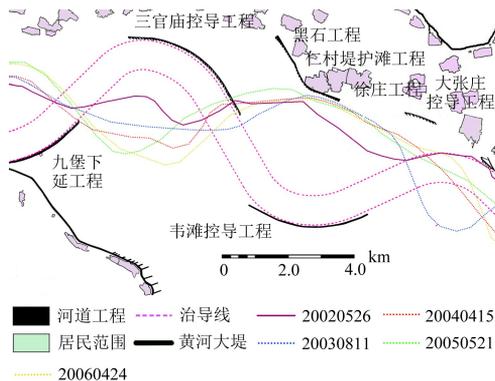


图 8 2002~2006 年河势演变

Fig.8 River regime evolution from 2002 to 2006

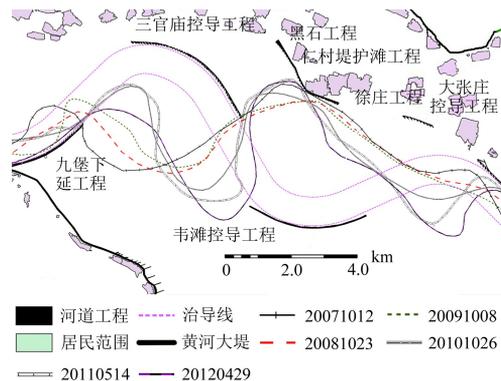


图 9 2007~2012 年河势演变

Fig.9 River regime evolution from 2007 to 2012

逐步靠河导溜.三官庙控导工程送溜方向未朝向对岸韦滩控导工程,而是以近乎垂直于三官庙控导工程方向将主流导向对岸,见图 10. 2018~2020 年,连续 3a 大水使得三官庙控导工程导溜与送溜作用明显增强.直至 2020 年汛后,该河段的河势才趋于治导线方向,致使韦滩控导工程可达到 1/3 长度靠河导溜.由于韦滩控导工程下首三角区域地势偏高,致使送溜段未被完全冲开,导致主流仍呈现出“横河”与“斜河”的态势,见图 11.

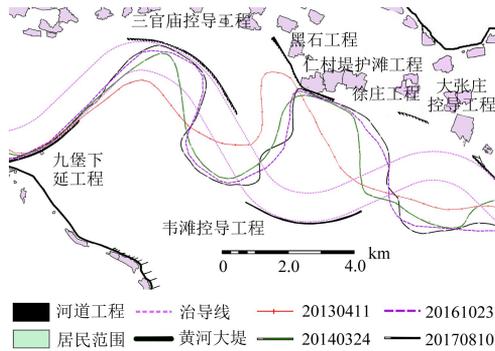


图 10 2013~2017 年河势演变

Fig.10 River regime evolution from 2013 to 2017

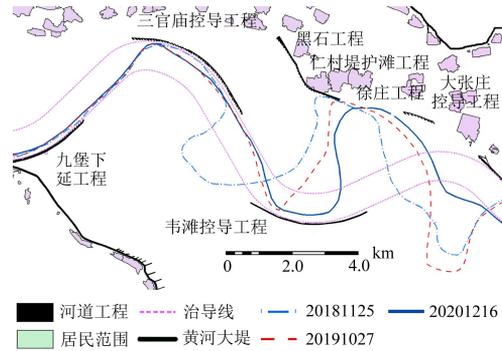


图 11 2018~2020 年河势演变

Fig.11 River regime evolution from 2018 to 2020

基于 1970~2020 年三官庙至韦滩河段主流的摆动情况,将从水沙搭配的角度分析其河势调整的原因.1986~1999 年,连续多年出现枯水少沙,并且附以中小流量含沙量较高的洪水,从而导致河槽淤积严重.游荡性河段在小水的长期作用下形成了一些畸形河湾,工程脱河和半脱河现象严重,同时工程靠溜部位上提现象增多,工程上首坍塌严重<sup>[31]</sup>.小浪底水库下闸蓄水运用以来,由于来水量较少,导致局部畸形河湾有所发展,迫使工程逐步抢修上延.2005 年以后,持续的调水调沙逐渐发挥作用,河槽刷深,排洪能力与平滩流量均显著提高,河势趋于稳定,并逐步按照治导线行河.而在三门峡水库清水下泄期间,游荡性河段发生过两次大的河势调整.1961 年是三门峡水库下泄清水第一年,来水来沙条件发生剧烈变化,下游河势发生较大变化.在 1964 年汛期,水量突然增大,使得河势又发生了新的变化<sup>[32]</sup>.1970~1985 年,由于水量较为丰沛,三官庙至韦滩河段主流并无固定的流路,河势较为分散.随着 20 世纪 80 年代后河道整治工程的不断完善,工程对于河势的控制作用逐步增强.直至 2018 年汛前,三官庙至韦滩河段的河势与规划治导线几乎相反.2018~2020 年连续 3a 的大流量过程,引起中常洪水的持续时间增长,致使三官庙控导工程的导流和送溜作用也得到增强.

