

持续冲刷期内黄河下游河床演变特点分析

高璐¹, 徐向舟¹, 张红武²

(1. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:基于2006年10月至2018年11月黄河下游12个典型断面观测数据,通过分析断面主槽平面形态特征参数变化率及深泓线和主槽中心线的摆动强度,探讨了持续冲刷期内下游河床的调整变化过程及特点。结果表明:黄河下游断面形态调整表现出既有横向展宽又有冲深下切或淤高态势;河床平面摆动促进了断面主槽形态调整,河相系数变化率与深泓线和主槽中心线摆动强度均成正相关关系;来水来沙条件是主槽形态改变的主要驱动力,且可引起局部河段深泓线摆动强度增大。通过调整小浪底水库的运行模式及布设控导工程可进一步塑造并维持稳定的黄河下游中水河槽。

关键词:黄河下游;河床冲刷;主槽断面形态;平面形态;水沙变化

中图分类号:TV147⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)03-0073-07

Characteristics of channel adjustment in Lower Yellow River during continuously scouring period//GAO Lu¹, XU Xiangzhou¹, ZHANG Hongwu² (1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the data of 12 representative cross-sections in the Lower Yellow River from October 2006 to November 2018, the adjustment process and characteristics of downstream riverbeds during the continuously scouring period is investigated by analyzing the variation rates of the morphology characteristic parameters of the main channel and the migration intensity of the thalweg and the centerline. The results show that the morphological adjustment of the Lower Yellow River has exhibited a diversity with both lateral widening and vertical scouring or depositing in recent years. The riverbed migration has promoted the adjustment of the cross-sectional morphology of the main channel. The rate of change in cross-sectional geomorphic coefficient was positively correlated with the migration intensity of the thalweg and the main channel centerline. Furthermore, water-sediment condition is the main contributor to the changes in the main channel morphology, causing an increase in the migration intensity of the thalweg in local reach. Hence, a stable medium-size river channel of the Lower Yellow River will be further shaped and maintained when the operation mode of the Xiaolangdi Reservoir is adjusted and the reasonable river control work is established.

Key words: Lower Yellow River; channel erosion; cross-sectional morphology in main channel; planform morphology; change in water-sediment conditions

冲积河流属于平衡系统,其内部形态会对输入变量做出响应,即系统中河道断面形态会根据来水来沙条件进行调整^[1]。在冲积河流上修建大型水库后,由于来水来沙条件变异,下游河段发生趋势性冲淤调整,河道断面形态发生显著改变^[2]。水沙组合的多样性决定了河床平面和河道断面形态变化的复杂性,这种河道断面形态变化基本包含了下切的共性过程,而在横向上则表现为展宽或缩窄的动态变化^[3]。同时,由于联动效应,激发了河道深泓线以及主槽中心线摆动,进一步促成了河道横向变形^[4]。因此,掌握新水沙条件下的河床演变趋势及

规律,可为研究冲积河流河床稳定性以及河道防洪减灾提供参考。

小浪底水库以蓄水拦沙为主,自运用以来,通过水库拦沙和调水调沙使得下游河道发生持续冲刷^[5],因此当前关注的主要是黄河下游来水来沙减少后的冲刷效应。近年来学者们针对黄河下游河床演变规律开展了多项研究,探讨了不同时期、不同水沙条件下河道断面形态的变化过程、调整规律以及演变机理,发现在持续冲刷期内,黄河下游河段调整总体表现为向窄深方向发展^[1,6]。平滩河槽形态参数的变化与各种表征来水来沙条件的指标密切相

基金项目:国家自然科学基金项目(52379060);国家重点研发计划项目(2016YFC0402504)

作者简介:高璐(1991—),女,博士研究生,主要从事水土保持与可持续发展研究。E-mail: gao_lu@mail.dlut.edu.cn

通信作者:徐向舟(1969—),男,教授,博士,主要从事水土保持与可持续发展研究。E-mail: xzxu@dlut.edu.cn

关,如流量、含沙量、水流冲刷强度、来沙系数等,且断面形态调整受到多年水沙条件的累积影响^[1,4,6-7]。在持续冲刷期内,主槽和深泓线摆动能在一定程度上反映河段河势演变规律,深泓线摆动不定直接呈现出河道游荡性变化特征^[8],而主槽摆动对沿岸岸坡的影响较大,甚至可能危及黄河下游滩区及大堤安全^[9]。已有研究表明,河道深泓线和主槽中心线摆动方向具有往复性^[4],汛期来沙系数变化对迁移强度起主导作用^[10],而两者的表现还与包含当年在内的前两年平均水流冲刷强度成幂函数关系^[11]。此外,黄河下游河道内修建的大量河道整治工程对河道断面形态有明显的改善作用^[12],然而单岸交替修建工程的方式造成了河道两岸可动性差异较大,使得下游河道调整规律更为复杂^[13]。

