

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.04.009

汛期与非汛期水沙条件对黄河下游不同河段过流能力的影响

曹玉芹¹, 夏军强¹, 周美蓉¹, 程亦菲¹, 陈建国²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 20世纪80年代以来黄河下游水沙输移特性显著改变, 下游河道经历强来沙作用下的持续淤积与小浪底水库调控下的持续冲刷过程。基于黄河下游1986—2020年实测水沙数据与固定断面地形, 计算了河段尺度的平滩流量, 量化了汛期与非汛期水沙过程对各河段过流能力的相对贡献。结果表明: ①小浪底枢纽运行前水流冲刷强度随时间减弱, 下游河道呈汛期淤积、非汛期冲刷的整体淤积态势, 平滩流量持续减小, 最小过流能力小于 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。②小浪底枢纽运行后水流冲刷强度显著增大, 尤其在非汛期, 对河床冲刷产生重要影响; 各河段过流能力显著恢复, 其中游荡段恢复最为迅速。③各河段平滩流量与前5 a汛期、非汛期平均水流冲刷强度呈良好的幂律关系, 该关系能较好地反映汛期与非汛期累积水沙过程对过流能力的综合影响。④小浪底枢纽运行后, 非汛期水沙条件对平滩流量的贡献率增大, 尤其是对游荡段具有重要影响(占比53%), 对过渡段与弯曲段贡献则较小(占比不到20%)。

关键词: 平滩流量; 水沙条件; 非汛期; 汛期; 不同河型; 黄河下游

中图分类号: TV143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)04-0617-12

水少沙多、水沙关系不协调是黄河下游输水输沙通道不畅的症结所在。1986年以来, 受气候变化与人类活动的共同影响, 黄河流域产水产沙特性呈阶段性变化^[1-2], 直接影响下游河道冲淤状态, 河床形态不断调整重塑, 强烈改变了河道过流能力。小浪底枢纽运行前, 黄河下游持续淤积, 主槽萎缩, 过流能力降低, 严重威胁下游防洪安全。小浪底枢纽运行后, 控制了流域90%以上的来沙量^[3], 下游主槽实现全线冲刷, 河道输水输沙能力显著提高。进一步研究近30 a来持续淤积与持续冲刷过程中黄河下游河道过流能力的调整规律, 量化汛期与非汛期水沙条件对不同河段平滩流量的影响, 能够更好地理解黄河下游输水输沙通道的动态变化, 为上游水库水沙调控体系的完善与下游河道的防汛安全提供重要参考。

以往学者基于实测水沙数据及断面地形资料, 采用平滩流量、平滩河槽形态、洪水水位等各类指标, 对黄河下游河道断面或河段尺度过流能力的调整规律进行了大量研究。平滩流量是代表河道排洪输沙能力的常用指标, 如Hu等^[4]、王远见等^[5]分别针对黄河下游持续淤积过程与近60 a冲淤过程分析了平滩流量的变化趋势; He^[6]提出了采用最大宽度和有效宽度系数计算断面平滩流量的新方法, 分析了断面平滩流量在洪水期的变化特点, 这类分析均是基于各水文断面开展的。徐国宾等^[7]针对河道持续冲刷过程, 分析了2次调水调沙试验对平滩流量的恢复作用, 计算河段平滩流量时采用了河段平均冲淤情况框算法以及上下水文站断面平均法, 不能完全反映河段平滩流量的实际调整情况。刘晓燕等^[8]分析了平滩流量对输沙效率和冲刷效率的影响, 提出了恢复与维持黄河下游过流能力的平滩流量标准; 胡春宏等^[9]则进一步健全了黄河流域水沙平衡的调控指标体系, 综合确定了上中下游的平滩流量阈值, 为保障健康黄河提供重要依据。

此外, 以往学者也分析了不同水沙因子在平滩流量调整过程中发挥的重要作用, 如Zhang等^[10]分析了

收稿日期: 2024-03-14; 网络出版日期: 2024-07-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240717.1520.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2243237; U2243238)

作者简介: 曹玉芹(2000—), 女, 江西吉安人, 博士研究生, 主要从事河流动力学研究。E-mail: cao_yq@whu.edu.cn

通信作者: 夏军强, E-mail: xiajq@whu.edu.cn

花园口断面平滩流量的时间尺度特征及其对含沙量的滞后响应规律；余阳等^[11]在分析黄河下游游荡段平滩流量变化规律的基础上，探究了汛期水沙条件以及小浪底水库修建对河段平滩流量的影响；Cheng等^[12]则构建了游荡段平滩流量对汛期水沙条件及汛前主槽形态的综合响应关系，结果表明平滩流量对河道边界条件的变化较汛期水沙条件更为敏感。由此可见，目前针对黄河下游平滩流量变化的研究，大部分从定性或定量的角度分析了汛期末来水来沙特征变量对过流能力的影响，但较少考虑在年内水沙分配比例改变的新情势下，汛期和非汛期来水来沙对河道过流能力调整的综合作用。而且以往研究多集中于特定水文断面或某一局部河段，较少有针对整个黄河下游长河段的系统分析。

本文采用黄河下游1986—2020年来水来沙数据及沿程91个固定断面的汛后地形资料，分析汛期与非汛期水流冲刷强度的变化特点，计算黄河下游各固定断面及河段尺度的平滩流量，构建过流能力调整对年内不均衡水沙分配的综合响应关系，进一步量化汛期及非汛期水沙条件对黄河下游不同河型河段过流能力的相对贡献。

1 研究河段概述

1.1 黄河下游河段概况

黄河下游通常指小浪底水库以下的孟津至利津河段，流域面积为2.3万 km^2 ，河道总长约785 km，纵比降上陡下缓，平均为1.2‰。黄河下游沿程设有7个水文站和91个观测断面，依据河道形态及河床演变特点不同，结合水文断面位置可将下游进一步划分为游荡段（孟津—高村）、过渡段（高村—艾山）及弯曲段（艾山—利津），见图1。各河段分别设有28、28和35个观测断面。游荡段长约275 km，河道纵比降约1.9‰，具有河床宽浅、主流摆动不定、滩岸变形较大等特点；过渡段长约185 km，河道纵比降约1.2‰，由于滩岸土体抗冲性较强，河床较为稳定^[13]，但该河段存在平滩流量较小的“驼峰”段，阻碍河道行洪；弯曲段长约272 km，河道纵比降约1.0‰，两岸堤距较窄，约0.5~3 km，该河段有大量险工及控导工程，长度占河道长度的70%，故河床最为稳定。

