

基于遥感影像的黄河下游游荡段河势演变分析

张晓雷¹,朱 裕¹,崔振华²

(1. 华北水利水电大学,河南 郑州 450046; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003)

摘要:为了研究小浪底水库运行后黄河下游游荡段河势演变情况,选取黄河下游游荡段2001–2020年近20年的Landsat卫星遥感影像图片,基于ARCGIS和ENVI软件采用边缘提取算法提取河道水边线及修正归一化差异水体指数(MNDWI)法提取水体,分析汛期河道水面宽度、汛后主流位置、汛后心滩数量等特征指标。结果表明:①小浪底水库运行后,经过20年的冲淤调整,黄河下游游荡段河势在汛期得到明显改善,主流基本归顺;②该河段河型没有明显变化,汛期水面宽度随流量同增同减,总体上逐年变宽,但夹河滩–高村河段水面宽度由于河道整治工程的控制较为稳定;③采用MNDWI法对水体的智能化提取,发现主流摆幅呈现3种规律:①主流位置基本不变②主流位置向同一个方向移动③主流位置迁徙不定;④心滩数量与流量呈负相关,总体上在2001–2007年逐年减少,2007年达到最小值13个,2007–2015年逐年增多,2015年达到最大值58个,2015–2020年又逐年减少,同时在河道河型突变位置也会发生变化。河势调整会改变河道整治工程的有效性,同时也会对滩区群众的生产生活造成影响,因此需要加强黄河下游游荡段河势的监测并对心滩的变化予以足够的重视,提升对黄河下游河势调整规律及心滩演变的认识。

关键词:黄河下游游荡段;水体提取;遥感影像;河势演变;主流摆幅

中图分类号:TV147

文献标识码:A

DOI:10.12396/znsd.230211

张晓雷,朱 裕,崔振华. 基于遥感影像的黄河下游游荡段河势演变分析[J]. 中国农村水利水电,2023(9):146–152. DOI:10.12396/znsd.230211.

ZHANG X L, ZHU Y, CUI Z H. Analysis of the river regime evolution in the braided reach in lower Yellow River based on remote sensing images[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(9):146–152. DOI:10.12396/znsd.230211.

Analysis of the River Regime Evolution in the Braided Reach in Lower Yellow River Based on Remote Sensing Images

ZHANG Xiao-lei¹, ZHU Yu¹, CUI Zhen-hua²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan Province, China;

2. Yellow River Survey, Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan Province, China)

Abstract: In order to study the river regime evolution of the braided reach in Lower Yellow River after the operation of the Xiaolangdi Reservoir, the Landsat satellite remote sensing images of the braided reach in Lower Yellow River during the past 20 years from 2001 to 2020 are selected, and the edge extraction algorithm is used based on ARCGIS and ENVI software to extract water edge and correct the normalized differences. The water body index method (MNDWI) is used to extract the water body and analyze the characteristic indicators such as the water surface width of the river channel during the flood season, the position of the mainstream after the flood season, and the number of central banks after the flood season. The results show that: ①After the operation of Xiaolangdi Reservoir, after 20 years of dredging adjustment, the river conditions in the braided reach in Lower Yellow River have been significantly improved during the flood season, and the mainstream has basically returned.②There is no obvious change in the river shape of this reach, and the width of the water surface increases and decreases.

收稿日期:2023-02-17 接受日期:2023-04-04

基金项目:国家自然科学基金项目(U2243220,41930643);河南省科技攻关项目(222102320195);水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹)研究基金(2022-SYSJJ-10)。

作者简介:张晓雷(1981-),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究工作。E-mail:zx1334@163.com。

通讯作者:朱 裕(1998-),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail:457307334@qq.com。

es with the amount of water during the flood season, and generally widens year by year. However, the width of the water surface of the Jiahetan-Gaocun section is relatively stable due to the control of the river channel improvement project. ③Using the MNDWI method to intelligently extract the water body, it is found that the swing of the mainstream presents three rules: ①The position of the mainstream is basically unchanged. ②Mainstream position moves in the same direction. ③ Mainstream locations are migratory. ④The number of the mid-channel beaches is negatively correlated with the water volume, generally decreasing year by year from 2001 to 2007, reaching a minimum of 13 in 2007, increasing year by year from 2007 to 2015, reaching a maximum of 58 in 2015, and decreasing year by year from 2015 to 2020, and at the same time, the location of the river-shaped abrupt change in the channel will also change. The adjustment of river regime will change the effectiveness of the river improvement project, and will also affect the production and life of the people in the beach area. Therefore, it is necessary to strengthen the monitoring of the river regime in the wandering section of the Lower Yellow River and pay enough attention to the changes of the heart beach to enhance the understanding of the law of river situation adjustment and the evolution of the heart beach in the Lower Yellow River.