### 3.2 河势与治导线适应性

治导线称为规划治导线或整治线,是指河道经整治后,主河槽在设计流量条件下水流形成的规则平面轮廓线,也是整治工程体系临河面的边界连线,采用两条平行的圆滑曲线表达<sup>[33]</sup>.治导线既是河道整治工程布局的关键依据,也是河道规划设计的主要内容.一个相对完善的治导线往往需要若干次的调整才能确定.黄河下游陶城铺以上河段治导线曾多次修订.在 1972 年编写与制定的《黄河下游河道整治近期规划》中,拟定了铁谢至陶城铺河段的治导线位置.在 1991 年,为配合小浪底水库移民安置区建设,修订了铁谢至伊洛

河口河段治导线位置<sup>[34]</sup>.在2000年,黄河水利委员会修订了白鹤至孙口河段的治导线布置图,调整整治流量与整治河宽.2002~2005年,采用实体模型检验了在小浪底设计水沙系列条件下修订后治导线位置的合理性,并且初步确定了治导线的准确位置.在2018年汛前,三官庙至韦滩河段的河势与规划治导线的方向几乎相反.2018~2020年,汛期水量偏丰,中常洪水历时较长,使得该河段的河势趋于治导线的流路发展.

### 3.3 工程送溜长度变化

工程送溜长度是指主流离开上一处控导工程,在不改变主流流动方向前提下能向前延伸的距离.最大送溜长度指从上一处河道整治工程下首最后一道坝头开始沿该坝头处

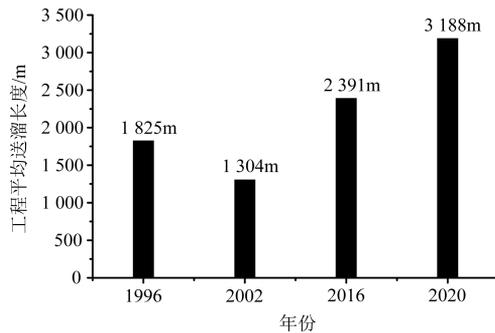


图12 工程平均送溜长度

Fig.12 Project average delivery length

切线方向到下一处整治工程的距离.靠溜长度指着溜点以下工程靠河距离.若实际工程送溜距离与最大工程送溜距离两者接近,表明工程对于河势控制程度较高,能够按规划流路控导河势.实测资料表明,在中水流量下主流一般能从上一控导工程下首送至下一控导工程的着溜点.1996年,黄河下游游荡性河道工程平均送溜长度为1825m.2002年开始拦沙运用,小流量历时增长,送溜长度略有减小,工程平均送溜长度为1304m.2020年水量偏丰,调水调沙期间大流量持续时间长,整治工程送溜长度大幅递增,工程平均送溜长度为3188m,与2016年工程平均送溜长度相比增长33.3%,见图12.

### 3.4 河道主流线特征

分析主流摆动幅度和摆动强度涉及三官庙、黑石、郭庄、徒门及徐庄等大断面.由于黄河下游游荡性河道不同位置断面形态相差较大,为此需要套绘上述大断面在汛前与汛后的断面形态,从而准确确定主槽范围及相应河宽<sup>[35]</sup>.考虑到断面间距不均匀对结果的影响,采用几何平均与间距加权的方法计算河段的河宽<sup>[36]</sup>

$$B = e^{\left(\frac{1}{2S} \sum_{i=1}^{n-1} (\ln B_{i+1} + \ln B_i) W_i\right)} \quad (1)$$

式中: $B$ 为河段河宽; $B_i$ 、 $B_{i+1}$ 分别为第*i*、第*i+1*断面的河宽; $n$ 为测量断面数目; $W_i$ 为相邻断面间距; $S$ 为河段长度.