已有研究主要侧重于大尺度下的游荡型河段或整个黄河下游断面形态的调整方式,或者分析主槽及深泓线的摆动规律,而忽略了对河床调整相对剧烈的局部河段的重点关注,且未明晰河床内部断面与平面形态调整之间的动态响应机制。因此,本文以黄河下游多期断面地形资料为基础,从黄河下游宏观分析到聚焦重点研究河段,多角度剖析持续冲刷期内的黄河下游河床形态变化特征,根据深泓线和主槽中心线的摆动规律,探究河床平面摆动与断面主槽形态改变的内在联系,结合黄河下游水沙及其他条件的变化,厘清近年来影响黄河下游河床演变的主要影响因素。

1 研究断面及数据来源

黄河下游(图 1)包含游荡型、过渡型及限制性弯曲型 3 种河型单元。根据不同河型单元的特点,选择 12 个典型断面进行分析,其中包含 5 个水文站测验断面,分别为代表游荡型河段的花园口和夹河滩断面、代表过渡型河段的高村断面和代表限制性弯曲型河段的艾山和利津断面。由于在持续冲刷期内游荡型河段断面调整剧烈,为更详细阐述此河型单元的河床变化特点,另选择了位于老君堂河段(长度为 11 km)的 7 个淤积测验断面。老君堂河段位于东明河段中,该河段常年受水流严重淘刷,河势变化散乱不定。由于单一断面的形态变化无法完全反映整个河道的动态调整特点,本文在河段尺度下,重点关注老君堂河段的河床调整模式。

根据 2005—2020 年《黄河泥沙公报》,在 2005 年黄河下游调水调沙正式转入生产运用后,2006 年黄河下游河道主槽最小平滩流量提高至 3 500 m³/s,至 2018 年黄河下游干流河道持续发生冲刷,而 2019 年出现近年来第一次淤积,主要淤积

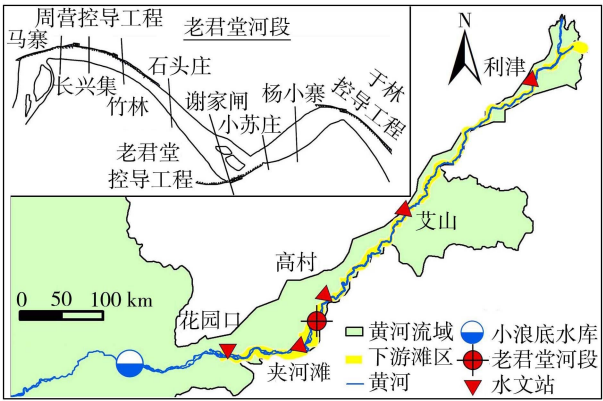


图 1 黄河下游及典型断面位置示意图

在高村断面以上河段,随后在 2020 年和 2021 年下游恢复冲刷,但 2022 年又表现为淤积,因此本文选择 2006 年 10 月至 2018 年 11 月(以下简称“2006—2018 年”)为研究时段。黄河下游断面数据为黄河水利委员会测量所得,径流量、输沙量及中值粒径数据来源于 2006—2018 年《黄河泥沙公报》。根据左右滩唇点的位置和高程值确定主槽位置以及平滩水位(Z)和平滩河宽(W),计算平滩水位下主槽平滩面积(A)、平滩水深($H = A/W$)和河相系数($\xi = W^{0.5}/H$)。河床平面形态变化包含了河道主槽中心线和深泓线的摆动分析,其中,主槽中心线是指各断面在平滩水位下主槽中心点连线,深泓线是指各断面主槽最深处,即深泓点的连线,断面主槽中心点偏移位移(Δb_c)指上一年和当年主槽中心点横坐标相减,深泓点的偏移位移(Δb_l)的计算同理,向左偏移为负,向右偏移为正。河床横向摆动强度(M)定义为 $M = 2|\Delta b|/(W_1 + W_2)$,其中 Δb 为河床横向偏移位移,可为 Δb_c 或 Δb_l , W_1 、 W_2 分别为上一年和当年的平滩河宽。深泓点位置采用深泓点距左岸距离与平滩河宽的比值表示。本文中滩槽最大高差指平滩高程与深泓点高程之差。河段尺度下的平滩特征参数和河床平面调整参数均采用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计算^[9]。水流冲刷强度(F)可代表上游来水来沙条件,定义为 $F = (Q^2/S)/10^4$,其中 Q 、 S 分别为各水文站年均流量和含沙量。