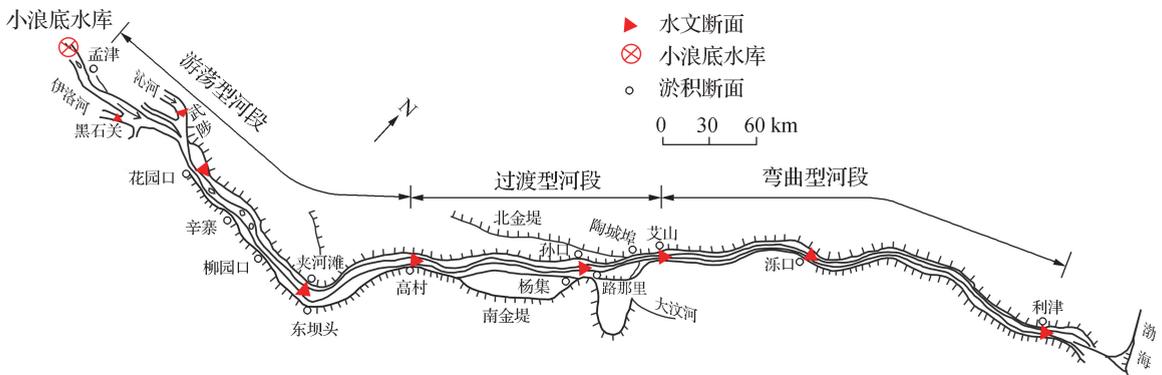


图1 黄河下游河段示意

Fig. 1 Sketch of the Lower Yellow River (LYR)

1.2 来水来沙变化特点

黄河以其水少沙多、水沙异源著称，其径流约60%来自上游地区，泥沙约90%来自中游土质疏松的黄土高原地区。自1986年以来，受流域内气候变化及多水库联合调节、水土保持工程和沿黄大量引水等强人类活动影响，黄河下游沙量呈阶段性变化^[14]。基于1986—2020年实测水文年水沙数据，以花园口水文站为代表，进入黄河下游的水沙条件见图2。小浪底枢纽运行以来（2000—2020年），人类活动的影响进一步增

强, 进入黄河下游的年均水量约 277 亿 m^3 , 较运行前(1986—1999 年)略有减少; 但水库拦沙作用导致下游沙量锐减, 小浪底枢纽运行后年均沙量仅 1.2 亿 t, 较运行前减少了 83%。水、沙量的年内不均衡分配关系也发生变化, 黄河流域的非汛期为上一年 11 月至当年 6 月, 汛期为当年 7—10 月, 小浪底枢纽运行后, 汛期水量占比由 46% 减少至 39%; 沙量虽仍集中在汛期输送, 但年内分配更加均匀, 汛期沙量占比由 81% 减少至 63%, 非汛期沙量的影响逐渐增大。

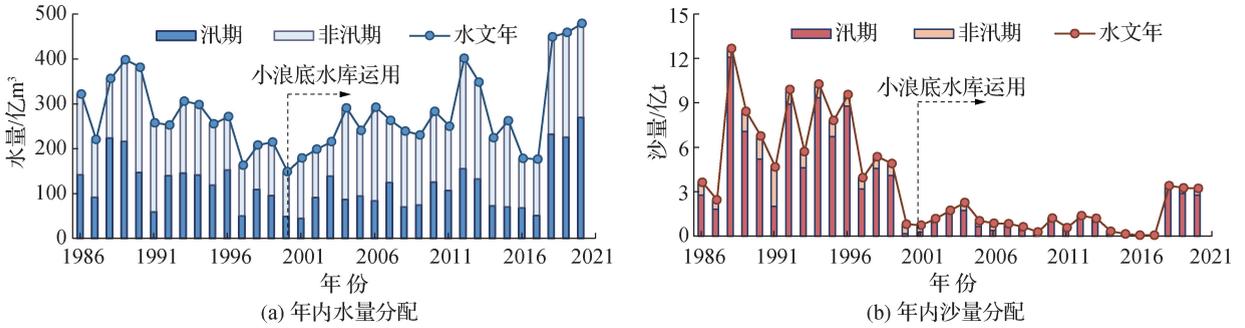


图2 花园口站水沙条件的年际及年内变化特点

Fig. 2 Characteristics of inter- and intra-annual variations in flow and sediment conditions at Huayuankou station

1.3 河床冲淤分布

1986—1999 年受黄河中游流域侵蚀等影响, 进入黄河下游的沙量较丰, 下游河道经历阶段性淤积过程(图 3(a)), 累计淤积量达 23.71 亿 m^3 , 至 1999 年河道平均淤高了 1.69 m(较 1985 年)。从不同河段冲淤分布看, 游荡段淤积强度最大, 累计淤积量占全下游的 68%, 过渡段和弯曲段淤积强度相当, 分别占 15% 和 17%。从年内冲淤变化看(图 3(b)), 正为淤积, 负为冲刷), 黄河下游河段在汛期呈持续淤积态势, 年均淤积量为 2.21 亿 m^3 ; 在非汛期则呈持续冲刷态势, 年均冲刷量为 0.52 亿 m^3 。

1999 年底小浪底水库下闸蓄水, 下游水沙条件再次发生显著变化, 大量泥沙被拦截在水库内, 下游河道经历持续性冲刷过程(图 3(a)), 1999—2020 年累计冲刷量达 20.01 亿 m^3 , 主槽平均高程降低了 1.6 m 以上^[15]。近坝游荡段直接受到下泄水流的强烈冲刷作用, 冲刷强度为 3 个河段之首, 累计冲刷量占全下游的 67%。从年内冲淤变化看(图 3(b)), 黄河下游在汛期和非汛期均处于持续冲刷状态。对于全河段, 汛期年均冲刷量为 0.58 亿 m^3 , 而非汛期年均冲刷量仍高达 0.37 亿 m^3 , 对下游河道冲淤演变有一定贡献; 对于游荡段, 非汛期冲刷显著, 年均冲刷量为 0.40 亿 m^3 , 为汛期的 1.68 倍。在 2000—2002 年及 2014—2018 年等时期, 黄河下游全河段非汛期冲刷量甚至显著大于汛期, 最高达汛期的 11.4 倍(2017 年), 故非汛期来水来沙条件对河床冲淤具有重要影响。