主流摆动幅度<sup>[35]</sup>计算如下

$$\Delta B = \frac{1}{2S} \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta B_{i+1} + \Delta B_i) W_i \quad (2)$$

式中: $\Delta B$ 为摆动宽度; $\Delta B_i$ 、 $\Delta B_{i+1}$ 分别为第*i*、第*i+1*断面的摆动宽度.游荡性河段床沙组成较细,河岸抗冲性也较差,在较强水流作用下,河势剧烈变化.主流摆动强度<sup>[35]</sup>定义为

$$H = \frac{2\Delta B}{B_f + B_a} \quad (3)$$

式中: $B_f$ 与 $B_a$ 分别为上一年与当年的河宽.

主流弯曲系数表示河流的弯曲程度,其变化反应河流主流的长度变化.黄河下游三官庙至韦滩河段弯曲系数逐年增大,变化范围为 1.2~1.4,见表 4.

表 4 三官庙至韦滩河段主流线特征

Table 4 Mainstream features of Sanguanmiao to Weitan

年份	弯曲系数	摆动幅度/m	摆动强度
1960~1973	1.21	2 597	1.96
1974~1999	1.28	2 280	1.75
2000~2020	1.37	1 392	0.82

1960~1973 年主流量均弯曲系数为 1.21,1973~1999 年主流量均弯曲系数增长为 1.28,2000 年后主流量均弯曲系数持续增长至 1.37,该河段河道弯曲程度逐年增大.主流摆动主要反映河势变化.主流摆动幅度是指该年与上一年主流线与大断面交点之间的距离.1960~1973 年,三门峡水库运用以来,三官庙至韦滩河段的主流摆动幅度与摆动强度分别为 2 597m 与 1.96. 1974~1999 年河道整治工程陆续修建.该时期三官庙至韦滩河段主流摆动幅度与摆动强度分别减少为 2 280m 与 1.75. 2000~2020 年,三官庙至韦滩河段主流摆动幅度与摆动强度分别减少为 1 392m 与 0.82.该时期河道整治工程靠河几率增加,河道已被两岸堤防工程有效控制.截至 2020 年,黄河下游游荡性河道整治工程多达 110 余处,工程长度为 305km,这些整治工程对于制约主流摆动、降低河势游荡范围具有积极的作用.

## 4 三官庙至韦滩河段河势演变预测

### 4.1 水沙过程与河势演变关系

水沙过程对主流弯曲系数、摆动幅度以及摆动强度等形态参数产生影响,见表 5.年均含沙量越大,三官庙至韦滩河段主流弯曲系数越小.1965~1973 年,年均含沙量较大,主流弯曲系数为 1.2. 2000~2010 年,年均含沙量较小,主流弯曲系数为 1.34.年均含沙量越大,三官庙至韦滩河段主流摆动幅度越大.1965~1973 年,年均含沙量较大,主流摆动幅度为 2 627m. 2000~2010 年,年均含沙量较小,主流摆动幅度为 1 841m.年均含沙量越大,则三官庙至韦滩主流摆动强度越大.1965~1973 年,年均含沙量较大,主流摆动强度为 2.22. 2000~2010 年,年均含沙量较小,主流摆动强度为 0.83.

1949~1960 年、1965~1973 年、1974~1980 年、1994~1999 年等时期,年均含沙量基本一致,而年水量却存在较大的差别.为此,随着年均水量的增加,三官庙至韦滩河段的弯曲系数减小,而摆动幅度和摆动强度均增大.

在大流量作用下,主槽刷深,滩唇淤高,宽浅散乱的河床将形成单一的窄深河槽,此时河道主流趋直走中概率将大幅度增加.由于中常洪水不出槽,则漫滩机遇则减少,河槽淤积加大,河道向宽浅方向发展<sup>[37]</sup>.而长期的小水作用,可使河湾顶部沿纵向下移,甚至发展成为“Ω”型与“S”型等畸形河弯,导致主流弯曲系数和长度增加,出现“横河”与“斜河”,危害堤防安全.在含沙量较高的时期,河道发生强烈的淤积,汊河消亡,水流多由几股变为 1 股.游荡性河道往往切割阻水洲滩,水流滚移,引起河势发生较大的改变,从而增加

了出现“横河”与“斜河”的机会。

表5 年均水量、年均沙量和主流形态参数

Table 5 Average annual water volumes, average annual sediment volumes and mainstream morphological parameters