2 河床调整变化特点

2.1 河床断面形态调整

由于黄河下游复杂的河床演变特点,2006—2018 年在平滩水位下各断面主槽形态发生较大的调整且变化幅度不同(表 1)。黄河下游断面调整模式既有横向展宽又有冲深下切或淤高,典型断面的平滩河宽、平滩水深、平滩面积的平均变化率分别为

45%、34%和83%，大部分典型断面的河相系数呈减小态势。虽然近年来黄河下游平滩河宽由于滩岸崩塌严重而不断拓宽，但总体上平滩水深增加的幅度远超过平滩河宽拓宽的幅度，因此大部分断面表现出以冲深下切为主的调整模式。另外，在游荡型河段中还存在4个典型断面的河相系数呈增加态势，说明从断面角度分析游荡型河段占主导的调整模式并不统一。进一步剖析典型断面在2012年10月至2018年11月(以下简称“2012—2018年”)的河相系数变化发现，所有断面均向窄深发展。小浪底水库运用后，深泓点高程普遍降低，最大冲深超过6 m，位于马寨断面，主槽形状在U形和V形之间不断转变。根据观测数据统计，2006—2018年间花园口—夹河滩河段、夹河滩—高村河段、高村—艾山河段以及艾山—利津河段的累积冲刷量分别为4.08亿、2.08亿、2.41亿、1.51亿 m³^[14]，说明黄河下游游荡型河段断面受水流侵蚀最为严重。结合典型断面的平滩特征参数变化率(表1)，证明了游荡型河段的主槽形态调整幅度明显高于过渡型和限制性弯曲型河段，在持续冲刷阶段限制性弯曲型河段断面形态可塑性较小，河势相对稳定。

表1 典型断面平滩特征参数变化率 单位: %

断 面	平滩河宽 变化率	平滩水深 变化率	平滩面积 变化率	河相系数 变化率
花园口	33	-14	15	34
夹河滩	66	119	265	-41
马 寨	2	49	52	-32
长兴集	7	43	52	-28
竹 林	27	8	38	4
石头庄	13	49	69	-29
谢家闸	226	-5	208	91
小苏庄	25	12	40	0
杨小寨	137	4	147	48
高 村	3	54	58	-34
艾 山	1	33	35	-25
利 津	1	14	15	-12
平均值	45	34	83	31

从河段尺度对主槽平滩形态变化进行分析更能掌握整个河段的变化趋势。以调整幅度较大的游荡型河段为例，选择该河段中的老君堂河段(表2)进行重点分析发现，2006年10月至2012年10月(以下简称“2006—2012年”)是老君堂河段横向展宽最为剧烈的时期，拓宽幅度达到45%；平滩水深则表现为先减小后增加的变化趋势，2006—2018年平滩水深增加了0.73 m；平滩面积扩增82%，河相系数由6.31(2006年10月)扩大至8.23(2012年10月)又减小为6.59(2018年11月)，断面形态呈先宽浅后转向窄深发展。随着小浪底水库运用的年份增加，横向展宽的趋势逐渐变弱，垂向冲深的趋势加强。综上

所述，在持续冲刷作用下，黄河下游横向展宽过程虽然突出，但整体上河床逐步向窄深方向发展。

表2 老君堂河段平滩特征参数变化

时间	平滩河宽/m	平滩水深/m	平滩面积/m ²	河相系数
2006年4月	554.97	3.78	2 096.46	6.24
2006年10月	612.01	3.92	2 398.32	6.31
2012年10月	887.36	3.62	3 212.38	8.23
2014年4月	909.01	3.90	3 540.73	7.74
2018年4月	929.74	4.41	4 097.05	6.92
2018年11月	937.57	4.65	4 355.60	6.59

2.2 河床平面形态调整

掌握主槽中心线摆动规律可以摸清河段在空间上的迁移变化特点。通过对黄河下游典型断面主槽中心点摆动强度(表3)分析表明，各断面主槽中心点摆动强度存在差异，2006—2018年间典型断面最大摆动强度为0.612，多年平均摆动速率最大为70.22 m/a，位于夹河滩断面。通过表3进一步可知，游荡型河段中花园口—夹河滩河段主槽摆动最为剧烈，随着向下游推进，各断面主槽中心点摆动幅度呈减小趋势。此外，与2006年各断面主槽中心点的初始位置相比，2018年黄河下游限制性弯曲型河段以上河段整体向左偏移，而限制性弯曲型河段则向右微幅摆动。老君堂河段在2012年前中心线摆动强度为0.07，而之后仅约为0.01。已有研究表明，小浪底水库的蓄水拦沙作用导致下游河床床沙粗化，增强了河床的自身抗冲能力，削弱了水流塑造河床的能力，促使主槽摆动强度相应减小^[10]。在黄河下游，主槽一侧的生产堤或控导工程限制了主槽在冲刷时期的展宽行为，主槽的展宽只能在单侧滩地进行^[7]，因此，主槽中心线摆动强度的变化规律与平滩河宽相同，均在2012年后摆动幅度减弱。