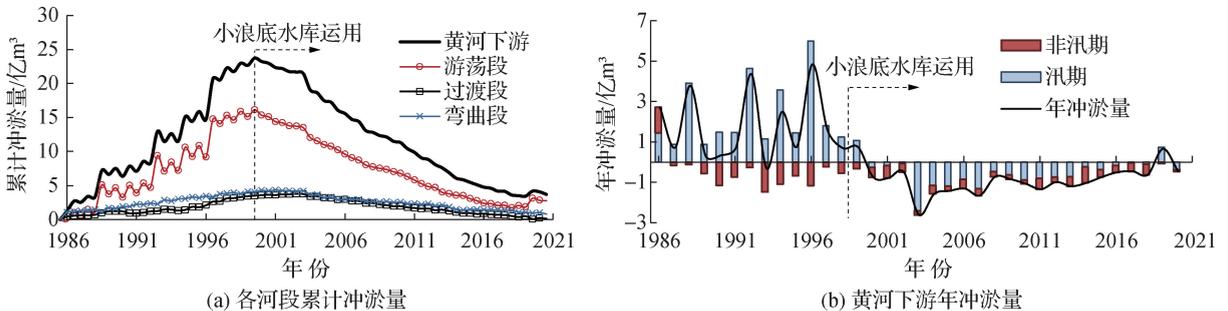


图3 黄河下游河床冲淤过程

Fig. 3 Channel evolution in the LYR

2 汛期与非汛期水流冲刷强度的变化特点

来水来沙条件通常指进口断面的流量、含沙量、历时及各类因素组合,是河床演变的决定性因素。采用水流冲刷强度这一指标表征来水来沙条件,汛期与非汛期的水流冲刷强度可表示为:

$$\bar{F}_{n1} = (\bar{Q}_1^2 / \bar{S}_1) \times 10^{-4} \quad (1)$$

$$\bar{F}_{n2} = (\bar{Q}_2^2 / \bar{S}_2) \times 10^{-4} \quad (2)$$

式中: \bar{F}_{n1} 、 \bar{F}_{n2} 分别为汛期和非汛期的平均水流冲刷强度, $\text{m}^9 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$; \bar{Q}_1 和 \bar{Q}_2 分别为进口断面汛期和非汛期的平均流量, m^3 / s ; \bar{S}_1 和 \bar{S}_2 分别为进口断面汛期和非汛期的平均含沙量, kg / m^3 。式(1)和式(2)既考虑了流量、含沙量及历时的影响,也考虑了水流动量对河床冲淤变形的影响^[16-17];此外,考虑到输沙率与流量之间存在幂函数关系,其指数约为2,故式中的流量平方项还可以表征水流的挟沙能力^[18-19]。因此,水流冲刷强度是反映水沙过程对河床形态演变的综合指标^[12]。

现有研究表明,当下泄水沙条件发生变化时,坝下游河道的河床形态与过流能力不能随之即刻调整,而是存在一定时间的滞后响应^[20]。为考虑前期水沙条件累积的影响,一般可以采用前 n 年滑动平均水流冲刷强度作为来水来沙的综合表征因子^[21-22]:

$$\bar{F}_{n1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{F}_{i1} \quad (3)$$

$$\bar{F}_{n2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{F}_{i2} \quad (4)$$

式中: n 为滑动平均的年份; \bar{F}_{n1} 、 \bar{F}_{n2} 分别为汛期和非汛期的前 n 年平均水流冲刷强度, $\text{m}^9 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ 。

分别计算各河段 1986—2020 年汛期及非汛期的前 5 a 平均水流冲刷强度(图 4),可见,黄河下游河道持续淤积过程中,水流冲刷强度受较大来沙量影响呈现持续减小趋势,小浪底枢纽运行后的持续冲刷过程中,各河段水流冲刷强度则因沙量锐减而显著增大。从汛期与非汛期来看,小浪底枢纽运行后,游荡段的非汛期水流冲刷强度显著大于汛期,过渡段的汛期与非汛期水流冲刷强度大小相当,弯曲段则呈汛期水流冲刷强度大于非汛期的特点。水流冲刷强度越大,反映水流挟沙能力相较于含沙量越大,该水沙情势对河床冲刷的影响越大,故非汛期水流冲刷强度能够对游荡段产生较大影响,对弯曲段影响则较弱。

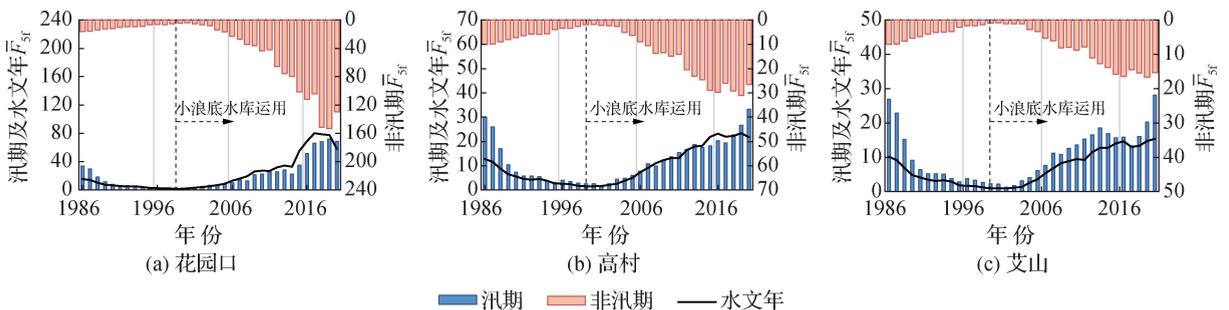


图 4 不同河段进口断面前 5 a 汛期及非汛期平均水流冲刷强度的逐年变化

Fig. 4 Annual variations in 5-year average fluvial erosion intensity during flood and non-flood seasons at inlet sections of different reaches

3 黄河下游过流能力调整规律

3.1 黄河下游平滩流量计算

小浪底枢纽运行前,黄河下游河槽萎缩严重,过流能力显著下降;小浪底枢纽运行后,受其蓄水拦沙影响,下游河道持续冲刷,过流能力恢复。当断面水位与河漫滩基本齐平时,流量对塑造河床形态的作用最大^[23],故平滩流量是决定河道排洪输沙能力的重要指标。此处采用平滩流量来表征河道过流能力,在该流量下水流具有最优输沙效率^[8]。

