

文章编号:1009-3087(2015)01-0097-08

DOI:10.15961/j.jsuese.2015.01.014

# 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

李晓娟,夏军强\*,李洁,张晓雷

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北武汉430072)

**摘要:**自1986年以来,由于上游来水来沙量不同程度的减少及小浪底水库的运用,进入黄河下游的水沙条件发生了较大变化。下游河道分别经历了持续淤积和持续冲刷的过程,其平滩河槽形态调整较为显著,尤其在游荡段。利用1986—2012年汛后实测淤积断面资料,统计了各年游荡段汛后28个断面的平滩河槽形态参数(平滩河宽、水深及面积等)。然后,采用基于对数转换的几何平均结合断面间距加权平均的方法,计算了基于河段尺度的游荡段平滩河槽形态,并分析了这些参数的变化规律。计算结果表明:河段平滩河槽形态的调整与汛期及非汛期水沙条件都密切相关,且能与前期4年平均的汛期及非汛期的流量及来沙系数建立经验函数关系。该关系式可反映出流量、来沙系数对平滩河槽形态各参数的不同影响,并有较高的相关系数。

**关键词:**持续淤积;持续冲刷;水沙条件;平滩河槽形态;黄河下游

中图分类号:TV147.5

文献标志码:A

## Variation in Bankfull Channel Geometry in the LYR Undergoing Continuous Aggradation and Degradation

LI Xiaojuan, XIA Junqiang\*, LI Jie, ZHANG Xiaolei

(State Key Lab. of Water Resources and Hydropower Eng. Sci., Wuhan Univ., Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The flow-sediment regime entering the lower Yellow River (LYR) has changed significantly since 1986. In order to study this phenomenon, the reach-scale bankfull channel dimensions (bankfull width, depth, area, et al.) of the braided reach were calculated annually during the period from 1986 to 2012, based on the surveyed post-flood profiles at 28 sedimentation sections, using an integrated method which integrates a geometric mean based on the log-transformation with a weighted average based on the spacing between two consecutive sections. The results indicated that the magnitude of each reach-scale bankfull channel dimension responded well to the accumulative effect of incoming flow and sediment conditions during both the flood seasons and non-flood seasons. Empirical relationships for the braided reach were developed between the reach-scale bankfull channel geometry and the previous four-year average integrated incoming discharge-sediment condition. These relationships demonstrated different impacts of discharge and incoming sediment coefficient on the channel geometry with relatively high correlation coefficients between them.

**Key words:** continuous aggradation; continuous degradation; flow and sediment regime; bankfull channel geometry; lower Yellow River (LYR)

黄河下游因其特殊的来水来沙及河床边界条件,河床演变过程十分复杂。近年来由于气候变化和人类活动的影响,进入下游的水沙条件发生了很大变化,使得河床正经历着明显的冲淤调整过程,河槽形态也随之改变,尤其是在游荡段。在黄河干支流上修建的大型水利工程,例如小浪底水利枢纽,必

然进一步改变进入黄河下游河道的水沙条件,对河床演变产生新的影响。掌握河床演变过程中河槽形态调整的趋势与规律,可为黄河下游河道的防洪减灾提供有力依据。

在冲积河流中,准平衡条件下河槽几何形态的塑造与流域来水来沙条件密切相关,一般认为河槽

收稿日期:2014-04-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379156;51179072);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120141110011)

作者简介:李晓娟(1988—),女,博士生。研究方向:河流动力学。E-mail:lixj@whu.edu.cn

\*通信联系人 E-mail:xiajq@whu.edu.cn

断面形态与流域因素之间存在某种定量关系<sup>[1-2]</sup>。平滩河槽形态参数是描述主槽横断面几何特征的重要参数,可直接反映河槽因来水来沙条件变化而发生的改变,主要包括平滩水位下的河宽( $B_{br}$ )、平均水深( $H_{br}$ )、面积( $A_{br}$ )及河相系数( $\zeta_{br}$ )等,这些参数可表征平滩河槽的大小与形态。为了描述河槽形态随来水来沙变化的过程,前人在这方面开展了大量的研究工作。He 与 Wilkerson<sup>[3]</sup>用两年重现期的洪水流量作为单一变量,预测了多个断面的平滩河槽形态参数。吴保生等<sup>[4-5]</sup>以黄河下游高村站 1960—2002 年的汛后平滩面积为研究对象,分析了汛期来水来沙条件对平滩面积变化的影响,并建立了两者之间的滞后响应关系。由于同一河段各个断面平滩河槽形态不尽相同,特别是在游荡型河段,各统测断面平滩河槽形态沿程变化较大,因此河段平均的概念被引入到对平滩河槽形态的研究中。梁志勇等<sup>[6]</sup>利用统测大断面资料统计了 1973—2003 年间黄河下游 50 个断面的平滩河槽形态参数,采用几何平均的方法计算了花园口—高村河段尺度的平滩河槽形态,并给出了该河段平滩宽度与汛期流量及含沙量的相关关系。计算河段尺度平滩河槽形态的方法还有直接的算术平均<sup>[7]</sup>,基于对数转换的几何平均<sup>[8]</sup>,以及基于对数转换的几何平均结合断面间距加权平均<sup>[9-10]</sup>等。