表3 2006—2018年典型断面主槽中心点和深泓点偏移位移和摆动强度

断 面	偏移位移/m		摆动强度	
	中心点	深泓点	中心点	深泓点
花园口	-307.51	579.00	0.140	0.264
夹河滩	-842.64	-1 158.00	0.612	0.840
马 寨	4.93	-214.60	0.010	0.433
长兴集	2.25	-102.50	0.004	0.178
竹 林	62.44	2.40	0.129	0.005
石头庄	-32.21	186.90	0.038	0.219
谢家闸	-767.35	-614.20	0.530	0.424
小苏庄	-58.00	-278.00	0.093	0.443
杨小寨	314.39	130.80	0.280	0.117
高 村	-22.53	394.00	0.030	0.524
艾 山	2.01	-1.00	0.005	0.003
利 津	1.65	21.00	0.005	0.060

主流线是决定河势变化的重要因素，而深泓线摆动可以在一定程度上反映河道主流的变化^[15]。通过对不同年份深泓点的迁移位置(图2)进行分析

发现,深泓摆动方向具有往复性,且不同断面之间深泓点的偏移位移相差较大,在 2006—2018 年间典型断面多年平均深泓点摆动速率最大为 96.50 m/a,最大摆动强度高达 0.840。从表 3 中典型断面深泓点摆动强度统计发现,相对于滩岸土体抗冲性较强、控导工程约束力度较大的过渡型和限制性弯曲型河段^[16]而言,游荡型河段由于其河床组成多为易冲的细沙、河道纵比降大、工程约束作用弱^[10]等劣势因素的存在,其 9 个典型断面在 2006—2018 年间深泓点摆动剧烈。此外,进一步对比典型断面主槽中心点和深泓点摆动强度(表 3)可知,断面主槽中心点摆动强度较大的断面,其深泓点横向摆动强度也较大,如夹河滩、谢家闸、杨小寨和花园口断面。相反,深泓点摆动强度较大的断面,如高村、小苏庄、马寨、石头庄和长兴集断面,并没有表现出较大的断面主槽中心点摆动强度,这说明深泓点往往跟随断面主槽中心点一起发生摆动,但深泓点摆动并不会引起断面主槽中心点摆动,两者之间并不具有双向关系。在老君堂河段,2006—2012 年间深泓线摆动强度为 0.06,而 2012—2018 年间深泓线摆动强度为 0.09,深泓线摆动强度越大,河势越不稳定,说明 2012—2018 年间老君堂河段河势变化更为复杂且剧烈。进入老君堂河段内,左岸控导工程对主流控制能力较弱,马寨—长兴集段的深泓线位置始终偏向河道左侧(图 2),下游凸岸受水流直冲,故深泓线向凸岸弯曲;而老君堂控导工程位于谢家闸断面处,通过工程引导以及左岸崩塌使得此处河道弯曲度降低,因此 2018 年石头庄—杨小寨段的深泓线表现出向河道中间移动的趋势。

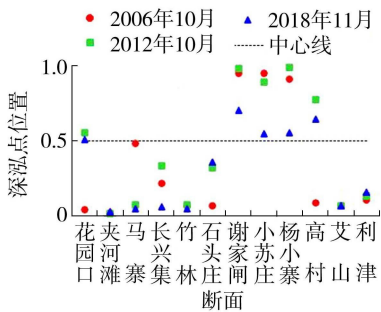


图2 深泓点的横向摆动特征

3 断面形态调整对河床摆动的响应

由于深泓线与水流动力轴线基本一致,而水流动力轴线的变化直接影响到河床冲淤部位的变化,因此深泓点在横向和垂向上的改变直接影响了河道断面的形态发展趋势。在垂向上,深泓点的高程变化改变了滩槽高差,而滩槽高差是影响岸坡稳定的重要因素。2006—2018 年黄河下游整体滩槽最大