计算固定断面平滩流量时,首先根据黄河下游沿程91个断面的汛后地形资料,套绘相邻年份各断面的汛后地形,确定平滩高程;再采用一维水动力学模型计算各固定断面的水位—流量关系;最后结合断面平滩高程与计算的水位—流量关系,确定各固定断面的平滩流量。具体计算过程见文献[24]。然而受固定断面的河槽形态沿程差异较大等影响,各断面之间的平滩流量差异显著,特定断面的变化特点无法反映河段整体平滩流量的变化规律^[6]。故采用Xia等^[25]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,进一步计算河段尺度的平滩流量:

$$\bar{Q}_{bf} = \exp \left[\frac{1}{2L} \sum_{i=1}^{N-1} (\ln Q_{bf,i+1} + \ln Q_{bf,i}) (x_{i+1} - x_i) \right] \quad (5)$$

式中: \bar{Q}_{bf} 为河段平滩流量, m^3/s ; L 为河段长度, m ; N 为河段的固定断面总数; $Q_{bf,i}$ 和 $Q_{bf,i+1}$ 分别为第 i 个和第 $i+1$ 个断面的平滩流量, m^3/s ; x_i 和 x_{i+1} 分别为第 i 个和第 $i+1$ 个断面与河段起始断面的距离, m 。该方法考虑了断面间距不等对计算结果的影响。

3.2 持续淤积与持续冲刷过程中平滩流量的调整规律

根据上述断面及河段尺度的平滩流量计算方法,计算了黄河下游各固定断面及3个河段的汛后平滩流量。选择3个典型年份,各固定断面平滩流量沿程变化结果如图5(a)所示。从时间变化看,下游河段各断面平滩流量在持续淤积过程中显著减小,而在持续冲刷过程中得到不同程度的恢复;从沿程变化看,游荡段各断面的平滩流量较其他两河段的断面平滩流量更大。尽管黄河下游卡口断面位置在不同年份有所变化,但卡口河段依然集中在过渡段。1999年过渡段有41%的断面平滩流量小于 $2\,000\,m^3/s$,其中南小堤断面(距坝317 km)过流能力最小,平滩流量仅 $1\,100\,m^3/s$;2020年平滩流量最小的断面位于过渡段路那里断面(距坝446 km),但平滩流量已显著提升至 $4\,375\,m^3/s$ 。

3个河段平滩流量的计算结果如图5(b)所示。从下游河道不同冲淤阶段来看:①小浪底枢纽运行前,黄河下游淤积严重,河床抬高,各河段平滩流量由1986年的 $6\,000\,m^3/s$ 降至1999年的 $2\,000 \sim 3\,000\,m^3/s$,

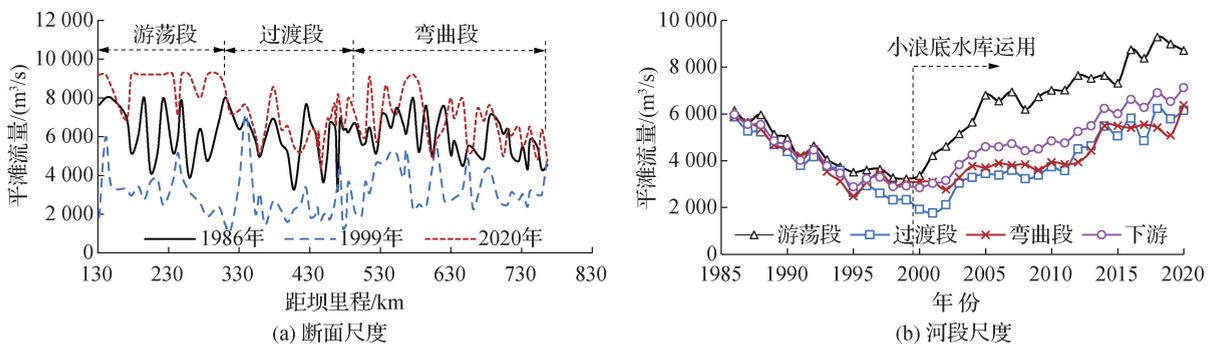


图5 黄河下游断面及河段尺度的平滩流量变化

Fig.5 Variations in section-scale and reach-scale bankfull discharges in the LYR

尤其是过渡段平滩流量仅 $2\,339\text{ m}^3/\text{s}$ ，过流能力持续降低。② 小浪底枢纽运行后，河床沿程持续冲刷下切，平滩流量呈 2 个阶梯式不断增加，2000—2006 年为水库拦沙初期，平滩流量显著提升后趋于稳定，其中游荡段的过流能力在 2005 年已恢复至 1986 年水平；2007—2020 年为水库拦沙后期，黄河调水调沙正式转入生产应用，受水沙调控影响，下游河槽行洪输沙能力再次提升，近年来过渡段和弯曲段的过流能力也逐渐恢复至 1986 年水平，至 2020 年汛后 3 个河段的平滩流量已分别达 $8\,713$ 、 $6\,165$ 和 $6\,384\text{ m}^3/\text{s}$ 。

从过流能力的沿程变化来看，小浪底枢纽运行前各河段过流能力差异不大，而小浪底枢纽运行后游荡段的过流能力较其余两河段恢复更快。这是水库拦沙作用、河段地理位置与河床边界条件的综合作用所致：① 游荡段最靠近小浪底水库，直接经受清水冲刷作用，河道纵比降较大，故河床下切与展宽显著^[13]；② 游荡段中段滩岸多为沙质土壤，土体抗冲性较弱，故滩岸极易崩退和展宽^[26]；③ 游荡段险工及控导工程布设较其余两河段少，控制作用不强^[27]，故该河段冲刷强度剧烈，河床最易变形。

4 黄河下游水沙条件对过流能力的影响

由上述分析可知，从水沙量来看，自 1986 年以来，水量大部分在非汛期输送，沙量虽然仍集中在汛期输送，但年内分配过程已有所坦化；从河床冲淤来看，非汛期水沙下泄造成的河床冲淤强度较大，尤其是在小浪底枢纽运行后。故非汛期水沙条件对黄河下游河道形态塑造及过流能力具有重要作用。此外，从汛期与非汛期水沙条件相关性来看，1986—2020 年各河段汛期和非汛期水流冲刷强度之间相关性不强，决定系数 (R^2) 不超过 0.45。故为全面研究黄河下游河道过流能力的调整特点，需要综合考虑汛期和非汛期水沙条件的影响。