以上对平滩河槽形态与来水来沙条件关系的研究仅考虑了汛期水沙条件,而没有考虑非汛期水沙条件。河床的冲淤变化不仅发生在汛期,非汛期的水沙条件同样对河槽形态有塑造作用。李文文等<sup>[11]</sup>在研究来水来沙对黄河下游平滩流量影响时,将非汛期的水沙条件加入到对花园口、高村等 4 站的断面平滩流量计算模型中,得到了比仅考虑汛期水沙更加接近实测值的结果。另外,胡春宏等<sup>[12]</sup>分别建立了黄河下游各典型断面平滩面积与年均流量,断面宽深比与年均来沙系数之间的非线性关系。在分析平滩河槽形态与上游水沙条件之间的相关关系时,非汛期的水沙过程对河槽形态塑造的影响不可忽略。故全面考虑汛期及非汛期来水来沙对河床的塑造作用,可以更加准确地描述平滩河槽形态调整的规律。

为进一步探索黄河下游游荡段平滩河槽形态的变化过程与规律,需采用合理的方法来计算河段尺度的平滩河槽形态参数,同时,应充分考虑汛期及非汛期的水沙条件对河槽形态调整的影响。作者统计了黄河下游游荡段 28 个实测淤积断面在持续淤积

阶段(1986—1999 年)以及持续冲刷阶段(1999—2012 年)各个年份的汛后断面平滩河槽形态;然后,采用基于对数转换的几何平均结合断面间距加权平均的方法<sup>[9,13]</sup>,分别计算了游荡段各个年份河段尺度的平滩河槽形态参数。最后,在对平滩河槽形态参数与水沙条件相关关系的分析中,引入非汛期与汛期的综合水沙条件,并建立了相应的关系式。

## 1 来水来沙条件及河床冲淤过程

进入黄河下游水沙条件取决于自然条件和人类活动的共同影响。20 世纪 60 年代以前,人类活动对水沙条件的影响较小,进入黄河下游的水沙条件取决于气候因素,基本接近于天然情况。随着黄河治理开发水平不断提高,人类活动对下游水沙过程的影响逐渐加大,在很大程度上改变了进入黄河下游的水沙条件<sup>[14-15]</sup>。来水量、来沙量以及水沙搭配条件等直接影响着冲积河流河床的冲淤变化,不断改变的来水来沙量及水沙搭配引起了下游河槽形态的一系列调整。

### 1.1 近期水沙条件

图 1 是 1950 年以来黄河下游的来水来沙情况。

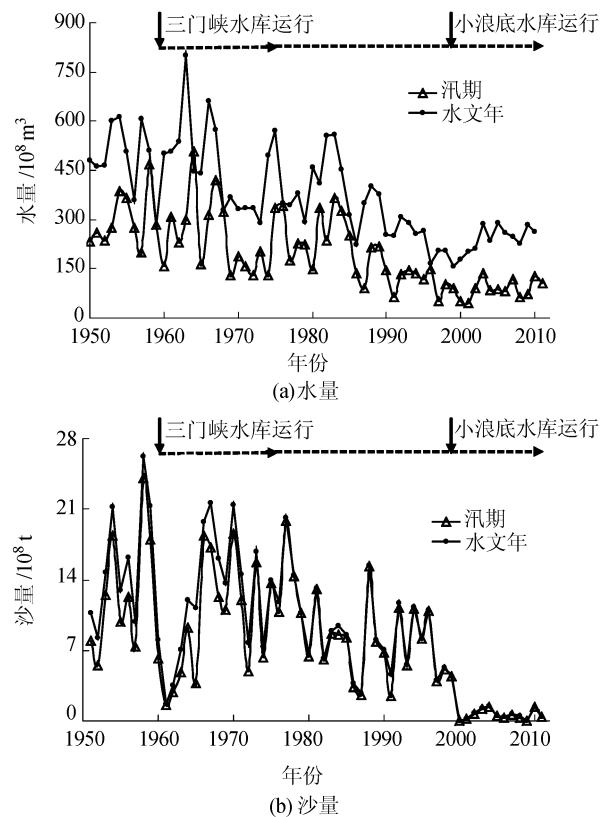


图 1 黄河下游来水来沙量随时间变化

Fig. 1 Temporal variations in the annual flow and sediment regime entering the LYR

由图1可知,自1986年开始黄河下游进入了枯水少沙期。1986—1999年下游年均来水量为 $277 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,为长系列均值(1919—1985年)的59%,且各年的水量都小于长系列均值,其中1997年是水量最少的一年,仅 $166.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。与此同时,1986—1999年下游年均来沙量比长系列均值偏少48%,为 $7.37 \times 10^8 \text{ t}$ 。来沙量减少程度年际间不均匀,如1988、1992、1994年等暴雨强度大的年份沙量较多,汛期来沙系数也较大。总体上,沙量减小幅度大于水量的减幅,且沙量减小过程较剧烈,而水量减少过程较缓和。来水来沙的年内分配也发生了改变,汛期水量占全年的比例由长系列的60%降为46%,汛期来沙量占全年的比例由长系列的86.5%增加到95.3%。