高差(图 3)呈显著增加趋势,11 个典型断面滩槽最大高差平均增加 2.52 m,最大增加 6.35 m;谢家闸断面滩槽最大高差呈先上升后下降的变化规律,比 2006 年 10 月减少了 1.08 m,结合该断面地形和水沙数据分析发现,由于水流冲刷强度增强,原本淤积在河床底部的泥沙被冲刷,而 2018 年输沙量为 2006—2018 年的最大值且远超平均水平,加之谢家闸断面所处位置弯曲度较大,因此大量泥沙淤积在凹岸附近,致使初始深泓点位置(图 2)发生改变。利用不同时期老君堂河段的统计数据分析发现,随着滩槽最大高差的增大,平滩河宽也呈增大态势,但增大趋势不显著(决定系数 $R^2=0.40$),如图 4(a)所示。当深泓点位置距离岸坡较近时,深泓点与断面最大流速点的位置基本相当,此时滩岸坡脚由于水力条件增强出现局部垂向冲深,致使滩岸高度变大,土体荷重增加,土体内随之产生超孔隙水压力,引发滩岸向主槽坍塌的现象^[16-17],这说明滩槽最大高差越大,岸坡稳定性越弱,滩岸越容易发生崩塌^[18],进而平滩河宽得到拓展。此外,平滩水深和平滩面积也随滩槽最大高差的增大而增大($R^2=0.80$ 和 $R^2=0.68$),如图 4(b)(c)所示,证明滩槽最大高差的增大,可恢复主槽过流能力,从而降低滩区洪水漫滩概率,缓解滩区防洪压力。

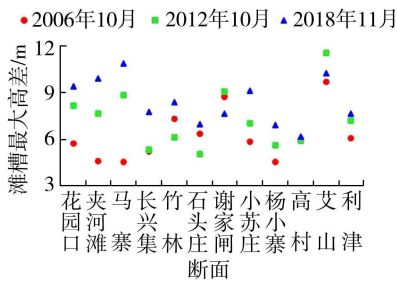


图3 典型断面滩槽最大高差变化

对老君堂河段进一步分析发现,深泓线摆动强度的增大引起了平滩河宽的变大(图 5(a)),决定系数为 0.81。在老君堂河段中,深泓线摆动强度的增加表明了河道主流线不断变迁及河势愈发不稳定。图 2 中老君堂河段中的多个断面在多个时期的深泓点离左岸距离与平滩河宽之比小于 0.1 或者大于 0.9,甚至深泓点离河岸最小距离仅约为 9 m,在往复摆动下深泓点越贴近滩岸,主流对于滩岸的冲刷强度越大,越容易造成滩岸崩退。虽然控导工程对滩岸有保护作用,避免了因为深泓点的靠近而产生大规模的岸线后退,如马寨—竹林段,但工程会将主流挑向对岸,造成下游对岸发生滩岸崩退。本研究中河段尺度下的平滩河宽变化率却随着深泓线摆动强度的增大而降低,虽然 2012—2018 年摆动强度大于 2006—2012 年,但由于 2012—2018 年间主流