4.1 汛期及非汛期水沙条件的综合影响

综合考虑汛期和非汛期水沙条件累积效应的影响，构建各河段前 n 年汛期、非汛期平均水流冲刷强度与平滩流量的幂律关系：

$$\bar{Q}_{bf} = a \bar{F}_{n1}^{k_1} \bar{F}_{n2}^{k_2} \quad (6)$$

式中： a 为平滩流量计算式的系数； k_1 、 k_2 分别为前 n 年汛期与非汛期平均水流冲刷强度项的指数。

Wu 等^[20]、Xia 等^[25] 研究表明，在黄河下游河道形态与前期水沙条件的非线性关系中，滞后年份通常在 3~5 a。采用式(1)和式(2)计算的各年汛期与非汛期水流冲刷强度及式(5)计算的河段平滩流量，选取不同滑动平均年份 n 进行多元回归分析。根据计算结果，当 $n=5$ 时，游荡段、过渡段和弯曲段平滩流量计算值与实测值的 R^2 均较高，分别为 0.92、0.83 和 0.72。故采用前 5 a 平均水流冲刷强度进行计算，率定各河段平滩流量计算公式中的系数与指数，结果如表 1 所示。

表 1 3 个河段平滩流量计算公式中的系数与指数

Table 1 Coefficients and indices of the bankfull discharge formulas in three reaches

河段	a	k_1	k_2	R^2
游荡段	2 732.3	0.112	0.148	0.92
过渡段	1 753.5	0.324	0.035	0.83
弯曲段	2 471.4	0.215	0.042	0.72

率定结果显示，各河段平滩流量计算公式中的指数 k_1 、 k_2 均大于 0，表明平滩流量与前 5 a 汛期和非汛期平均水流冲刷强度呈相同变化趋势，即河床持续淤积过程中，随着汛期和非汛期平均水流冲刷强度不断减小，各河段平滩流量均呈减小趋势；而河床持续冲刷过程中平滩流量则随汛期和非汛期平均水流冲刷强度的增大而增大。下泄水流含沙量减少导致汛期和非汛期平均水流冲刷强度增大(图 4)，造成河床冲深下切，但指数 k_1 、 k_2 均远小于 1，表明各河段过流能力并不会无限制恢复，在河床冲刷过程中断面形态及河床组成存

在持续的自动调整响应作用, 将延缓河道下切速率, 减缓平滩流量的增幅, 使河流系统朝平衡稳定的方向演变^[28]。

分别以式(5)、式(6)的平滩流量结果作为实测值和计算值, 各河段平滩流量的逐年变化如图6所示。计算值与实测值较为相符, 能够较好地反映实际平滩流量的变化趋势与幅度。采用式(6)的计算误差较小, 平均相对误差(E_{MR})不超过12%, 表明该式能够较好地反映汛期和非汛期水沙条件累积效应对河道过流能力调整的综合作用。

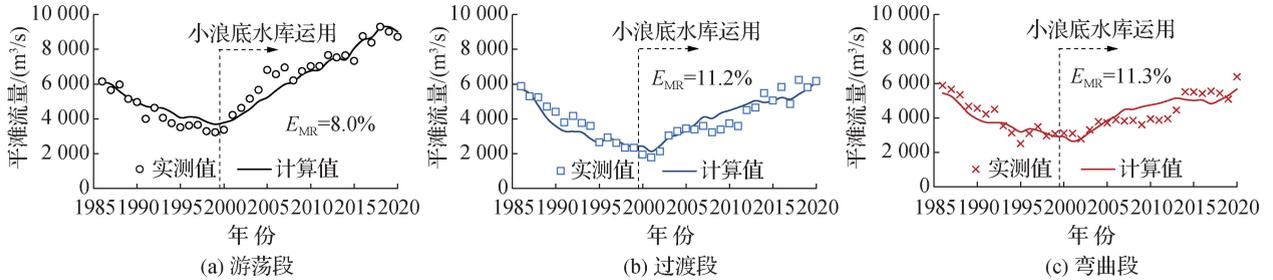


图6 黄河下游3个河段平滩流量计算值与实测值比较

Fig. 6 Comparisons between the calculated and measured bankfull discharges in three reaches of the LYR

4.2 汛期及非汛期水沙条件的敏感度分析

在汛期或非汛期水沙条件变化的情况下, 各河段平滩流量调整会做出不同程度的响应。灵敏度分析可以评价各河段过流能力对前5 a汛期、非汛期平均水流冲刷强度的响应程度, 从而对比年内不同时期水沙过程对过流能力的影响强弱。本文采用修正 Morris法进行灵敏度分析, 该方法是较常用的灵敏度分析法, 通过对各个自变量参数进行特定步长的微扰动, 判断该变化对因变量的影响程度^[29]。对自变量 \bar{F}_{5n1} 与 \bar{F}_{5n2} 分别以固定步长变化, 定义敏感度判别因子为多次扰动的平均值, 即

$$S = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i)/Y_0}{(X_{i+1} - X_i)/X_0} / (m - 1) = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i)/Y_0}{\Delta_{i+1} - \Delta_i} / (m - 1) \quad (7)$$

式中: S 为自变量 \bar{F}_{5n1} 或 \bar{F}_{5n2} 的敏感度, 以0.05、0.2和1为界划分不敏感参数、中等敏感参数、敏感参数和高敏感参数; m 为扰动总次数; X_0 和 Y_0 分别为自变量和因变量的初始值; X_i 和 Y_i 分别为自变量和因变量第 i 次变化后的值; Δ_i 和 Δ_{i+1} 分别为第 i 次和第 $i+1$ 次扰动相对于初始值的变化百分数, $\Delta_{i+1} - \Delta_i$ 即扰动步长。

采用固定扰动步长为25%, 扰动范围为-75%~75%, 即共进行7次扰动。根据计算结果, 游荡段平滩流量对前5 a汛期、非汛期平均水流冲刷强度的敏感度分别为0.149和0.198, 即游荡段的过流能力对二者都较为敏感, 且对非汛期水沙条件较汛期更为敏感; 过渡段分别为0.451和0.046, 弯曲段分别为0.292和0.055, 表明过渡段和弯曲段的过流能力均对汛期水沙条件敏感, 对非汛期水沙条件不太敏感。从水沙过程来看, 汛期来流量较大, 这2个河段床沙的细颗粒组分较多, 含沙量的沿程恢复更显著, 小浪底枢纽运用后过渡段在汛期和非汛期分别冲刷了0.15亿和0.01亿 m^3/a , 而弯曲段在汛期冲刷了0.19亿 m^3/a , 非汛期淤积了0.04亿 m^3/a , 故这2个河段水流对河床的冲刷作用在汛期较非汛期更显著, 如图4(b)、图4(c)所示; 从人为影响来看, 非汛期持续时间长达8个月, 受沿程大量引水等人类活动的影响较汛期更大, 实际冲刷能力可能进一步显著削弱。故对于过渡段和弯曲段, 汛期来水来沙对河道形态塑造及过流能力调整的作用较非汛期强。