Key words:braided reach in Lower Yellow River; water body extraction; remote sensing image; river regime evolution; mainstream swing

0 引言

黄河下游河道游荡段一般特指河南孟津至山东东明高村河段,该河段具有河槽断面宽浅、水流散乱、主流迁徙不定等典型特征^[1,2]。20世纪80年代以来,受气候和人类活动的双重影响,黄河下游河道的来水来沙条件发生了明显变化。特别是小浪底水库运行之后,黄河下游的来流量大部分时间维持在1 000 m³/s左右,在中小流量作用下河道摆动^[3],威胁滩区居民的生命财产安全。

对于黄河下游游荡段的这种不稳定的河势,诸多专家学者进行了大量研究。例如,张林忠等^[4]分析了黄河下游河道畸形河势的形成条件、发展过程、持续时间及易发河段的演化规律,并提出了相应的整治措施;刘月兰^[5]分析了黄河下游游荡段整治前后的冲淤特性,结果表明:整治工程可减少主槽的摆动幅度,压缩或者消除河槽中的嫩滩;戈向阳等^[6]通过分析黄河下游游荡段非均匀悬沙输移特点,认为该河段水流含沙量大,河床调整迅速,并对河道发展趋势进行了预测;潘明强等^[7]对黄河下游九堡至韦滩河段2008–2012年的河势变化进行了分析,并基于此提出了相应的河道整治工程建设方案;李云驹等^[8]基于RS与GIS技术解析黄河下游遥感资料,并结合水文资料,分析了主流线、心滩、中水河槽水面宽度等河道特征指标,认为黄河下游游荡段长度缩短,主流线摆动幅度变小,主流线长度增加、曲率增大,主槽的面积大幅度减小。

上述学者对黄河下游游荡段的河势进行了较为充分的研究,但大多数学者主要是采用模型试验的方法,而李云驹等采用RS与GIS技术解析Landsat卫星遥感影像资料的方法。Landsat系列卫星自1972年7月23日发射以来,已经获得数以百万计的高分辨率影像,为研究全球的地理环境变化提供了依据^[9]。与传统的人工查河方式相比,高分辨率卫星图片具有精度高、定位准、跟踪迅速等技术优势^[10]。李云驹等虽然利用了卫星遥感影像但其只研究了中水河槽的水面宽度,并没有研究汛期洪水河槽的水面宽度。考虑到近年来黄河水量较丰,有必要对该河段的河势变化及演变趋势进一步研究。

1 研究区域概况

1.1 基本概况

黄河下游游荡型河段全长299 km,纵比降0.172‰~0.265‰,滩槽高差较小,河道泥沙淤积严重,主槽变化频繁,主槽宽一般在1.5~3.5 km之间,水流散乱多汊,一般在1~3股^[11,12]。花园口、夹河滩、高村3个断面的河道床沙中值粒径 d_{50} 在小浪底水库运行后多年平均分别为0.213、0.125、0.098 mm,岸滩土体绝大部分是黏性土体^[13]。该河段河势演变剧烈,既受上游来水来沙条件的影响,又受人类活动的影响。为解决河势稳定和防洪安全等问题,近年来开展了相关河道整治工程上延续工作,提升了中小流量情况下对河势的控导能力。黄河下游河段及本次研究河段见图1。

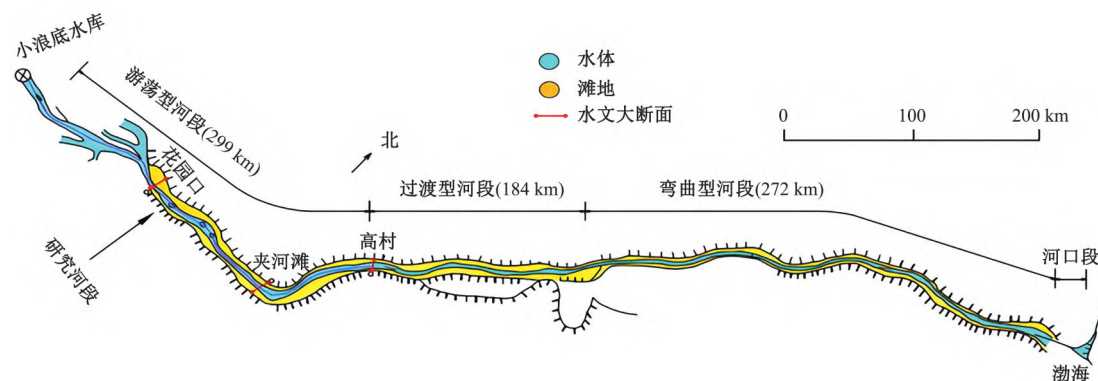


图1 黄河下游分段示意

Fig.1 Schematic of the lower reaches of the Yellow River

1.2 水文泥沙概况

黄河下游游荡段的河势演变主要受河段来水来沙条件、支流汇入、河流边界条件的影响,其中水沙条件是最为关键的影响因素。小浪底水库控制流域面积占整个黄河流域面积的92.4%,对进入黄河下游河段的水沙量具有较强的调节作用。以小浪底、黑石关、武陟3站之和的来水量及来沙量为代表,小浪底水库运行前(1986–1999年),黄河下游年均水量为278亿 m^3 ,水库运行后(1999–2015年)年均水量为256亿 m^3 ,减少了7.9%;其运行前后年均输沙量分别为7.6和0.88亿t,减少了88.4%。在河道冲淤方面,小浪底水库运行前下游河道持续淤积,对下游河势十分不利;运行之后,由于水库对泥沙的拦截作用,黄河下游河道持续冲刷,小浪底水库对下游河道的塑造起了关键作用^[14,15]。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