年份	年均水量/ $10^8\text{m}^3$	年均沙量/ $10^8\text{t}$	年均含沙量/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	弯曲系数	摆动幅度/m	摆动强度
1949~1960	471.33	14.25	30.2	1.20	3 469	2.55
1961~1964	606.73	8.41	13.9	1.21	2 531	1.72
1965~1973	423.06	13.82	32.7	1.20	2 627	2.22
1974~1980	388.61	10.88	28.0	1.27	2 685	2.06
1981~1985	507.17	8.99	17.7	1.21	2 249	1.36
1986~1993	309.81	6.76	21.8	1.30	2 590	1.91
1994~1999	231.69	6.93	29.9	1.34	1 422	1.59
2000~2010	235.61	0.59	2.5	1.34	1 841	0.83
2011~2020	324.76	1.29	4.0	1.40	898	0.71

## 4.2 河势发展趋势预估

目前黄河下游三官庙至韦滩河段的九堡下延、三官庙及韦滩等控导工程靠河程度均较好,基本按照治导线流路方向行河.当前该河段现状河势与现有整治工程布局相匹配,将有利于河势的归顺发展.同时,该河段河槽由2020年长历时洪峰流量 $5\,520\text{m}^3/\text{s}$ 冲刷而成,河槽较为稳定.因此,近期三官庙控导工程附近河势将处于相对稳定的阶段.黄河下游近期规划“十四五”防洪工程,对于九堡、三官庙及韦滩控导工程均有不同程度的上延与下续.近期黄河下游三官庙至韦滩河段河道整治工程对河势控制能力将逐步增强,河势将按照治导线行河的几率大大增加.

1950~2020年,黄河下游的年水量与年沙量变化整体呈显著减小的趋势.小浪底水库运用以前,水量与沙量大致以1968年和1986年为增减变化趋势的转折点,并在1986~1999年持续地下降.小浪底水库运用以后,年水量将趋于稳定,而年沙量仍然呈显著下降的变化趋势.根据上述分析,近期黄河下游将以长时期清水下泄为主.若来水不丰沛,并且上中游水库蓄水较多,进入黄河下游的水量将较少, $4\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上中长洪水持续时间将会缩短,而河势仅仅采取小水塌滩的方式演变,主流则有可能摆动到2018年之前老河道的区域.若来水较为丰沛,由于大水送溜能力较强,则韦滩控导工程的下首将会继续“下挫”,该河段的河势将按照治导线进行行河.随着中游骨干水库群的投入使用与工农业用水量的持续增长,黄河下游发生来流不丰沛现象的可能性将会偏大.因此,从长期来看,主流将会在三官庙至韦滩河段的河道内部来回摆动.

## 5 结论

采用资料分析与理论研究相结合的方法,分析了黄河下游三官庙至韦滩河段的河势演变特点,同时结合未来可能的水沙过程,从短期与长期两个角度,预测了该河段的河势演变趋势.得出研究结论如下:

(1)黄河下游花园口、高村、艾山及利津4个典型水文站的年水量与年沙量变化趋势基本接近,并且年水量与年沙量变化特征几乎同步.黄河下游水沙量波动特征明显,并且

年际变幅较大.总体来说,1950年以后,黄河下游的水量与沙量均有不同程度的减少;

(2)2018~2020年,连续3a的大水,使得三官庙控导工程导流与送溜作用明显增强.尤其是2020年汛期水量、洪峰流量及沙量相对更大,使得韦滩控导工程附近河势得到明显改善.直至2020年汛后,韦滩控导工程约有1/3长度靠河与导溜,只是控导工程送溜段还未被冲开,仍呈现出“横河”的态势;

(3)如果黄河来水不丰沛,并且上中游水库蓄水较多,则进入黄河下游的水量会较少,主流能摆动至2018年形成的老河道内.如果近几年黄河下游来水量较为丰沛,由于大水送溜能力较强,则韦滩控导工程下首可能会继续“下挫”,河势将按照治导线行河;

(4)基于2018~2020年连续3a的大水过程,三官庙至韦滩河段的河势将加速趋于治导线.但从长期来看,随着骨干水库投入使用与工农业用水量增长,继续发生大水的可能性将偏小,而长期小水的可能性仍然偏大.因此,主流将会在河道内部来回地摆动.