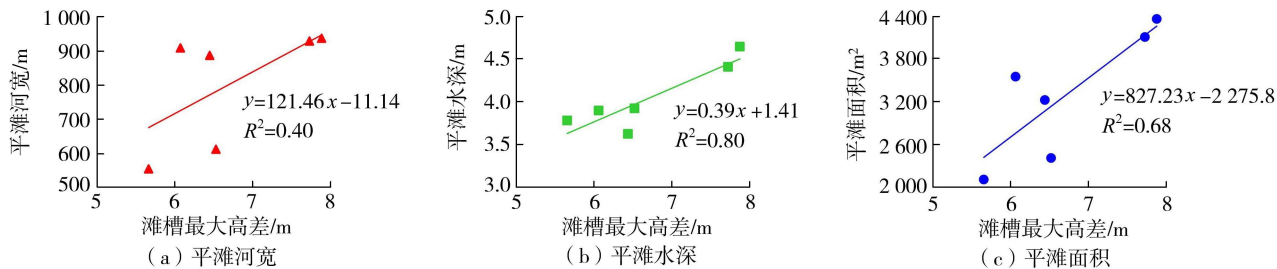


图4 不同时期滩槽最大高差对平滩特征参数的影响

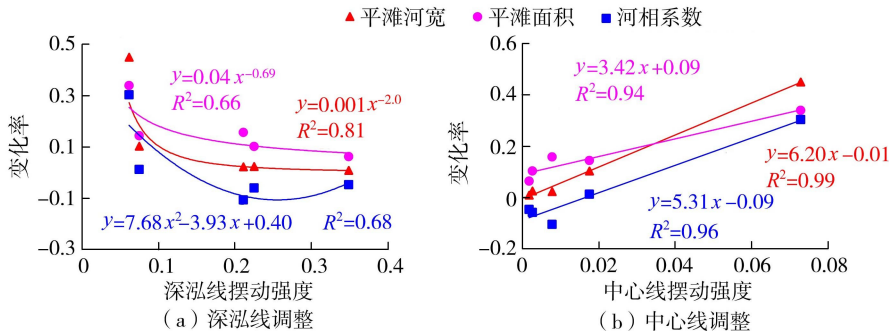


图5 深泓线及中心线调整对平滩特征参数的影响

不断远离滩岸,造成滩岸崩塌的外界驱动力逐渐减弱,崩岸险情得到了缓解。此外,黄河下游不断完善防洪工程体系,极大程度地约束了平滩河宽的拓展范围,因此主槽平滩河宽的增加幅度随之降低。深泓线摆动强度与河相系数变化率之间存在一定相关性($R^2=0.68$),随着深泓线摆动强度的增加,河相系数变化率与深泓线摆动强度成正相关关系,具体表现为先降低再升高的变化特点,即最终断面向窄深方向发展。综上所述,河道深泓线摆动对河床断面形态调整具有重要的影响作用,是加速断面形态调整的重要推力。

通过分析河道主槽中心线摆动强度与老君堂河段的平滩特征参数发现(图5(b)),中心线摆动强度越大,平滩河宽($R^2=0.99$)、平滩面积($R^2=0.94$)和河相系数($R^2=0.96$)的变化率越大,说明中心线摆动是断面平滩主槽形态发生剧烈变化的重要表现形式。由于河流在弯曲河段存在“凹岸冲刷,凸岸淤积”的现象,而这种横向演变现象,进一步造成了主流和中心线摆动不定,加剧了下游河段河势游荡性变化^[8]。通过上述分析还发现,平滩面积是对滩槽最大高差变化和深泓线以及中心线摆动响应最为敏感的参数,表明平滩面积的变化可以直接反映河势变化的剧烈程度。

4 河床演变的影响因素

河床形态调整特点取决于来水来沙条件和河床边界条件的变化^[19]。黄河下游土体抗冲刷性较弱,但限制性弯曲型河段明显强于游荡型河段,并且已

有整治工程对于限制性弯曲型河段的约束性也强于游荡型河段^[16],因此限制性弯曲型河段河床形态变化幅度较上游相对较小。对下游花园口、高村、艾山和利津水文站的年均中值粒径进行统计发现,1987—2000年的黄河下游年均中值粒径为0.019 mm,小浪底水库运用后,2006—2018年的多年平均中值粒径的平均值增大至0.023 mm,中值粒径的粗化降低了河床的可冲性,加之河床中细颗粒泥沙补给不足,反而减弱了下游河道冲刷强度,致使主槽摆动强度降低。此外,随着黄河下游整治工程的密度增大,天然河道逐步成为有限控制的约束边界,在河势被有效控制的同时平滩河宽拓宽及主槽摆动幅度和强度等均受到限制^[13]。

水沙条件的改变是诱发黄河下游在持续冲刷阶段河床调整的关键因素。考虑到河床形态对于水沙条件变化的响应存在滞后现象,因此本文采用水流冲刷强度的5 a滑动平均值来反映断面的来水来沙情况。从2006—2018年花园口、高村、艾山和利津各断面5 a平均水流冲刷强度发现,各断面水流冲刷强度均呈上升趋势,且随断面的位置自上而下逐渐变小。由于高村水文站是距离老君堂河段最近的水沙动态监测站,其距离石头庄断面35 km,因此本文以高村水文站的水沙观测数据作为老君堂河段的来水来沙条件,分析老君堂河段的平滩特征参数与5 a平均水流冲刷强度的关系。结果表明,老君堂河段的河相系数与水流冲刷强度成多项式关系($R^2=0.88$)(图6(a)),与平滩面积成线性正相关关系($R^2=0.97$),说明水流冲刷强度越大,河床形态调整幅度越大,即上游来水来沙条件的变化,可以显著地

改变下游河床断面形态。滩岸崩退使平滩河宽增加,但同时崩岸土体又可在下游河床中淤积,因此在水流冲刷强度不断增大的背景下,上游发生的大规模崩岸反而缓解了水流对下游河道的冲深强度,这就是前期河相系数先增大后减小的原因。分析水流冲刷强度对主槽中心线和深泓线摆动强度的影响表明,虽然老君堂河段平面形态极其不稳定,但主槽中心线摆动强度与水流冲刷强度之间的关系不显著($R^2=0.50$),如图6(b)所示,主要是因为近年来黄河下游加大治理后平滩河宽的增幅变小,致使主槽中心线的摆动强度也随之降低,因此水流冲刷强度在横向上的作用并不凸显。相反,深泓线摆动强度随水流冲刷强度的增大而变大($R^2=0.88$)(图6(b)),说明水流冲刷强度的增大引起深泓线摆动强度的变大,造成了老君堂河段的河势不稳定。因此,当水流冲刷强度不断增大至一定程度时,河相系数逐渐变小,平滩河槽形态不断向窄深发展,但由于深泓摆动强度的变大,导致部分河段内部仍然处于不稳定状态中。