1997年起,黄河天然年径流与来沙量进一步减少,并且根据基于黄河上游天然年径流变化特性的小波分析,这种较低的年径流水平会持续若干年<sup>[14]</sup>。1999年小浪底水库投入运行后,进入黄河下游的水沙过程发生了较大的变化,黄河下游河道冲淤演变特点也随之改变<sup>[15]</sup>。1999—2012年,年均水量为 $247 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,汛期水量占到全年水量的38%,非汛期水量占全年的比例较1986—1999年系列进一步增加到62%。而年均来沙量则锐减至 $0.95 \times 10^8 \text{ t}$ ,且主要集中在汛期,汛期沙量占到全年沙量的96%。来水来沙的年内分配进一步改变,全年来水量有向非汛期集中的趋势,而输沙则主要发生在汛期。

因此,1986—2012年间黄河下游来水来沙量持续减少,并且水沙量的年内分配及组合发生了较大改变。小浪底水库运行后,水沙年内分布进一步趋向不均匀,非汛期水量与沙量占全年的比例有所改变。

## 1.2 河段冲淤过程

黄河下游自孟津至高村,是典型的游荡型河段,河道冲淤幅度大,主流摆动频繁剧烈。该河段长284 km,两岸堤距在5~20 km之间,近期主槽宽约0.3~2.5 km,纵比降大约在0.019%左右<sup>[10]</sup>。河段的冲淤调整与天然来水来沙条件密切相关,同时受黄河干流上的水库运行的影响。

从1950年至今,游荡段经历了复杂的冲淤过程,图2所示为1950年以来游荡段的累积冲淤过程。1950—1960年为平水多沙系列,年均水量接近长系列值,年均沙量较长系列偏多,该时期内游荡段淤积较为严重。1960—1964年为三门峡水库蓄水拦沙期,下游河道经历了短暂的冲刷过程。1964—1973年期间,三门峡水库改为滞洪排沙运用,下游

河道严重淤积。1973年以后,三门峡水库实行蓄清排浑控制运用,出库水沙过程比滞洪排沙期有所改善,下游河道冲淤交替。

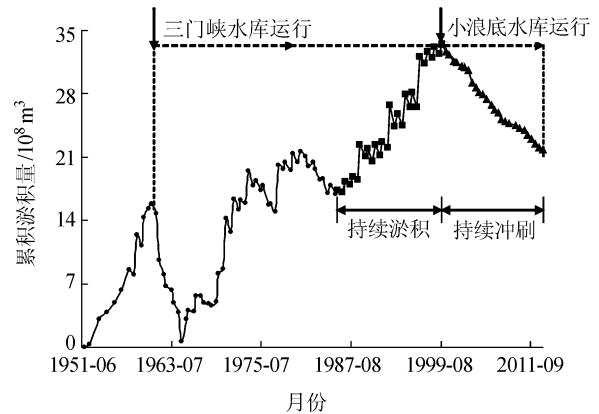


图2 游荡段1950—2012年累积冲淤量

Fig.2 Accumulated channel evolution volume in the braided reach from 1950 to 2012

从1986年开始,由于上中游天然来水来沙条件为枯水少沙系列,黄河下游经历了明显的淤积与主槽萎缩过程<sup>[16]</sup>。游荡段主槽淤积量达 $14.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中,1988、1992、1996等年份淤积量明显较大。持续的淤积使平滩面积大幅减小,主槽宽度持续缩窄<sup>[17]</sup>,过流能力大幅降低。1999年小浪底水库投入运行后,下游河床持续冲刷,其中游荡段冲刷量为 $11.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。河槽形态相应发生了一系列的变化,平滩河宽及水深都显著增大,主槽过流能力得到一定恢复<sup>[7,18]</sup>。

## 2 河段尺度平滩河槽形态变化计算

由于游荡段平面形态往往为宽窄相间的藕节状,各个断面的河槽形态沿程变化较大,河段内某一断面平滩河槽形态变化难以反映整个河段的调整趋势,因此用河段平均的平滩河槽形态参数来描述河段整体的河槽形态变化特征是必要的<sup>[9]</sup>。

### 2.1 河段尺度平滩河槽形态参数计算方法

河段尺度的平滩河槽形态参数可以通过对断面平滩河槽形态特征变量的直接平均求得,如算术平均和几何平均,但这些方法导致河段平滩面积与相应流速之积不等于河段平滩流量,不能满足水流连续条件。同理,若采用直接的几何平均法,也不能使河段平滩宽度与平滩水深之积恒等于该河段平滩面积。Harman等<sup>[8]</sup>提出采用基于对数转换的几何平均方法来避免上述问题,计算的平滩河槽特征变量可满足水流连续条件要求。黄河下游实测断面间距往往不完全相等,考虑到实测断面间距不均匀对计

算结果的影响,夏军强等<sup>[9,18]</sup>提出了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来计算河段平均的平滩河槽形态参数,即:

$$\bar{G}_{bf} = \exp\left(\frac{1}{2L} \sum_{i=1}^{N-1} (\ln G_{bf}^{i+1} + \ln G_{bf}^i) \times \Delta x_i\right) \quad (1)$$