黄河下游三官庙至韦滩河段属于典型的游荡性河道,河床宽浅,主流散乱,河势摆动多变及畸形河势频发.近年来,该河段主流游荡范围偏大,不仅造成塌滩,危及堤防安全,而且使得下游引黄涵闸脱流,造成引水困难<sup>[1]</sup>.因此,探究三官庙至韦滩河段的河势调整特点,对于完善黄河下游防洪工程体系、保障两岸防洪安全具有重要意义.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 潘明强,郭艺霏,王李平.黄河下游九堡—韦滩河段河道整治工程研究[J].人民黄河,2019,41(1):34-36  
Pan Mingqiang, Guo Yifei, Wang Liping. River regulation scheme for Jiubao-Weitan reach of lower Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(1): 34-36
- [ 2 ] 张林忠,董其华,万强,黄河下游畸形河势演化规律及其整治措施[J].人民黄河,2015,37(11):32-35  
Zhang Linzhong, Dong Qihua, Wan Qiang. Study on the evolutionary law and the river training measures of the freakish river regime in the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2015, 37(11): 32-35
- [ 3 ] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987  
Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. Fluvial evolution[M]. Beijing: Science Press, 1987
- [ 4 ] 毕慈芬.黄河下游游荡性河段形态变异成因的探讨[C].黄河水利委员会水利科学研究所研究论文集.郑州:河南科学技术出版社,1989:27-37  
Bi Cifen. Discussion on the causes of formation variation of wandering reach in the lower Yellow River[C]. Research Papers of Institute of Water Resources of Yellow River Commission. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1989: 27-37
- [ 5 ] 张瑞瑾.关于黄河下游游荡性河段今后的演变趋势[C].张瑞瑾论文集.北京:中国水利水电出版社,1996:326-331  
Zhang Ruijin. Evolution trend of wandering reach in the lower Yellow River[C]. Collected Papers of Zhang Ruijin. Beijing: China Water & Power Press, 1996: 326-331
- [ 6 ] 陆中臣,陈劭锋,陈浩.黄河下游游荡段河道平面形态与河势变化趋势预测[J].地理学报,2000,(6):729-736  
Lu Zhongchen, Chen Shaofeng, Chen Hao. The evolutionary tendency forecast of channel morphology and river state of the wandering braided rivers in the lower Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, (6): 729-736
- [ 7 ] 端木礼明.小浪底水库运用后黄河下游游荡性河段河势变化分析研究[D].西安:西安理工大学,2002  
Duanmu Liming. Study on flow state change of wandering section of lower reaches of the Yellow River when Xiaolangdi Project put into operation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002
- [ 8 ] 吴保生,马吉明,张仁,等.水库及河道整治对黄河下游游荡性河道河势演变的影响[J].水利学报,2003,(12):12-20  
Wu Baosheng, Ma Jiming, Zhang Ren, et al. Effects of reservoir and training on river regime evolution of the braided reach in the lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (12): 12-20