在地理空间数据云(www.gscloud.cn)上,根据黄河下游游荡段所处的条带号、行列号获取其2001–2020年Landsat卫星遥感影像资料(Landsat-TM/ETM/OLI影像),同时为了提高图片中地物的清晰度,控制选取图片的云量不超过5%。

2.2 研究方法

基于下载完成的Landsat-TM/ETM/OLI影像,利用ENVI软件提取河道水边线和水体信息。水体是十分重要的地理信息,有效提取水体信息对于黄河下游游荡段河势分析有重要意义。目前遥感成像提取水体的方法有阈值分割法^[16]、光谱分类法^[17]、水体指数法^[18]。阈值分割法原理是通过设定不同的特征阈值,把图像像素点分为若干类。光谱分类法包括监督分类与非监督分类,最常运用于水体提取的方法是监督分类中的最大似然分类法,但容易将河滩错分为水体。一般水体指数法是指归一化水体指数法^[19,20],方程式为 $\text{NDWI} = (\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{NIR}}) / (\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{NIR}})$ 。该方法是用遥感影像的特定波段进行归一化插值处理,原理是水体在绿波段的反射率大于近红波段^[21,22],利用此特性提取水体信息效果好。但是NDWI法也有局限性:在水体周围有很多建筑物时,容易将水体和建筑物混淆^[23,24]。徐涵秋^[25]在NDWI法的基础上,对构成该指数的组合波长进行修改,提出了修正归一化水体指数(MNDWI)法,方程式为 $\text{MNDWI} = (\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR}})$ 。该方法不仅能够有效防止将建筑用地误认为水体,导致水体面积扩大的问题^[26];还解决了水体提取中阴影难以消除的问题。本文采用MNDWI法对研究河段进行水体提取,采用边缘提取算法对水边线进行提取。

图2给出了采用MNDWI法提取的2019年孟津—高村河段的局部河段水体与原地形在Arcgis中叠置的图像,可以清楚的看出水体与陆地的边界线。根据不同年份提取的水体,均可以在Arcgis的原地形图上叠置,这样可以对比分析黄河下游近20a的河势变化。同时在单波段的卫星遥感影像中,可以清晰地提取心滩所在位置(图3)。

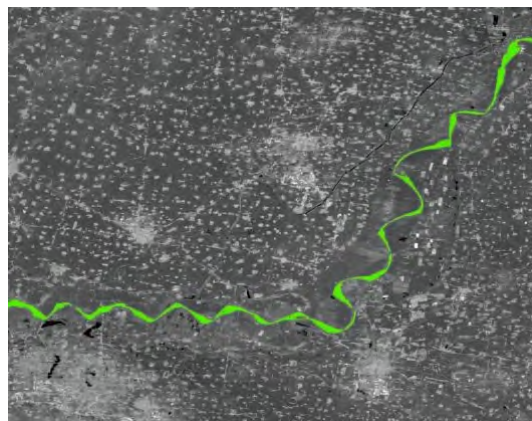


图2 2019年黄河下游游荡段局部河段水体提取

Fig.2 Water body extraction in the wandering section of the Lower Yellow River in 2019

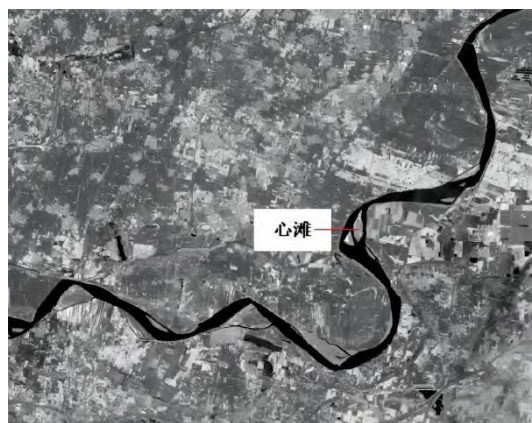


图3 单波段卫星遥感影像

Fig.3 Single-band satellite remote sensing image

3 近20年研究河段河势演变分析

3.1 汛期河道水面宽度变化

为了便于分析,沿程确定南开仪、神堤、秦厂2、破车庄、孙庄、黑石1、三义寨、雷集、马厂和高村等10个河道断面,具体位置见图4。鉴于相邻年份汛期水面宽度变化不明显,为了便于分析,图5仅给出了2001、2007、2014和2020年研究河段的汛期主流水边线。由于选取的4个年份中,汛期只有8月份的卫星遥感影像云量低于5%,因此汛期河道水面宽度仅研究了8月份该河段具有卫星遥感影像的日期。表1给出了各分析断面相应年份的汛期水面宽度。

由图5和表1分析可知:①2001年南开仪断面水面宽度为295 m,三义寨断面水面宽度为217 m,中间断面水面宽度均值为212 m,夹河滩以上河段水面宽度基本处于稳定;主流流经雷集断面后,河道迅速缩窄,水面宽度由雷集断面的405 m降到高村断面的167 m。②2007年较2001年全河段河道处于展宽状态,三义寨断面水面宽度更是由217 m增长到610 m,涨幅181%,原因在于2007年汛期降雨量大,夹河滩附近流量突破4 000 m^3/s ,且持续了15 d,在大流量洪水的持续侧冲下,河岸崩塌,河道展宽。③2014年汛期洪水流量较2007年减小,流量均