式中,  $\bar{G}_{bf}$  为河段平均的平滩河槽形态参数(河宽  $\bar{B}_{bf}$ 、水深  $\bar{H}_{bf}$ 、面积  $\bar{A}_{bf}$ ),  $G_{bf}^i$  为第  $i$  断面的平滩河槽形态参数,  $L$  为河段全长,  $\Delta x_i$  为相邻 2 个断面 ( $i, i+1$ ) 的间距。河段平滩河相系数  $\bar{\zeta}_{bf}$  可由  $\sqrt{\bar{B}_{bf}/\bar{H}_{bf}}$  计算得到。该方法既避免了直接平均对水流连续条件的破坏,又充分体现了黄河下游统测断面分布不均对河段平滩河槽形态参数计算的影响。

## 2.2 河槽形态调整特点

黄河下游游荡段布设有 28 个统测淤积大断面,用于观测该河段的冲淤变化。首先,根据各个统测断面 1986—2012 年的平滩河槽形态,逐个确定各断面汛后的主槽范围及平滩水位;然后,得到相应的平滩河宽  $B_{bf}$ 、平均水深  $H_{bf}$ 、平滩面积  $A_{bf}$  等。根据这些断面尺度的平滩河槽形态参数,采用式(1)可计算得到游荡段各年河段平均的平滩河槽形态参数,平滩宽度与水深的计算结果如图 3 所示。

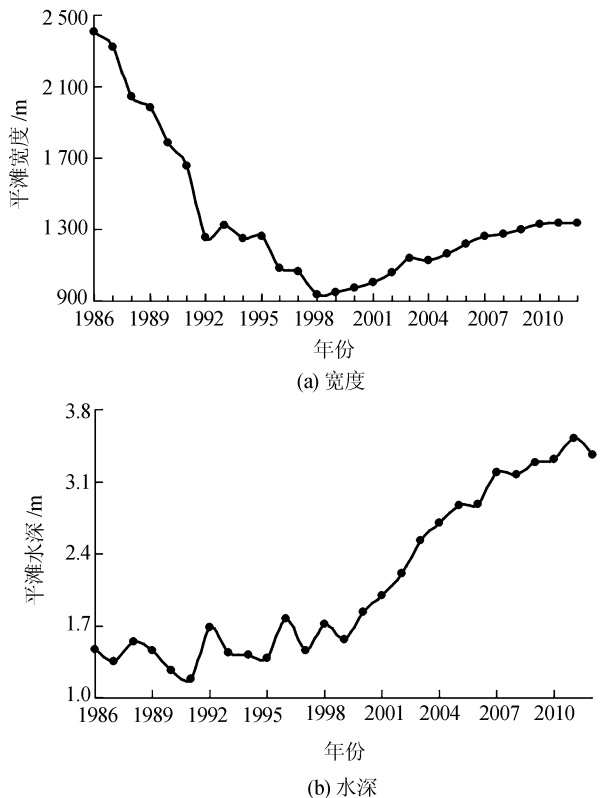


图3 河段平滩河槽形态参数变化

Fig.3 Variation in reach-scale channel geometry parameters

### 2.2.1 持续淤积阶段河槽调整特点

图 3(a)、(b) 中前半部分曲线分别给出了游荡段平滩宽度和水深在河床持续淤积阶段(1986—1999 年)的变化情况。如图 3(a) 所示,河段平滩宽度在 1986—1998 年期间持续减小,从 2 400 m 减小到小浪底水库运行前的 950 m 左右,减小幅度达 61%。而图 3(b) 所示的河段平滩水深在 1986—1998 年期间各年有增有减,增减幅度基本相当,平均值在这 13 a 间变化不明显,约在 1.5 m 左右。

从图 3 可以明显看到,河段平滩宽度各年份减小幅度不同,其中,1988、1992 以及 1996 年汛后平滩宽度减小幅度明显大于其他年份;平滩水深在多数年份均呈减小趋势,而这 3 个年份却有所增加。该变化特点与这些年份出现的高含沙洪水有关。1986—1999 年下游大洪水较少,但是高含沙量洪水出现的次数较多,1988、1992 及 1996 年的汛期洪水均为高含沙量洪水。高含沙水流在物理特性和运动特性等方面与一般挟沙水流不同,其造床作用有独特的特点。就断面形态而言,由于窄深断面单宽流量大,输沙能力强,高含沙水流通过的河道往往形成窄深的断面形态以适应水流通过;就冲淤分布而言,高含沙水流通过宽浅的游荡型河道时,水流挟沙力在涨峰阶段很高,引起主槽的严重冲刷,而漫滩水流则会给滩地带来大量淤积,这体现了黄河下游高含沙量洪水“淤滩刷槽”的基本规律。