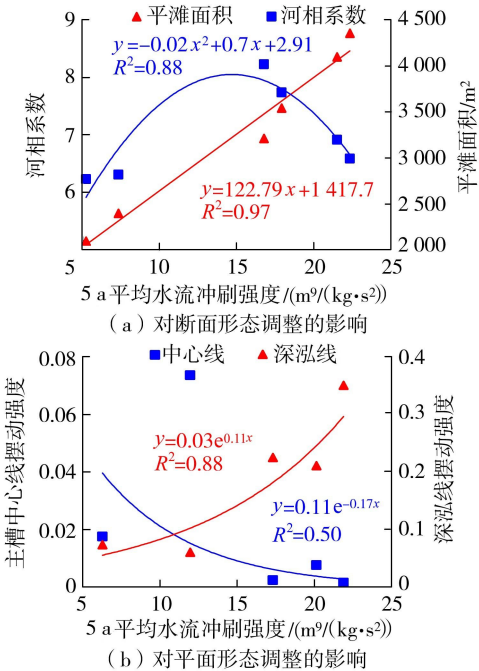


图6 水流冲刷强度对河床调整的影响

对于黄河下游而言,小浪底水库的调水调沙模式直接影响了下游河床在断面及平面上的形态调整,通过再造床过程不断地塑造出新的河床形态,目前黄河下游防洪减淤的效果十分明显。同时,下游河床的演变过程又决定了下一步水库运行管理模式的调整,将在不同的运用条件下继续恢复并维持黄河下游中水河槽稳定。此外,对于局部河势散乱的重点河段,仍需要通过布设新的控导工程或延伸工程去稳定主槽流路,达到固滩护岸的功能,防止出现横河、斜河及水流直冲大堤的情况。

5 结 论

- a. 河床平面摆动是河床断面形态调整的重要推力。深泓点的高程变化,引起黄河下游滩槽最大高差显著变大,从而导致主槽平滩河宽、平滩水深和平滩面积的增加。而深泓线和中心线的横向摆动也进一步促使了主槽河相系数的变化,决定系数分别为0.59和0.96,两者变化率成相反状态变化。平滩面积是对河床摆动响应最为敏感的参数,可直接反映河势的不稳定变化。
- b. 黄河下游典型断面河床形态调整模式为横向展宽伴随着冲深下切或淤高。2006—2012年是黄河下游横向展宽最为剧烈的时期,而2012年之后黄河下游河段向窄深发展,典型断面的主槽平滩河宽、平滩水深和平滩面积的平均变化率分别为45%、34%和83%。游荡型河段的主槽形态调整幅度明显高于过渡型和限制性弯曲型河段,表现出河势相对不稳定的特点。
- c. 河床平面摆动激发了河段的游荡性。随着向下游推进,黄河下游各典型断面主槽中心点和深泓点摆动强度呈减小趋势,最大摆动强度分别为0.612和0.840。断面主槽中心点摆动强度的提高能增大深泓点摆动幅度,引发河势的不稳定,但深泓摆动却不会引起主槽摆动。此外,由于河床摆动的往复性且各断面摆动方向不同,黄河下游河段的游荡性进一步加剧。
- d. 来水来沙条件的改变是影响河床平面形态摆动的重要因素。在持续冲刷期内,水流冲刷强度的递增使得老君堂河段主槽河相系数呈现先变大后变小的趋势($R^2=0.88$),而近年来床沙粗化对主槽摆动起到了抑制作用。老君堂河段的深泓摆动强度则随水流冲刷强度的增加而增加($R^2=0.88$),说明黄河下游河势仍处于不稳定状态中。

参考文献:

[1] 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. (in Chinese))

[2] 陈立,余博闻,许全喜,等. 长江三峡水库坝下游荆江段断面形态冲刷调整成因分析[J]. 工程科学与技术,2023,55(1): 279-286. (CHEN Li, YU Bowen, XU Quanxi, et al. Analysis on the causes of erosion adjustment of cross sections geometry in the Jingjiang Reach downstream Three Gorges Reservoir of the Yangtze River