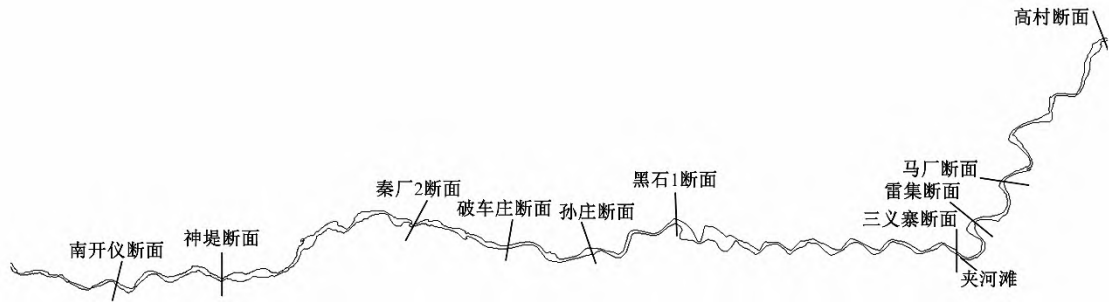


图4 研究河段典型断面

Fig.4 Study typical sections of the river section

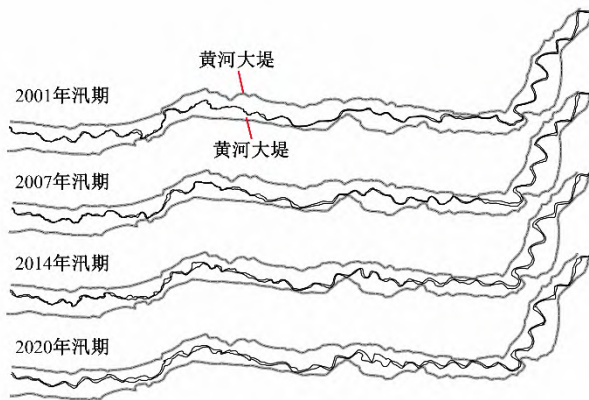


图5 汛期主流水边线

Fig.5 Mainstream waterline during flood season

表1 不同年份断面汛期水面宽度

Tab.1 The width of the water surface during flood season of different years

年份	汛期断面水面宽度/m									
	南开仪	神堤	秦厂2	破车庄	孙庄	黑石1	三义寨	雷集	马厂	高村
2001	295	299	238	185	138	203	217	405	201	167
2007	341	450	544	383	570	221	610	906	769	502
2014	440	500	751	721	427	236	628	1 191	781	541
2020	753	727	771	754	1 253	381	668	1 309	899	545

3.2 汛后主流位置变化

自小浪底水库运行后,黄河下游的来水来沙量在 2001–2020 年总体呈显著减小趋势,年径流量趋于稳定,其对于稳定黄河下游河槽发挥了重要作用。但是分析近 20 年的卫星遥感影像发现黄河下游游荡段的主流位置还是会发生变化。图 6 给出了 2001、2004、2006、2010、2013、2018、2019 和 2020 年提取水体与原地形叠置的图像。分析可知:

(1)汛后河势 2004 年与 2001 年相比,主流在金沟控导处北移 1.6 km(局部放大图见图 7),在驾部控导处东移 1.2 km 使驾部控导脱河;桃花峪–黑岗口段河势基本稳定,柳园口附近主流南移 1 km,徐庄村附近下挫 1.2 km;主流流经夹河滩附近主流位置开始来回摆动,先是北移使夹河滩护滩工程逐渐脱河,后南移贴近东坝头控导工程,东坝头–高村段河势趋于稳定。

(2)汛后河势 2006 年与 2010 年相比,孟津–桃花峪河段河势相对稳定,河流流经花园口位置开始发生摆动,先是南移 1 km 使保合寨险工逐渐靠河,后北移 1.5 km 使花园口险工逐渐脱河;在赵口险工处南移 1.6 km;流至九堡下延附近时,由于惯性,

值为 $2\,310\text{ m}^3/\text{s}$,河道展宽,但涨幅不大;孙庄断面具有特殊性,2014 年的水面宽度较 2007 年减小,原因在于 2014 年该断面南岸的边滩与河岸连为一体,导致水面宽度减小。④2020 年分析断面河道水面宽度涨幅较大,孙庄断面更是由 427 m 增加到 1 253 m,增加了 193 %,原因在于 2020 从 6 月底开始持续降雨,小浪底水库出库流量峰值达到 $5\,880\text{ m}^3/\text{s}$,花园口、夹河滩和高村水文站测出流量均不低于 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。⑤总体来看,2001–2020 河道逐渐展宽,并且随着水量同增同减,孟津–夹河滩河段河道展宽明显,夹河滩–高村河段河道宽度变化较为稳定;在同一个年份,南开仪断面至三义寨断面水面宽度趋近稳定,流经雷集断面后水面宽度迅速缩窄。