图 3 中平滩宽度及水深在上述 3 个年份的变化情况反映了高含沙洪水的河床演变特点。在 1988、1992 及 1996 年,由于高含沙量洪水漫过滩地,大量泥沙在嫩滩落淤,使得平滩宽度减小幅度大于其他年份;同时,淤积的泥沙抬高了嫩滩滩唇高程,平滩高程增大,且回水对主槽的冲刷使平滩河槽明显加深,平均水深增大。这样就使得河槽断面形态趋于窄深,反映断面宽浅窄深程度的河相系数明显减小。特别是 1992 年,平滩河宽由 1 660 m 减小到 1 260 m,而平滩水深则由约 1.2 m 增大到 1.7 m 左右,河相系数相应地由 34.3 锐减至 21.0,游荡段河槽窄深程度大大增加。

高含沙水流往往在洪峰过程中发生,水流流量及含沙量都较大,河床响应强烈,会使水位涨落速度加快,发生强烈的主槽冲刷和滩地淤积,即通常所说的“大冲大淤”。由于滩地面积明显大于主槽面积,泥沙淤积量大于冲刷量,故高含沙水流通过时,河道总体而言是大量淤积的。从图 2 可知,上述 3 个年份汛期淤积量明显大于其他年份,分别达到  $3.9 \times$

$10^8$ 、 $4.7 \times 10^8$ 、 $5.6 \times 10^8$   $m^3$ 。

河段平滩面积的变化情况是平滩宽度与水深变化的综合体现,表征着主槽过流能力的大小。在持续淤积阶段,平滩面积从1986年的3 500  $m^2$ 持续减少到1999年的1 500  $m^2$ ,减幅高达58%。河相系数是平滩河槽形态几何特征的表征参数,代表河槽的宽浅或窄深程度。在游荡段持续淤积期间,河相系数有逐年减小趋势,值得注意的是,由于高含沙洪水的作用,1988、1992及1996年这3个年份的平滩河宽减小明显,而平滩水深有所增大,故河相系数减小十分显著。

### 2.2.2 持续冲刷阶段河槽调整特点

小浪底水库运行之后,下游河床的持续冲刷使游荡段的平滩河宽、水深均有所增加,但是二者增幅不同。河段平滩宽度从1999年汛后的950 m增加到2012年汛后的1 340 m,增幅为40%左右。河段平滩水深增加较明显,从最初的1.56 m增加到2012年汛后的3.36 m,增加了115%,增幅大于平滩宽度。由于河段平滩河宽及水深均增加,平滩面积也相应从约1 500  $m^2$ 增加到4 500  $m^2$ ,增幅高达200%。因此在近期下游游荡段的河槽形态调整中,平滩河槽既有横向展宽又有纵向冲深,平滩河宽及水深都有一定程度增加;河段平滩面积的增大使主槽过流能力得到一定程度的恢复。计算表明,河段平滩水深的增幅大于平滩河宽的增幅,可认为尽管近期游荡段的横向展宽过程较为突出,但河槽形态的调整仍以纵向冲深为主,河相系数呈减小趋势,整个游荡段的平滩河相系数由20.0降至10.9。

游荡段经历了持续冲刷与持续淤积阶段,平滩河槽形态在2个阶段调整趋势不同。河段平滩宽度先减小后增大,但是从1986年的2 500 m左右到2012年的1 300 m,并未恢复到河床萎缩前的河宽水平。这种情况的出现,与游荡段常见的生产堤有关。主槽一侧的生产堤限制了河槽冲刷时期的主槽展宽,一侧岸坡被生产堤阻挡,平滩河槽的展宽只能在单侧滩地进行。平滩水深在持续淤积期呈减小趋势,但在3个高含沙洪水年份有明显增大,在持续冲刷时期,平滩水深迅速增加到2012年汛后的3.4 m,相比1986年增大了130%。平滩面积从1986年的3 500  $m^2$ 增加到2012年的4 500  $m^2$ ,主槽的过流能力明显增大。在小浪底水库运行后,游荡段河槽主流趋于归顺集中,河相系数持续减小,断面形态向窄深方向发展。

## 3 平滩河槽形态与来水来沙关系

冲积河流的河槽形态主要由上游来水量、来沙量及其过程决定,现有河槽形态是前期水沙条件多年累积作用的结果。平滩河槽形态参数的变化无法完全跟随当年来水来沙条件的波动而变化,而是与前期若干年的平均值变化趋势一致<sup>[4-5]</sup>。根据这一理论,平滩河槽形态与前期水沙条件之间可以建立一定的经验关系。

### 3.1 与汛期及非汛期水沙条件关系

近年来非汛期的水量占年来水量的比例有所增大,且在汛期与非汛期都存在河床变形。非汛期水沙条件会对河槽形态的调整产生一定影响,因此分别对汛期及非汛期的来水来沙与平滩河槽形态的关系进行分析。在一定范围河段内,流量及来沙系数的变化幅度较小,因此可取河段进口断面水文站的流量及来沙系数作为该河段的来水来沙条件。取小浪底、黑石关及小董3站之和(小黑小)的若干年汛期及非汛期平均流量及来沙系数作为进入下游游荡段的水沙条件,与河段平滩河槽形态参数(平滩河宽、水深、面积及河相系数)进行多元非线性回归分析。以河段平滩面积为例,不难发现,前期4年平均的汛期或非汛期流量、来沙系数与其相关系数分别达到最大<sup>[5]</sup>,表明水沙条件对游荡段河段平滩河槽调整的影响时间约为4年。