- [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55 (1): 279-286. (in Chinese))
- [3] 李明, 胡春宏, 方春明. 三峡水库坝下游河道断面形态调整模式与机理研究[J]. 水利学报, 2018, 49 (12): 1439-1450. (LI Ming, HU Chunhong, FANG Chunming. Study on pattern and mechanism of river section topography adjustment in the downstream of the Three Gorges project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (12): 1439-1450. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 张金良, 刘继祥. 黄河泥沙工程控制论[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [6] 王彦君, 吴保生, 钟德钰. 黄河下游主槽断面形态对水沙变化响应过程的模拟[J]. 地理学报, 2020, 75 (7): 1494-1511. (WANG Yanjun, WU Baosheng, ZHONG Deyu. Simulation of the main-channel cross-section geometry of the Lower Yellow River in response to water and sediment changes [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (7): 1494-1511. (in Chinese))
- [7] 李晓娟, 夏军强, 李洁, 等. 黄河下游游荡段持续淤积及冲刷时平滩河槽形态调整规律[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47 (1): 97-104. (LI Xiaojuan, XIA Junqiang, LI Jie, et al. Variation in bankfull channel geometry in the LYR undergoing continuous aggradation and degradation[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47 (1): 97-104. (in Chinese))
- [8] 张金良, 仝亮, 王卿, 等. 黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (2): 41-49. (ZHANG Jinliang, TONG Liang, WANG Qing, et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (2): 41-49. (in Chinese))
- [9] 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. (in Chinese))
- [10] 王建伟, 陈炳瑞, 段连强, 等. 小浪底水库运用对黄河下游深泓线演变的影响[J]. 人民黄河, 2022, 44 (5): 57-60. (WANG Jianwei, CHEN Bingrui, DUAN Lianqiang, et al. Impacts of Xiaolangdi Reservoir on the Thalweg evolution of the Lower Yellow River [J]. Yellow River, 2022, 44 (5): 57-60. (in Chinese))
- [11] XIA Junqiang, WANG Yingzhen, ZHOU Meirong, et al. Variations in channel centerline migration rate and intensity of a braided reach in the Lower Yellow River [J]. Remote Sensing, 2021, 13 (9): 1680.
- [12] 许琳娟, 王森森, 李军华, 等. 河道整治工程对游荡型河道断面形态的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20 (1): 201-208. (XU Linjuan, WANG Sensen, LI Junhua, et al. Influence of river regulation works on the section shape of wandering reach [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20 (1): 201-208. (in Chinese))
- [13] 李军华, 许琳娟, 张向萍, 等. 河道调整研究现状及其对黄河下游游荡型河道调整的启示[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4): 1-6. (LI Junhua, XU Linjuan, ZHANG Xiangping, et al. Current research status of river regulation and its enlightenment to wandering river regulation in the lower reaches of the Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4): 1-6. (in Chinese))
- [14] 申冠卿, 李勇, 张原锋, 等. 小浪底水库拦沙对黄河下游河道的减淤作用[J]. 人民黄河, 2020, 42 (6): 1-6. (SHEN Guanqing, LI Yong, ZHANG Yuanfeng, et al. Sediment trapping by Xiaolangdi Reservoir on deposits reduction in the Lower Yellow River [J]. Yellow River, 2020, 42 (6): 1-6. (in Chinese))
- [15] 夏军强, 周美蓉, 邓珊珊. 长江中游河床演变及模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [16] 李洁, 夏军强, 邓珊珊, 等. 近 30 年黄河下游河道深泓线摆动特点[J]. 水科学进展, 2017, 28 (5): 652-661. (LI Jie, XIA Junqiang, DENG Shanshan, et al. Characteristics of channel thalweg migration in the Lower Yellow River over the past 30 years [J]. Advances in Water Science, 2017, 28 (5): 652-661. (in Chinese))
- [17] 齐臻, 余欣, 孙赞盈, 等. 增大主槽过流能力 淡化生产堤存废之争[J]. 人民黄河, 2010, 32 (1): 14-16. (QI Pu, YU Xin, SUN Zanying, et al. Increase flowing capacity of main channel and weaken the contention on existing or dismantling of production dykes [J]. Yellow River, 2010, 32 (1): 14-16. (in Chinese))
- [18] 孙启航, 夏军强, 周美蓉, 等. 层次分析法在荆江河段崩岸影响因素研究中的应用[J]. 泥沙研究, 2021, 46 (2): 21-28. (SUN Qihang, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Application of analytic hierarchy process in the study of factors affecting bank erosion in the Jingjiang reach [J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46 (2): 21-28. (in Chinese))
- [19] 李晓娟, 夏军强, 张晓雷, 等. 近期黄河下游游荡段平滩河槽形态变化计算[J]. 水力发电学报, 2014, 33 (5): 86-92. (LI Xiaojuan, XIA Junqiang, ZHANG Xiaolei, et al. Recent variations of reach-scale bankfull channel geometry in the braided reach of Lower Yellow River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33 (5): 86-92. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-05-10 编辑: 俞云利)