主流在弯曲处持续冲刷凹岸一侧的河岸,使得凹岸向陆地方向“后退”,凸岸不断向河流一侧凸出,导致河流的弯曲程度越来越大,进而形成了牛轭湖;在开封黄河大桥的西侧,原来的牛轭湖逐渐消失;开封黄河大桥–高村段趋于稳定。

(3)汛后河势 2013 年与 2018 年相比,孟津–九堡下延段河势基本稳定,九堡下延–徐庄护滩段主流位置变化不大,但汛期水面宽度明显变窄;黑岗口和柳园口附近主流分别向东偏移 1 km 和 1.1 km;主流流经欧坦控导工程时下挫,使欧坦控导工程靠河,流经夹河滩护滩工程时向北出溜 0.6 km;夹河滩–高村段较为稳定,但在山东魏寨村向东偏移 0.7 km。

(4)2019 和 2020 是大水年份,河势变化较为明显。汛后河势 2019 年与 2020 年相比,主流流至裴峪控导时下挫 0.8 km 使工程靠河,在东安控导处主流缩窄;流至花园口上游 6 km 分成两股于花园口汇聚,流经马渡险工时主流下挫 0.9 km;在经过武庄控导工程时,主流又分成两股,但由于工程的导流作用,向下游出溜时又汇聚成一股;主流在三官庙控导工程位置处东移 0.4 km,使三官庙控导工程靠河;韦滩控导工程在 2019 年处于完全脱河状态,但在 2020 年主流下挫 3 km 使工程重新靠河;在

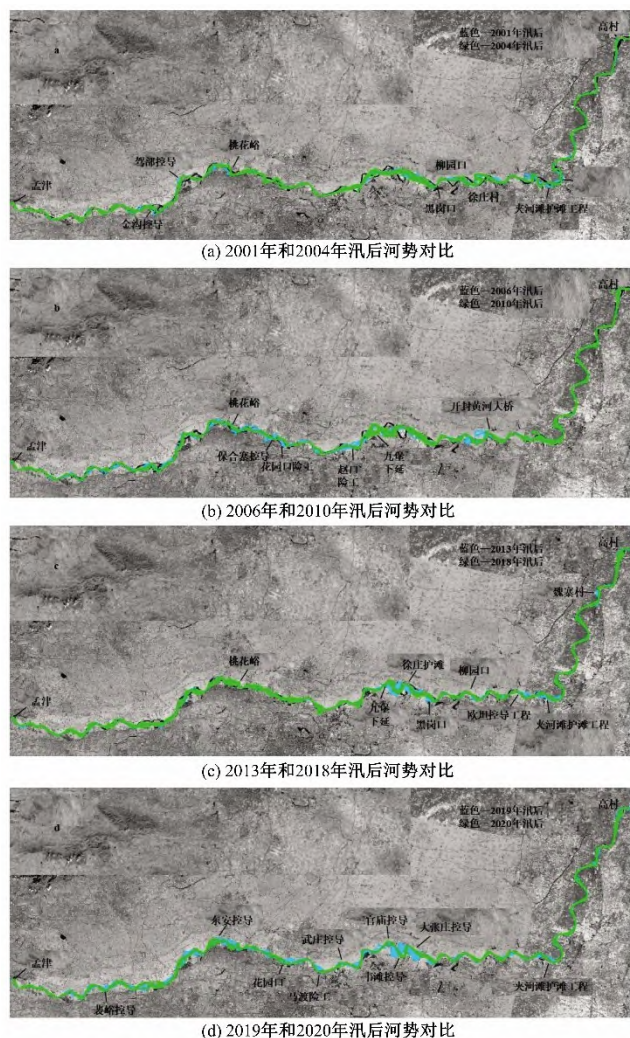


图6 黄河下游游荡段河势变化

Fig.6 Changes in river potential in the wandering section of the lower reaches of the Yellow River

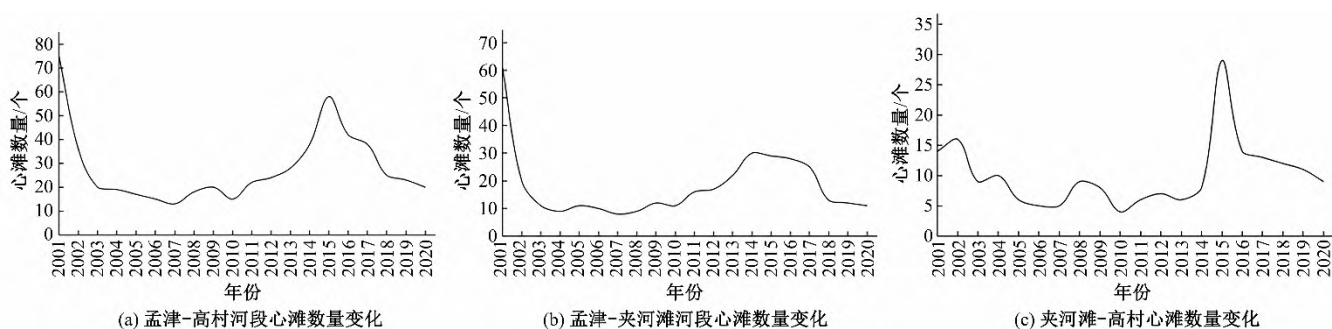


图8 黄河下游游荡段心滩数量变化

Fig.8 Changes in the number of mid-channel beaches in the wandering section of Lower Yellow River