4.3 汛期及非汛期水沙条件的相对贡献

表1的率定结果表明, 汛期及非汛期水沙条件对不同河段的相对贡献有所不同。当前5 a汛期与非汛期

平均水流冲刷强度的增长幅度相同时,对于游荡段,非汛期水沙条件累积效益对过流能力的调整作用较汛期更为显著($k_2 > k_1$);对于过渡段与弯曲段,汛期水沙条件累积效益的调整作用更为显著($k_1 > k_2$)。上述敏感度分析结果也同样表明,不同河段汛期及非汛期水沙条件对过流能力的影响存在差异。

对数平均迪氏指数法(LMDI法)是量化因子贡献度的有效方法,该方法通过对研究对象进行加法或乘法分解,客观定量地识别驱动因子的相对贡献^[30]。本文采用LMDI法定量计算汛期及非汛期水沙条件对平滩流量的相对贡献,通过计算前5a汛期、非汛期平均水流冲刷强度各自引起的平滩流量变化量与平滩流量总变化量之比,得到2个影响因素的贡献率。为简化表达,令 $\varphi_1 = \bar{F}_{n1}^{k_1}$ 、 $\varphi_2 = \bar{F}_{n2}^{k_2}$,将式(6)写为 $\bar{Q}_{bf} = a\varphi_1\varphi_2$ 的形式,则2个影响因素引起的平滩流量变化分别为:

$$\Delta \bar{Q}_{bf1} = \frac{\bar{Q}_{bf,t} - \bar{Q}_{bf,0}}{\ln \bar{Q}_{bf,t} - \ln \bar{Q}_{bf,0}} (\ln \varphi_{1,t} - \ln \varphi_{1,0}) \quad (8)$$

$$\Delta \bar{Q}_{bf2} = \frac{\bar{Q}_{bf,t} - \bar{Q}_{bf,0}}{\ln \bar{Q}_{bf,t} - \ln \bar{Q}_{bf,0}} (\ln \varphi_{2,t} - \ln \varphi_{2,0}) \quad (9)$$

式中: $\bar{Q}_{bf,0}$ 和 $\bar{Q}_{bf,t}$ 分别为基准年和第 t 年的平滩流量计算值; $\varphi_{1,0}$ 和 $\varphi_{2,0}$ 分别为汛期和非汛期水沙项($\bar{F}_{n1}^{k_1}$ 、 $\bar{F}_{n2}^{k_2}$)在基准年的计算值; $\varphi_{1,t}$ 和 $\varphi_{2,t}$ 分别为汛期和非汛期水沙项在第 t 年的计算值; $\Delta \bar{Q}_{bf1}$ 和 $\Delta \bar{Q}_{bf2}$ 分别为汛期和非汛期水沙条件变化引起的平滩流量变化,正值表示使促进,负值表示使削弱,两者之和应等于基准年和第 t 年的平滩流量变化值。故两影响因素对各年平滩流量变化的相对贡献率分别为:

$$\eta_1 = |\Delta \bar{Q}_{bf1}| / (|\Delta \bar{Q}_{bf1}| + |\Delta \bar{Q}_{bf2}|) \times 100\% \quad (10)$$

$$\eta_2 = |\Delta \bar{Q}_{bf2}| / (|\Delta \bar{Q}_{bf1}| + |\Delta \bar{Q}_{bf2}|) \times 100\% \quad (11)$$

式中: η_1 、 η_2 分别为汛期与非汛期水沙条件对平滩流量的相对贡献率,两者之和为100%。

采用该方法对各河段平滩流量的逐年变化进行分析,汛期与非汛期水沙条件的相对贡献率如图7所示。

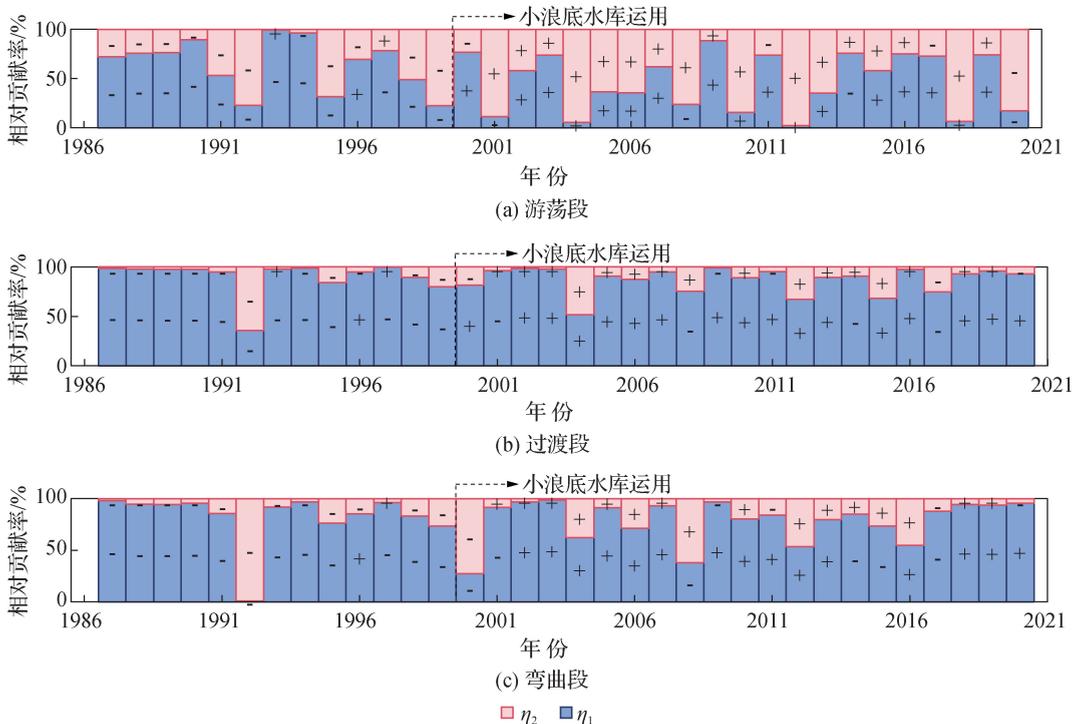


图7 汛期及非汛期水沙条件对平滩流量的相对贡献率

Fig. 7 Relative contributions of flood and non-flood flow-sediment conditions to the bankfull discharges

数值大小表示相对贡献大小,正、负号分别表示对平滩流量的贡献为促进和削弱。结果表明:

(1) 小浪底枢纽运行前的持续淤积过程中,各河段的汛期、非汛期水沙条件基本导致平滩流量减小,其中,游荡段汛期、非汛期水沙条件的年均贡献率分别为64%和36%,非汛期来水来沙有一定贡献;过渡段和弯曲段则以汛期水沙条件的贡献为主,汛期的年均贡献率分别占90%和82%。

(2) 小浪底枢纽运行后的持续冲刷过程中,各河段的汛期、非汛期水沙条件对平滩流量的作用由削弱转为促进;非汛期水沙条件的相对贡献在各河段均有所增强,这是因为小浪底水库的运用改变了黄河下游年内水沙分布,使非汛期的水沙量占比均增大。

(3) 小浪底枢纽运行后,非汛期的年均贡献率在游荡段增至53%,对该河段过流能力的恢复作用显著;在过渡段和弯曲段则增至13%和21%,虽略有增长,但这两河段仍以汛期水沙条件影响为主。非汛期水沙条件对游荡段的贡献较其他两河段更大,这是受河段地理位置与悬沙沿程恢复综合影响的结果。一方面,游荡段位于黄河下游河道之首,直接经受小浪底水库水沙下泄的影响(图1);另一方面,悬沙受床沙补给而沿程恢复,含沙量向下游增大,冲刷强度沿程减弱(图8(a))。二者共同作用导致河床冲淤量在空间上分布不均,小浪底枢纽运行前后,非汛期河床冲淤强度均在游荡段最强,而在其余两河段较弱(图8(b))。故在对游荡段进行理论计算与河道演变分析时尤其应当考虑非汛期水沙因子,以提高模拟精度。

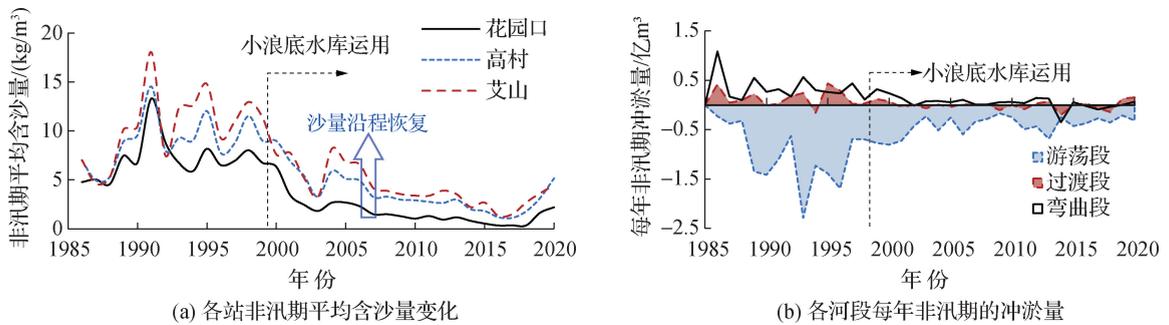


图8 各站非汛期平均含沙量及各河段非汛期冲淤量的变化

Fig. 8 Non-flood-averaged sediment concentrations at each station and channel evolution volumes during the non-flood seasons in three reaches

5 结 论

本文基于黄河下游1986—2020年各水文站实测水沙数据与91个固定断面的地形数据,计算了断面及河段尺度的平滩流量,分析了游荡段、过渡段与弯曲段过流能力的调整规律,探究了汛期及非汛期水沙条件对过流能力的综合作用及相对贡献。主要结论如下:

(1) 小浪底枢纽运行前,黄河下游河道呈汛期淤积、非汛期冲刷的特点,整体持续淤积。小浪底枢纽运行后,水流冲刷强度急剧增大,河道在汛期与非汛期均持续冲刷,非汛期冲刷幅度是汛期的64%;其中游荡段非汛期的水流冲刷强度显著大于汛期,非汛期河床冲刷量也达到汛期的1.68倍。

(2) 采用一维水动力模型及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,计算了断面及河段尺度的平滩流量;综合考虑汛期与非汛期的水沙累积效应,构建了各河段平滩流量与前5 a汛期、非汛期平均水流冲刷强度的幂律关系。结果表明,河道持续淤积过程中过流能力不断削弱,最小平滩流量不到2 000 m³/s,输水输沙通道不畅;持续冲刷过程中平滩流量显著增加,游荡段恢复最迅速,最小过流能力已恢复至4 375 m³/s;构建的计算式能较好地反映过流能力随汛期与非汛期水沙分配关系的实际变化。

(3) 采用修正Morris法与LMDI法定量计算了汛期与非汛期水沙条件对平滩流量的影响强弱与相对贡献

率, 结果表明, 非汛期来水来沙对游荡段过流能力的调整作用显著, 贡献率从小浪底枢纽运行前的 36% 增至运行后的 53%; 对过渡段与弯曲段的影响则不显著, 贡献率不到 20%。

参考文献:

- [1] WANG S, FU B J, PIAO S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 38-41.
- [2] WANG H J, YANG Z S, SAITO Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950—2005): impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3/4): 331-354.
- [3] 柳莎莎, 王厚杰, 张勇, 等. 气候变化和人类活动对黄河中游输沙量影响的甄别[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(4): 41-50. (LIU S S, WANG H J, ZHANG Y, et al. Impacts of climate change and human activity on sediment discharge in the middle reach of the Yellow River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(4): 41-50. (in Chinese))
- [4] HU C H, ZHANG G G. Characteristics of the Lower Yellow River channel shrinkage and its discriminant parameters[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(5): 1374-1386.
- [5] 王远见, 王强, 刘彦晖, 等. 小浪底水库运行以来对黄河下游河道河床演变特性的影响[J]. *水利学报*, 2024, 55(5): 505-515. (WANG Y J, WANG Q, LIU Y H, et al. Morphological effects of the operation of Xiaolangdi Reservoir on the Lower Yellow River in recent years[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(5): 505-515. (in Chinese))
- [6] HE L. Estimation of bankfull discharge in the Lower Yellow River[J]. *Water Resources*, 2019, 46(2): 160-171.
- [7] 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, 16(4): 518-523. (XU G B, ZHANG J L, LIAN J J. Effect of water-sediment regulation of the Yellow River on the lower reach[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 518-523. (in Chinese))
- [8] 刘晓燕, 张原峰. 健康黄河的内涵及其指标[J]. *水利学报*, 2006, 37(6): 649-654, 661. (LIU X Y, ZHANG Y F. Essence and indicators of the healthy Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(6): 649-654, 661. (in Chinese))
- [9] 胡春宏, 张治昊, 张晓明. 维持黄河流域水沙平衡的调控指标阈值体系研究[J]. *水科学进展*, 2023, 34(5): 647-659. (HU C H, ZHANG Z H, ZHANG X M. Threshold system of regulation indicators for maintaining the runoff and sediment balance of the Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(5): 647-659. (in Chinese))
- [10] ZHANG Y Y, ZHONG D Y, WU B S. Multiple temporal scale relationships of bankfull discharge with streamflow and sediment transport in the Yellow River in China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(4): 496-510.
- [11] 余阳, 夏军强, 李洁, 等. 小浪底水库对下游游荡河段河床形态与过流能力的影响[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(1): 7-15. (YU Y, XIA J Q, LI J, et al. Influences of the Xiaolangdi Reservoir on the channel geometry and flow capacity of wandering reach in the Lower Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(1): 7-15. (in Chinese))
- [12] CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Adjustment of flood discharge capacity with varying boundary conditions in a braided reach of the Lower Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(11): 1615-1632.
- [13] 王英珍, 夏军强, 邓珊珊, 等. 黄河下游河道滩岸崩退与淤长过程的耦合模拟[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(4): 130-141. (WANG Y Z, XIA J Q, DENG S S, et al. Coupled modelling of bank erosion and accretion in the Lower Yellow River [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(4): 130-141. (in Chinese))
- [14] SHI H L, HU C H, WANG Y G, et al. Analyses of trends and causes for variations in runoff and sediment load of the Yellow River[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(2): 171-179.
- [15] CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Recent variation in channel erosion efficiency of the Lower Yellow River with different channel patterns[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127962.
- [16] XIA J Q, ZONG Q L, ZHANG Y, et al. Prediction of recent bank retreat processes at typical sections in the Jingjiang reach[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(8): 1490-1499.
- [17] 李洁, 夏军强, 邓珊珊, 等. 近期黄河下游游荡段滩岸崩退过程及特点[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 517-525. (LI J, XIA J Q, DENG S S, et al. Recent bank retreat processes and characteristics in the braided reach of the Lower Yellow River

- [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 517-525. (in Chinese))
- [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 Y Z, XIA J Q, ZHOU M R, 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. (in Chinese))
- [19] LI D F, LU X X, CHEN L, et al. Downstream geomorphic impact of the Three Gorges Dam; with special reference to the channel bars in the Middle Yangtze River[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(13): 2660-2670.
- [20] WU B S, ZHENG S, THORNE C R. A general framework for using the rate law to simulate morphological response to disturbance in the fluvial system[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, 36(5): 575-597.
- [21] LI J, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Variation in reach-scale thalweg-migration intensity in a braided reach of the Lower Yellow River in 1986—2015[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(13): 1952-1962.
- [22] GAO L, XU X Z, XIA J Q. Deciphering the role of riverbank collapse in the braided reach of the Lower Yellow River; helpful or harmful? [J]. *Journal of Earth System Science*, 2024, 133(1): 30.
- [23] 陈建国, 胡春宏, 董占地, 等. 黄河下游河道平滩流量与造床流量的变化过程研究[J]. *泥沙研究*, 2006(5): 10-16. (CHEN J G, HU C H, DONG Z D, et al. Change of bankfull and bed-forming discharges in the Lower Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(5): 10-16. (in Chinese))
- [24] XIA J Q, WU B S, WANG G Q, et al. Estimation of bankfull discharge in the Lower Yellow River using different approaches [J]. *Geomorphology*, 2010, 117(1/2): 66-77.
- [25] XIA J Q, LI X J, LI T, 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.
- [26] 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 J Q, CHENG Y F, ZHOU M R, 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))
- [27] 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 L, XU X Z, ZHANG H W. 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))
- [28] 刘怀湘, 王兆印, 陆永军, 等. 下切性河流的床沙响应与纵剖面调整机制[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 836-841. (LIU H X, WANG Z Y, LU Y J, et al. Riverbed sediment response and longitudinal profile adjustment in incised river channels [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 836-841. (in Chinese))
- [29] 唐清竹, 徐宗学, 王京晶, 等. 基于全局和局部方法的城市雨洪模型参数敏感性: 以济南市主城区为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(4): 713-722. (TANG Q Z, XU Z X, WANG J J, et al. Parameter sensitivity of urban storm models based on global and local optimum methods: a case study in the main urban area of Jinan City, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(4): 713-722. (in Chinese))
- [30] 康艳, 闫亚廷, 杨斌. 基于LMDI-SD耦合模型绿色发展灌区水资源承载力模拟[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 150-160. (KANG Y, YAN Y T, YANG B. Simulation of water resource carrying capacity based on LMDI-SD model in green development irrigation areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(19): 150-160. (in Chinese))

Effects of flood and non-flood flow and sediment regimes on the flood discharge capacity of different reaches in the Lower Yellow River*

CAO Yuqin¹, XIA Junqiang¹, ZHOU Meirong¹, CHENG Yifei¹, CHEN Jianguo²

(1. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

2. *State Key Laboratory of Watershed Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: Since the 1980s, the flow-sediment regime entering the Lower Yellow River (LYR) has altered significantly. The channel in the LYR continuously experienced aggradation under the heavy sediment load and degradation by the operation of the Xiaolangdi (XLD) Reservoir. Based on the measured flow-sediment data and the topography at fixed sections from 1986 to 2020, the reach-scale bankfull discharges were calculated, and the contributions were quantified of flow-sediment regime during the flood and non-flood seasons to the flood discharge capacities in different reaches. Results show that: ① In the pre-dam period, the fluvial erosion intensity decreased temporally, leading to a predominance of channel aggradation with deposition in flood seasons and erosion in non-flood seasons. Consequently, the bankfull discharge decreased continuously with the minimum value less than 2 000 m³/s. ② In the post-dam period, the fluvial erosion intensity increased significantly especially in the non-flood seasons, contributing greatly to the channel degradation. The flood discharge capacity recovered remarkably, with the most rapid recovery occurring in the braided reach. ③ There was a close power law relationship between the bankfull discharge and the 5-year average fluvial erosion intensity during the flood and non-flood seasons, reflecting the cumulative impact of flow-sediment regimes in the flood and non-flood seasons on the flood discharge capacity. ④ Owing to the upstream damming, the contribution of the flow-sediment regime in non-flood seasons to the flood discharge capacity increased especially in the braided reach (53%), while it was lower in the transitional and the meandering reaches (less than 20%).

Key words: bankfull discharge; flow and sediment regime; non-flood season; flood season; different reaches; the Lower Yellow River

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2243237; No. U2243238).