- [9] 曹文洪.黄河下游水沙复杂变化与河床调整的关系[J].水利学报,2004,(11):1-6  
Cao Wenhong. Relationship between variation of sediment carrying flows and readjustment of riverbed in the lower reaches of Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (11): 1-6
- [10] 徐国宾,张金良,练继建.黄河调水调沙对下游河道的影响分析[J].水科学进展,2005,(4):518-523  
Xu Guobin, Zhang Jinliang, Lian Jijian. Effect of water-sediment regulation of the Yellow River on the lower reach[J]. Advances in Water Science, 2005, (4): 518-523
- [11] 姚文艺,王卫东.黄河下游游荡性河道河势调整关系研究[J].水科学进展,2006,(5):624-630  
Yao Wenyi, Wang Weidong. Study on the adjustment of river regime at the wandering reach of the lower Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2006, (5): 624-630
- [12] 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 the changes in wandering plane form of the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2009, 31(5): 26-27
- [13] 牛玉国,端木礼明,周念斌,等.黄河下游畸形河势成因及治理对策[J].人民黄河,2013,35(8):1-2  
Niu Yuguo, Duanmu Liming, Zhou Nianbin, et al. Causes of irregular channel regime and countermeasures in the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2013, 35(8): 1-2
- [14] 刘燕,江恩惠,曹永涛,等.小浪底水库拦沙后期调度对下游河道的影响[J].人民黄河,2013,35(11):14-16  
Liu Yan, Jiang Enhui, Cao Yongtao, et al. Different dispatching modes in response to downstream reaches of late sediment-retaining period of Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River, 2013, 35(11): 14-16
- [15] 谢鉴衡.河床演变及整治[M].武汉:武汉大学出版社,2013  
Xie Jianheng. River bed evolution and regulation[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2013
- [16] 王卫红,王万战,孙赞盈.长期枯水枯沙作用下黄河游荡型河段变化特点[J].人民黄河,2014,36(1):22-23  
Wang Weihong, Wang Wanzhan, Sun Zanying. Regime features of the wandering channel changes of the Yellow River due to low flow and sediment[J]. Yellow River, 2014, 36(1): 22-23
- [17] 假冬冬,邵学军,周建银,等.水沙条件变化对河型河势影响的三维数值模拟研究[J].水力发电学报,2014,33(5):108-113  
Jia Dongdong, Shao Xuejun, Zhou Jianyin, et al. 3-D numerical simulation of impacts of flow and sediment regime changes on fluvial processes in conceptual channel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 108-113
- [18] 王英珍,夏军强,周美蓉,等.小浪底水库运用后黄河下游游荡段主槽摆动特点[J].水科学进展,2019,30(2):198-209  
Wang Yingzhen, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Characteristics of main channel migration in the braided reach of the lower Yellow River after the Xiaolangdi Reservoir operation[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 198-209
- [19] 李勇,王卫红,张宝森,等.长期低含沙水流作用下黄河下游河势调整过程[J].人民黄河,2019,41(3):31-35  
Li Yong, Wang Weihong, Zhang Baosen, et al. Changes of river regime of the lower Yellow River under long-term low-concentrated flow conditions[J]. Yellow River, 2019, 41(3): 31-35
- [20] 江青蓉,夏军强,周美蓉,等.黄河下游游荡段不同畸形河湾的演变特点[J].湖泊科学,2020,32(6):1837-1847  
Jiang Qingrong, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Evolution process of different abnormal river bends in the braided reach of the lower Yellow River[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(6): 1837-1847
- [21] 刘慰,王随继,王彦君.黄河下游河道断面形态参数变化及其水沙过程响应[J].地理科学,2020,40(9):1563-1572  
Liu Wei, Wang Suiji, Wang Yanjun. Variation of morphological parameters of channel cross-sections and their response to water-sediment processes in the lower Yellow River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(9): 1563-1572
- [22] 胡一三,江恩惠,曹常胜,等.黄河河道整治[M].北京:科学出版社,2020  
Hu Yisan, Jiang Enhui, Cao Changsheng, et al. Yellow river channel improvement[M]. Beijing: Science Press, 2020
- [23] 许琳娟,王远见,李军华,等.基于长序列的黄河下游游荡型河道河势演变[J].南水北调与水利科技,2021,19(1):151-157  
Xu Linjuan, Wang Yuanjian, Li Junhua, et al. River regime evolution of the wandering channel in the lower Yellow River based on long sequence[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 151-157
- [24] 郜国明,谈广鸣,李涛,等.小浪底水库排沙指标及2015年应用分析[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(2):275-283