同时通过单波段卫星影像还可清楚的看出心滩数量在主流曲率过大或者在主流方向改变的位置发生变化。图9给出了2013和2019年夹河滩附近灰度图。分析可知:2013年曹岗控导工程和夹河滩护滩工程附近存在个别心滩,由于主流方向发生改变,这两处附近的心滩在2019年消失;在禅房控导工程处,主流流经此处曲率过大,2019年较2013年衍生出新的滩心。

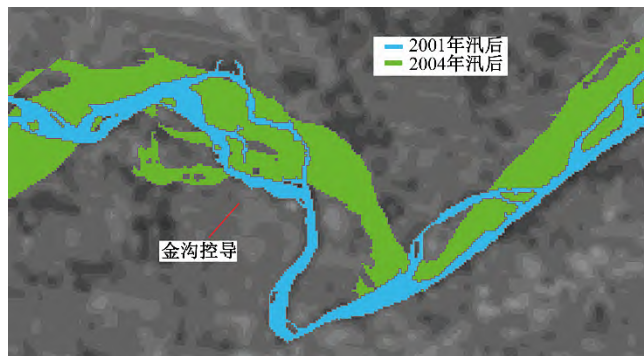


图7 金沟控导处河势变化局部放大图

Fig.7 Local magnification of the change of the river regime at the control guide of the gold gully

经过大张庄控导时,主流北移1.3 km;在夹河滩护滩工程下挫0.6 km后河势趋于稳定。总体来说,孟津—夹河滩段河势变化复杂,夹河滩—高村段河势归于稳定。

3.3 汛后心滩数量变化

黄河下游河道主槽内存在大小不一的心滩。图8给出了采用单波段影像得到的2001—2020年研究河段汛后的心滩数量。分析可知:①小浪底水库运行后,心滩数量由2001年的75个锐减到2007年的13个,2007—2015年数量逐步增加,2015年之后水量颇丰,该河段水位增高,心滩数量又逐步减小。心滩数量的减少不仅因为水位的增高,导致淹没,还因为水流的持续冲刷,导致心滩完全消失。总体来看,整个河段的心滩数量在河道稳定的基础上呈先减少后增加再减少的趋势。②孟津—夹河滩河段河势变化复杂,心滩数量的变化趋势与整个河段变化趋势相一致,也呈先减后增再减的趋势;夹河滩—高村河段河势稳定,汛后心滩数量也基本稳定,维持在4~16之间;但在2015年心滩数量陡增至29个,原因在于2015年汛期流量较小,属于小水年份,高村水文站测得日均流量仅为 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

4 影响因素分析

4.1 河床组成变化

小浪底水库运行之后,河床泥沙粒径发生了变化,小浪底水库运行前花园口、夹河滩、高村3个断面处的河床泥沙中值粒径 d_{50} 均在 0.095 mm 以下,但其运行后中值粒径 d_{50} 均超过 0.095 mm ,尤其是花园口断面处达到了 0.213 mm ,泥沙粗化明显。