点绘河段平滩面积与前期4年平均的汛期及非汛期水沙条件的相关关系,如图4所示。

从图4可以看到,河段平滩面积与汛期水沙条件相关关系较好,相关系数达到0.935;而河段平滩面积与非汛期水沙条件的相关程度虽然不高,但仍然可以看到二者存在一定的相关关系。同样地,河段平滩宽度、水深、河相系数与前期4年水沙条件存在类似的关系。因此平滩河槽形态参数与汛期及非汛期水沙条件之间都存在一定的关系,即上游汛期与非汛年来水来沙条件的组合共同决定平滩河槽形态变化。

### 3.2 与综合水沙条件关系

鉴于汛期及非汛期的来水来沙对平滩河槽的塑造都有影响,可将前期4年平均的汛期及非汛期流量、来沙系数作为一个综合参数,与河段平滩河槽形态参数建立经验关系,即:

$$\bar{G}_{bf} = k_1 (\bar{Q}_{4fd})^{\alpha_1} (\bar{\xi}_{4fd})^{\beta_1} + k_2 (\bar{Q}_{4nf})^{\alpha_2} (\bar{\xi}_{4nf})^{\beta_2} \quad (2)$$

式中:  $\bar{G}_{bf}$  为河段尺度平滩河槽形态参数;  $\bar{Q}_{4fd}$ 、 $\bar{\xi}_{4fd}$  分别为前期4年平均的汛期流量及来沙系数;  $\bar{Q}_{4nf}$ 、 $\bar{\xi}_{4nf}$  为前期4年平均的非汛期流量及来沙系数;  $k_1$ 、 $\alpha_1$ 、

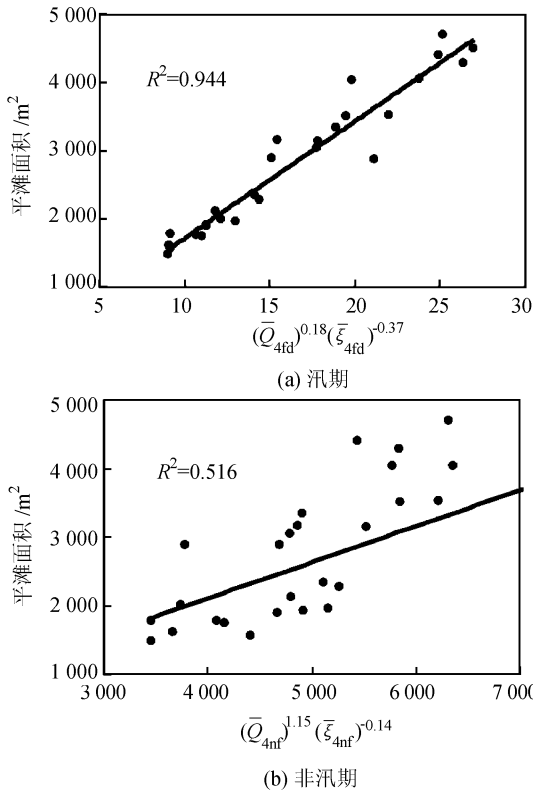


图 4 河段平滩面积与水沙条件关系

Fig. 4 Relationship between reach-scale bankfull area and discharge and incoming sediment coefficient

$\beta_1, k_2, \alpha_2, \beta_2$  分别为回归的系数与指数。

通过多元非线性回归的方法, 分别对河段平滩河槽形态参数与小黑小前期 4 年平均汛期及非汛期流量与来沙系数综合参数之间的关系进行分析, 可得到式(2) 中系数  $k$  及指数  $\alpha$  与  $\beta$ , 结果如表 1 所示。

表 1 式(2) 中参数的确定

Tab. 1 Calibrated parameters in Eq. (2)

平滩河槽形态	宽度 $\bar{B}_{bf}/m$	水深 $\bar{H}_{bf}/m$	面积 $\bar{A}_{bf}/m^2$	河相系数 $\bar{\zeta}_{bf}/m^{-0.5}$
$k_1$	2. 13	30. 99	177. 30	0. 24
$\alpha_1$	0. 82	- 0. 57	0. 14	0. 73
$\beta_1$	- 0. 14	- 0. 28	- 0. 40	0. 11
$k_2$	517. 62	—	0. 02	- 0. 17
$\alpha_2$	0. 08	—	1. 48	0. 46
$\beta_2$	0. 19	—	- 0. 02	- 0. 09
$R^2$	0. 871	0. 920	0. 933	0. 887

根据小黑小的水沙条件, 采用式(2) 及表(1) 中的数据计算出游荡段  $\bar{G}_{bf}$  值, 同时给出实测所得的 1986—2012 年汛后河段平滩河槽形态参数, 如图 5 所示。