- Gao Guoming, Tan Guangming, Li Tao, et al. Analysis of index on sediment flushing of density current in Xiaolangdi reservoir and application in 2015[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(2): 275-283
- [25] 王英珍, 夏军强, 周美蓉, 等. 近 30 年黄河下游游荡段平滩面积及流量变化特点[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 666-679
- Wang Yingzhen, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Variations in bankfull area and discharge in the braided reach of the Lower Yellow River over the past 30 years[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 666-679
- [26] 韩小军, 朱莉莉. 小浪底水库运用前后黄河下游河道冲淤特征分析[J]. 陕西水利, 2017, (5): 1-2+10
- Han Xiaojun, Zhu Lili. Analysis on the channel scouring and deposition characteristics in the lower reaches of the Yellow River before and after Xiaolangdi reservoir used[J]. Shaanxi Water Resources, 2017, (5): 1-2+10
- [27] 夏军强, 王增辉, 王英珍, 等. 黄河中下游水库-河道-滩区水沙模拟系统的构建与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 652-665
- Xia Junqiang, Wang Zenghui, Wang Yingzhen, et al. Development and application of a reservoir-channel-floodplain coupling model system for flow and sediment transport in the middle and Lower Yellow River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 652-665
- [28] 李小平, 李文学, 李勇, 等. 水库拦沙期黄河下游洪水冲刷效率调整分析[J]. 水科学进展, 2007, (1): 44-51
- Li Xiaoping, Li Wenxue, Li Yong, et al. Analysis of erosion efficiency and adjustment of flood in the lower Yellow River during the storage periods[J]. Advances in Water Science, 2007, (1): 44-51
- [29] 申红彬, 吴华莉, 李灵军, 等. 基于滞后响应模型的输沙率变化过程描述方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1294-1303
- Shen Hongbin, Wu Huali, Li Lingjun, et al. Description method for variation of sediment transport rate based on delayed response model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(6): 1294-1303
- [30] 陈琳. 小浪底水库运用后黄河下游水沙变化及河道冲淤演变[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017
- Chen Lin. The evolution of flow-sediment series and channel responses in the lower Yellow River after operation of Xiaolangdi reservoir[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017
- [31] 江恩惠, 万强, 曹永涛. 黄河下游游荡性河道整治河弯流路方程[J]. 天津大学学报, 2008, (9): 1057-1061
- Jiang Enhui, Wan Qiang, Cao Yongtao. Bend's equation for river channel regulation of the meandering reach in the lower Yellow River[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2008, (9): 1057-1061
- [32] 刘燕. 小浪底水库运用后下游游荡性河道演变趋势研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004
- Liu Yan. Study on evolution of wandering reach of the lower Yellow River under the operation of Xiaolangdi reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004
- [33] 马良, 张红武, 钟德钰. 基于制衡机制的治导线设计[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1315-1321
- Ma Liang, Zhang Hongwu, Zhong Deyu. Design of regulation line based on check and balance mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1315-1321
- [34] 姚文艺, 常温花, 夏修杰. 黄河下游游荡性河段清水下泄期河道断面形态的调整过程[J]. 水利学报, 2003, (10): 75-80
- Yao Wenyi, Chang Wenhua, Xia Xiujie. Regulation process of river section morphology in the wandering reach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, (10): 75-80
- [35] 夏军强, 王英珍, 李涛, 等. 河床横向摆动计算方法及其在黄河下游游荡段的应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 87-95
- Xia Junqiang, Wang Yingzhen, Li Tao, et al. Method to calculate channel migration and its application in the braided reach of the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 87-95
- [36] 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
- [37] 陈孝田, 陈书奎, 李书霞, 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
- Chen Xiaotian, Chen Shukui, Li Shuxia, et al. Evolution of river regime in wandering reach of the lower Yellow River[J]. Yellow River, 2009, 31(5): 26-27

## Mainstream Swing Rule and Its Driving Mechanism in the Sanguanmiao to Weitan Reach of the Lower Yellow River

ZHANG Chunjin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Min<sup>2</sup>, YAO Wenyi<sup>2</sup>, LI Yong<sup>2</sup>, MA Dongfang<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory for Sedimentation Science and Northern Rivers Training, the Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2.Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation Sediment, MWR, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

### Abstract

With the joint operation of Sanmenxia, Xiaolangdi, Luhun, Guxian and Hekoucun reservoirs, the water-sediment process in the lower Yellow River has changed significantly. In recent years, the special water and sediment conditions have caused changes of the river regime from Sanguanmiao to Weitan in the lower Yellow River, resulting in a large number of beach collapse and endangering the safety of villages and embankments on both sides. In order to clarify the mainstream swing rule and its driving mechanism in the Sanguanmiao to Weitan reach, this paper adopted data analysis and theoretical research to describe the channel and engineering situation of the Sanguanmiao to Weitan reach, and analyzed the water-sediment process and the characteristics of the channel scouring and siltation. At the same time, according to the adjustment characteristics of the river regime in different periods and its response to the water-sediment process, the evolution trend of the river regime under different discharge processes was estimated. Studies have shown that, in the short term, the river channel formed by the long-term flood erosion was relatively stable, coupled with the continuous improvement of the river regulation project, the probability of the river regime moving along the governing line increased. However, in the long run, with the use of the backbone reservoirs and the increase of industrial and agricultural water consumption, the possibility of continuous small flow in the lower Yellow River was high, and the mainstream swung in the channel.

**Keywords:** abnormal river regime; change of water and sediment; scouring and siltation characteristic; river regime adjustment; mainstream swing; governing line