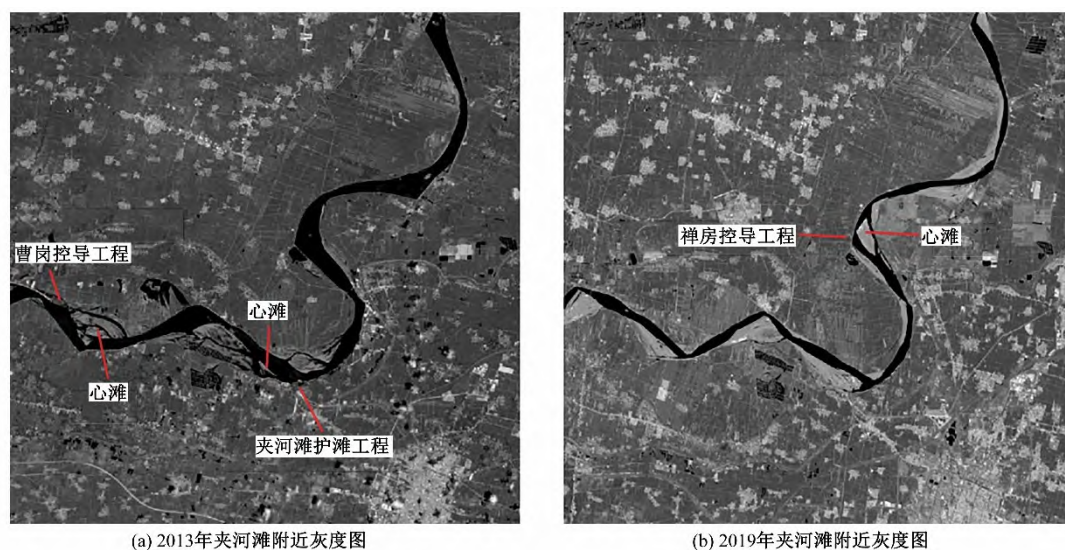


图9 夹河滩附近灰度图

Fig.9 Grayscale map near the river beach

4.2 来水来沙条件

受上中游水土保持减沙和小浪底水库等控制性枢纽工程蓄水拦沙等因素的共同影响,近年来进入黄河下游游荡段的泥沙急剧减少,河道冲刷明显。以小浪底、黑石关、武陟3站之和为代表,小浪底水库运行前,进入黄河下游的年均水量为278亿 m^3 ,年均来沙量约7.6亿t;其运行后,年均水量为256亿 m^3 ,年均来沙量为0.88亿t,年均来沙量显著减少。由冲淤变化分析可知,小浪底水库蓄水后,黄河下游游荡段由持续淤积变成持续冲刷,在1999–2015年,游荡段冲刷量累计13.38亿 m^3 ,达整个下游冲刷量的73%,对游荡段的河势演变起关键作用。

同时大洪水对河床的塑造也有一定作用,主要是因为大洪水对河道的冲刷作用强。其对河道演变的影响主要体现在两个方面:①大洪水来临会造成滩岸崩塌;②大洪水对河道的冲刷导致游荡段河道下切,改变水流流路。

2018–2020年雨水颇丰,以小浪底水文站的出库流量为典型代表,2018年最大出库流量4310 m^3/s ,2019年最大出库流量4970 m^3/s ,2020年最大出库流量5680 m^3/s 。这些大水的造床作用显著,在一定程度上起到了加快近期河道冲刷下切的作用。

4.3 人类活动

黄河下游游荡段河势演变很大程度上受到人工修建护滩工程、控导工程的影响。如游荡段北岸沿岸建有北裹头护滩、徐庄护滩等护滩工程,南岸有夹河滩护滩等以控制水流流路,对岸线的稳定起着重要作用。

另外,控导工程包括双井控导、武庄控导、毛庵控导及金沟控导等,这些工程的修建使得主流摆幅减小。总之,人类活动对河势的控制起到了一定积极作用,人工修建护滩工程、控导工程等工程使河势的稳定进一步增强。

5 结 论

(1)小浪底水库运行以来,进入黄河下游的水量减小,在中

小水作用下,河槽冲刷明显。由卫星遥感影像提取的黄河下游河道水边线可以看出,在水量减小的情况下,水面宽度总体上却是逐年增加的,原因在于小浪底水库改变了进入下游的水沙过程,下游河道由持续淤积状态转而进入持续冲刷状态,持续的冲刷不仅会导致河道的冲深下切,也会导致横向展宽。雷集断面的水面宽度更是从2001年的405m增加到2020年的1309m,增长了223%。主流流经雷集断面后,水面宽度迅速缩窄,这对黄河下游的岸滩治理具有指导作用。

(2)利用MNDWI法对黄河下游游荡段进行水体提取,可以有效分析近20年的主流变化。主流的变化方向一般有3种规律:①主流位置不变,原因很大程度上取决于其河底板块较为稳定,不会出现断层;②主流位置向同一方向移动,岸边建设的控导工程对河流的有控制导流的作用,拦河坝的建设也可限制河流的流向;③主流位置迁徙不定,该变化既受自然演变的影响,也与人类的生产活动有密切关系。

(3)通过Landsat-TM/ETM/OLI遥感影像,可以准确看出黄河下游心滩位置,统计出心滩数量。总体上黄河下游游荡段心滩数量,2001–2007年逐年减小,2007–2015年逐年增多,2015–2021年逐年减小。2015年之后,汛期降雨量增多,甚至出现编号洪水,黄河水位增高,心滩减少。在遥感影像上不难看出,在主流曲率过大或主流方向改变的地方,心滩的变化也比顺直河道上的大,今后应密切关注河型突变处的心滩变化。

参考文献:

- [1] LIU Y H, WANG Y J, JIANG E H. Stability index for the planview morphology of alluvial rivers and a case study of the Lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2021, 389: 107–107 853.
- [2] YANG Z F, YAN Y, LIU Q. Assessment of the flow regime alterations in the Lower Yellow River, China[J]. Ecological Informatics, 2012, 10: 56–64.
- [3] WANG F, ZHAO G, MU X, et al. Regime shift identification of runoff and sediment loads in the Yellow River Basin, China[J]. Water, 2014, 6(10): 3 012–3 032.