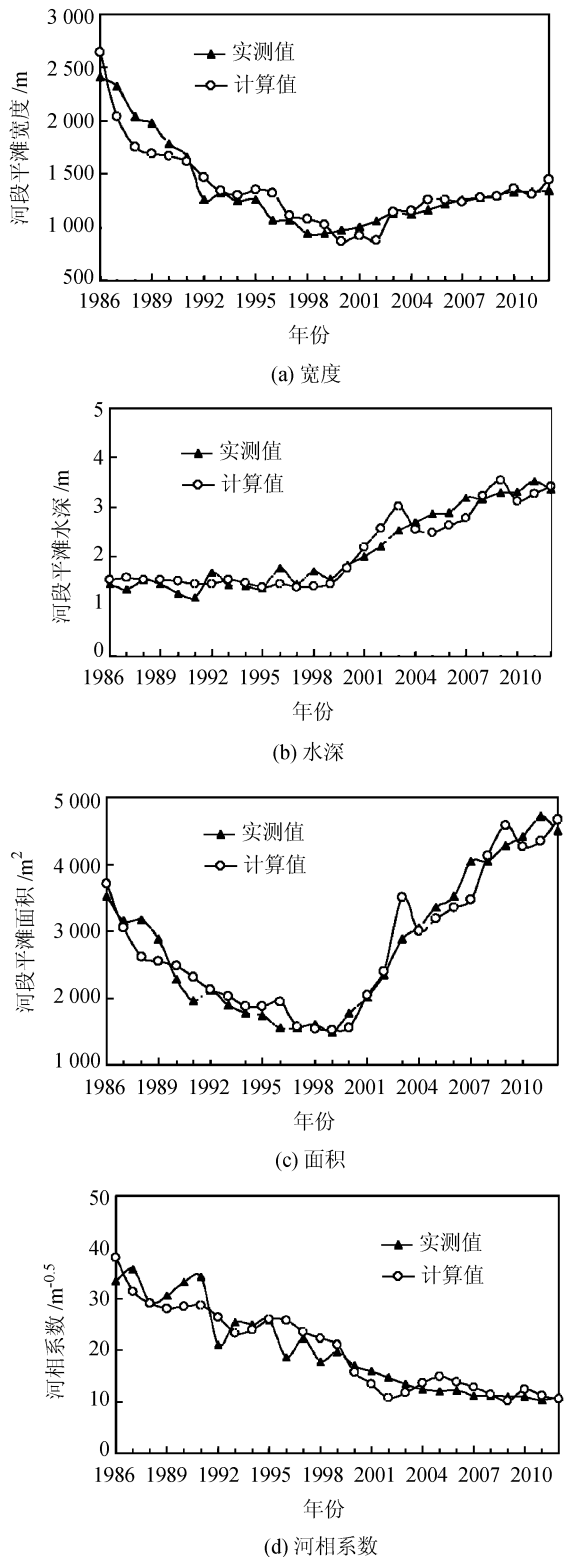


图 5 平滩河槽形态参数的实测值及计算值比较

Fig. 5 Comparisons between the calculated and measured bankfull channel geometry parameters

从表 1 中数据可以看到, 汛期及非汛期水沙条件分别对平滩河槽形态调整的有不同的影响。河段平滩宽度与综合水沙条件的经验关系式中  $\alpha_1 > 0$ ,

即 $\bar{B}_{br}$ 随汛期流量增加而增大; $\beta_1 < 0$ ,即 $\bar{B}_{br}$ 随汛以来沙系数增加而减小。且 $\bar{B}_{br}$ 对汛期流量的变化较为敏感,若汛期流量增大,平滩宽度将会出现明显增加。同时,平滩宽度的大小受非汛期水沙条件的影响也较大。

由于 1988 等 3 个年份的高含沙量洪水的出现,使得当年平滩水深的变化规律异于其他年份。在持续淤积阶段,河段平滩水深与来水来沙条件的关系较为散乱。而在持续冲刷阶段,平滩水深的变化具有很强的规律性,平滩水深随流量的增加而增大,随来沙系数的增加而减小。非汛期的水沙条件对平滩水深的影响并不明显,回归得到的系数与指数都比较小,可以认为平滩水深主要由汛期水沙条件决定。

河段平滩面积是平滩宽度与水深的综合体现,从表 1 中看到,平滩面积同时受到汛期及非汛期水沙条件影响,与流量正相关,与来沙系数负相关,且相关系数高达 0.933。由于河相系数由 $\sqrt{B_{br}/H_{br}}$ 得到,而河段平滩水深在持续淤积阶段的变化规律性受到高含沙洪水的影响,因此河相系数与综合水沙条件的回归结果也未能呈现出清晰的规律性。但是可以看到,流量对河相系数的影响程度大于来沙系数对河相系数的影响。

从图 5 可以看到,采用式(2)计算所得的平滩河槽形态参数值与实测值变化趋势一致,且二者在数值上相当接近。因此,根据前期实测水沙资料,利用回归分析建立的关系式来预测河段平滩河槽形态的调整是可靠的。

## 4 结 论

黄河下游游荡段平滩河槽形态与来水来沙关系密切,随着水沙条件的改变,河段河槽形态进行了相应的调整。作者以 1986—2012 年游荡段 28 个汛后实测断面资料为基础,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,计算了河段尺度平滩河槽特征参数,分析了其调整过程及变化规律。通过分析平滩河槽形态与汛期及非汛期来水来沙条件之间的关系,揭示了游荡段河床经历持续淤积及冲刷过程的演变规律。主要结论如下:

1) 河段尺度的平滩河槽形态参数变化情况可以全面反映自 1986 年以来游荡段经历的淤积及冲刷过程。河段平滩宽度先大幅减小后缓慢增大;平滩水深在持续淤积期基本不变,而在持续冲刷期迅速增加;平滩面积先减小后增大,主槽过流能力增大;河相系数持续减小,游荡段平滩河槽趋于窄深。

2) 河段尺度的平滩河槽形态参数与前期 4 年平均的汛期及非汛期流量、来沙系数之间都存在一定的相关关系,非汛期的水沙条件对平滩河槽形态变化的影响不可忽略。

3) 建立了河段平滩河槽形态与前期 4 年综合水沙条件之间的经验关系式,该式较好反映了汛期及非汛期水沙因子对河槽形态的不同影响,相关系数较高,可用于预测游荡段平滩河槽形态变化情况。

## 参考文献:

- [1] 钱宁,张瑞瑾,周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [2] Leopold L, Maddock T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implication[R]. Washington D C: Government Printing Office, 1953.
- [3] He Laien, Wilkerson G. Improved bankfull channel geometry prediction using two-year return-period discharge[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2011, 47(6): 1298 - 1316.
- [4] Wu Baosheng, Xia Junqing, Fu Xudong, et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the lower Yellow River, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(10): 1585 - 1601.
- [5] Wu Baosheng, Zhang Yuanfeng, Xia Junqing. Variation of bank-full area at Gaocun station in the lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2008(2): 34 - 40. [吴保生,张原锋,夏军强. 黄河下游高村站平滩面积变化分析[J]. 泥沙研究, 2008(2): 34 - 40.]
- [6] 梁志勇,王兆印,王煜,等. 黄河下游水沙搭配与河床响应研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.
- [7] Chen Jianguo, Hu Chunhong, Dong Zhandi, et al. Change of bankfull and bed-forming discharges in the lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2006(5): 10 - 16. [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.]
- [8] Harman C, Stewardson M, de Rose R. Variability and uncertainty in reach bankfull hydraulic geometry[J]. Journal of Hydrology, 2008, 351(1/2): 302 - 316.
- [9] Xia Junqing, Li Xiaojuan, Li Tao, et al. Response of reach-

- scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River[J]. *Geomorphology*, 2014, 213: 255 – 265.
- [10] Li Xiaojuan. Estimation of bankfull channel geometry and discharging capacity in the lower Yellow River [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013: 9 – 11. [李晓娟. 黄河下游黄河下游平滩河槽形态参数与过流能力计算[D]. 武汉: 武汉大学, 2013: 9 – 11.]
- [11] Li Wenwen, Fu Xudong, Wu Baosheng, et al. Influences of non-flood-season flow and sediment load on bankfull discharge in lower Yellow River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(1): 132 – 138. [李文文, 傅旭东, 吴保生, 等. 黄河下游非汛期来水来沙对平滩流量的影响[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(1): 132 – 138.]
- [12] Hu Chunhong, Chen Jianguo, Liu Dabin, et al. Studies on the features of cross section's profile in lower Yellow River under the conditions of variable incoming water and sediment[J]. *Advance in Water Science*, 2006, 37(11): 1283 – 1289. [胡春宏, 陈建国, 刘大滨, 等. 水沙变异条件下黄河下游河道横断面形态特征研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(11): 1283 – 1289]
- [13] Xia Junqing, Li Xiaojuan, Zhang Xiaolei, et al. Recent variation in reach-scale bankfull discharge in the lower Yellow River[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(6): 723 – 734.
- [14] Zhang Shaowen, Ding Jing, Liao Jie, et al. Analysis of natural annual flow time series in the upper reach of the Yellow River based on wavelet transform[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2004, 36(3): 32 – 37. [张少文, 丁晶, 廖杰, 等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2004, 36(3): 32 – 37.]
- [15] Wei Zhilin, Zhao Lianjun, Tan Guangming, et al. Scouring simulation of river bed downstream of the Yellow River in the early operation period of Xiaolangdi reservoir[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2005, 37(2): 10 – 15. [韦直林, 赵连军, 谈广鸣, 等. 小浪底水库运用初期黄河下游河道冲刷模拟计算[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2005, 37(2): 10 – 15.]
- [16] 潘贤娣, 李勇, 张晓华, 等. 三门峡水库修建后黄河下游河床演变[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [17] Xu Jiongxin, Sun Ji. Tendency of channel change of the lower Yellow River during its shrinkage[J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(1): 10 – 17. [许炯心, 孙季. 黄河下游游荡河道萎缩过程中的河床演变趋势[J]. *泥沙研究*, 2003(1): 10 – 17.]
- [18] Xia Junqing, Wu Baosheng, Wang Yanping. Processes and characteristics of recent channel adjustment in the lower Yellow River[J]. *Advance in Water Science*, 2008, 19(3): 301 – 308. [夏军强, 吴保生, 王艳平. 近期黄河下游河床调整过程及特点[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 301 – 308.]

(编辑 张琼)