- [4] 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 L Z, DONG Q H, WAN Q. Study on the evolutional law and the river training measures of the freakish river regime in the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2015, 37(11): 32-35.
- [5] 刘月兰. 黄河下游游荡性河段整治对河道冲淤的影响[J]. 人民黄河, 1996(10): 23-26.
LIU Y L. The impact of wandering river section remediation on river channel dredging in the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 1996(10): 23-26.
- [6] 戈向阳,夏军强,周美蓉,等. 黄河下游游荡段非均匀悬沙输移特点[J]. 水力发电学报, 2021, 40(4): 14-24.
GE X Y, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Characteristics of non-uniform sediment transport in braided reach of the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(4): 14-24.
- [7] 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 M Q, GUO Y F, WANG L P. River Regulation Scheme for Jiubao-Weitan Reach of Lower Yellow River [J]. Yellow River, 2019, 41(1): 34-36.
- [8] 李云驹,王志飞,马浩录,等. 基于RS与GIS的黄河下游河势演变分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 23-26.
LI Y J, WANG Z F, MA H L, et al. Analysis of river potential evolution in the Lower Yellow River based on RS and GIS [J]. Yellow River, 2009, 31(4): 23-26.
- [9] COHEN W B, GOWARD S N. Landsat's role in ecological applications of remote sensing[J]. Bioscience, 2004, 54(6): 535-545.
- [10] 邓开元,任 超. 多光谱光学遥感影像水体提取模型[J]. 测绘学报, 2021, 50(10): 1 370-1 379.
DENG K Y, REN C. Water extraction model of multispectral optical remote sensing image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10): 1 370-1 379.
- [11] TIAN S M, WANG W H, XIE B F, et al. Fluvial processes of the downstream reaches of the reservoirs in the Lower Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9): 1 321-1 336.
- [12] XIE Z H, HUANG H Q, YU G A, et al. Quantifying the effects of dramatic changes in runoff and sediment on the channel morphology of a large, wandering river using remote sensing images[J]. Water, 2018, 10(12): 1 767.
- [13] GUO Q C, HU C H, TAKEUCHI K, et al. Numerical modeling of hyper-concentrated sediment transport in the lower Yellow River [J]. Journal of hydraulic research, 2008, 46(5): 659-667.
- [14] WU B S, XIA J Q, FU X D, et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 2008, 33(10): 1 585-1 601.
- [15] KONG D X, MIAO C Y, DUAN Q Y, et al. Xiaolangdi Dam: A valve for streamflow extremes on the lower Yellow River[J]. Journal of Hydrology, 2022, 606: 127 426.
- [16] 陆康康,狄 瑞,高 伟,等. 基于阈值分割法增加识别点提高图像识别准确率的研究[J]. 江苏理工学院学报, 2019, 25(2): 54-57.
LU K K, DI R, GAO W, et al. Research on increasing identifica-
- tion points to improve the accuracy of the image recognition based on threshold segmentation[J]. Journal of Jiangsu University of Technology, 2019, 25(2): 54-57.
- [17] 邱煌奥,程朋根,甘田红,等. 多光谱遥感影像湿地水体提取方法综述[J]. 江西科学, 2016, 34(1): 60-65+144.
QIU H A, CHENG P G, GAN T H, et al. Review on the methods for water extraction of wetland from multi-spectral remote sensing image[J]. Jiangxi Science, 2016, 34(1): 60-65+144.
- [18] 刘玉梅. 不同水体提取方法的提取效果比较[J]. 陕西水利, 2021(11): 104-106.
LIU Y M. Comparison of extraction effects of different water extraction methods[J]. Shaanxi Water Resources, 2021(11): 104-106.
- [19] 赵 哲,况润元,廖启卿. 基于Landsat 8影像的赣抚尾闾区水体提取研究[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(2): 97-100.
ZHAO Z, KUANG R Y, LIAO Q Q. Study on the water extraction based on Landsat 8 Imagery in the area of Tail-streams of Gan River and Fu River[J]. Journal of Geomatics, 2019, 44(2): 97-100.
- [20] 郭恒亮,张赫菲,赫晓慧,等. 基于高分二号卫星面向对象的城区周边水体提取方法[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 35-38+34.
GUO H L, ZHANG H F, HE X H, et al. Object-oriented urban peri-urban water extraction method based on Gaofen-2 satellite[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1): 35-38+34.
- [21] 赵程铭,董晓华,薄会娟,等. 基于GF-1影像的山区河道丰、枯水期水体提取方法改进[J]. 中国农村水利水电, 2022(9): 155-161.
ZHAO C M, DONG X H, BO H J, et al. Improving water body extraction method in a mountainous river in wet and dry seasons based on GF-1 Images [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(9): 155-161.
- [22] 汪承平,何孟琦,王建雄. 富营养化水体信息提取新方法[J]. 中国农村水利水电, 2022(8): 23-28+34.
WANG C P, HE M Q, WANG J X. A new method of information extraction of eutrophic water body [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(8): 23-28+34.
- [23] 周 石,李英冰. 2006-2020年南四湖水体面积变化分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(9): 38-43+47.
ZHOU S, LI Y B. Water extraction and change analysis of nansihu based on landsat [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(9): 38-43+47.
- [24] 毛转梅,刘 青,彭尔瑞,等. 基于NEWI模型的典型岩溶区普者黑流域水体信息提取[J]. 中国农村水利水电, 2021(1): 71-75.
MAO Z M, LIU Q, PENG E R, et al. Puzhehei River Basin water body information extraction based on the typical karst area of NEWI Model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(1): 71-75.
- [25] 徐涵秋. 水体遥感指数研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 613-625.
XU H Q. Development of remote sensing water indices: a review [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science, 2021, 49(5): 613-625.
- [26] 梁忠壮,孟令奎,谢文君,等. 基于卷积神经网络的城市水体提取方法研究[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(2): 36-39.
LIANG Z Z, MENG L K, XIE W J, et al. Research on convolutional neural networks for urban water body extraction [J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(2): 36-39.