

# 黄河下游游荡段排沙比与水沙条件与断面形态的响应

程亦菲, 夏军强, 周美蓉, 王英珍

(武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 提高黄河下游游荡段的输沙能力是河道治理的主要任务, 而河道输沙效率(排沙比)受到来水来沙条件和河床边界条件的共同影响。本文基于1971—2016年花园口—高村河段(简称花高段)的实测水沙及地形资料, 计算了花高段的平均河相系数及水沙条件(来沙系数和水流冲刷强度), 从汛期和场次洪水2个时间尺度, 定量分析了排沙比与水沙条件及前一年汛后主槽形态之间的响应关系。分析结果表明: ① 汛期和场次洪水排沙比与来沙系数呈负相关, 与水流冲刷强度呈正相关, 临界的汛期不淤来沙系数为 $0.012 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ , 场次洪水排沙比与来沙系数及水量比的决定系数为0.76; ② 游荡段排沙比与河相系数呈负相关, 当河相系数大于 $15/\text{m}^{0.5}$ 时, 河段排沙比基本小于1; ③ 以来沙系数与河相系数为自变量的汛期排沙比计算式的决定系数为0.82, 计算精度较高, 对于场次洪水排沙比而言, 断面形态的影响权重大于来沙系数。这些排沙比计算公式能够反映游荡段的输沙特点, 有助于定量掌握断面形态及水沙条件对河道输沙能力的影响。

**关键词:** 主槽形态; 水沙条件; 排沙比; 汛期; 场次洪水; 游荡段; 黄河下游

DOI: 10.11821/dlxb202101010

## 1 引言

排沙比是指在一定的时段内, 由河段输出的沙量与进入该河段的总沙量之比, 常用作黄河下游输沙能力的评价指标<sup>[1]</sup>。河道输沙是针对某一特定河段或整个河道而言的, 它不要求满足输沙平衡条件, 不同情景下的河道都具有一定的输沙功能<sup>[2]</sup>。黄河的多沙特性使得下游河床不断淤积抬升, 自小浪底水库运行以来, 下游来沙量显著减少, 但前期河道淤积升高仍然给下游输沙带来很大压力<sup>[3]</sup>, 因此提高游荡段河道的输沙能力仍是河道治理的关键所在。

目前排沙比公式的建立主要有2种方法。① 基于输沙率关系推导排沙比公式结构, 其中水动力学方法建立的输沙率关系依靠河道初始边界条件计算水流挟沙力, 但由于河道边界条件的调整计算较为复杂且尚未成熟, 因此目前主要依靠水文学输沙率关系的统计回归<sup>[4]</sup>, 其中参数能间接反映河流边界条件的影响<sup>[5-6]</sup>。梁志勇等<sup>[7]</sup>根据非饱和输沙理论及黄河下游1960—1999年422场次的洪水资料, 推导并率定了排沙比公式, 同时建立了黄河下游各河段冲淤平衡的临界水沙条件。吴保生等<sup>[8]</sup>以1950—2002年黄河下游汛期和年水沙资料为基础, 利用输沙率关系建立了下游河段汛期和全年排沙比的计算公式, 决

收稿日期: 2019-09-25; 修订日期: 2020-11-05

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51725902, 51579186); 国家重点研发计划(2017YFC0405501) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51725902, No.51579186; National Key R&D Program of China, No.2017YFC0405501]

**作者简介:** 程亦菲(1997-), 女, 湖北黄冈人, 博士生, 主要从事河流动力学研究。E-mail: chengyf@whu.edu.cn

**通讯作者:** 夏军强(1974-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士生导师, 主要从事河流动力学研究。E-mail: xiajq@whu.edu.cn

定系数较高且考虑了引水对输沙的影响。费祥俊等<sup>[9]</sup>基于不平衡输沙关系和黄河下游 1960—1996 年场次洪水资料, 推导并率定出黄河下游各河段排沙比与进口来沙系数的关系, 反映了黄河下游上段冲淤幅度大于下段的演变特性。Fu 等<sup>[10]</sup>分析了黄河下游 1950—1986 年 277 次洪水资料, 获得了场次洪水排沙比的关系式和排沙比的 95% 预测区间, 近似量化了场次洪水排沙比的不确定性程度。② 实测排沙比与其影响因子的直接回归。韩其为<sup>[11]</sup>根据三门峡水库的资料, 建立了下游河道排沙比与水库排沙比的关系, 二者关系密切。Xu<sup>[12]</sup>基于 1950—1960 年和 1969—1985 年 144 次的洪水资料, 定量分析了黄河下游各河段排沙比与洪水平均含沙量的关系, 间接揭示了河床形态与河道输沙效率之间的关系。李小平等<sup>[13]</sup>以黄河下游 1950—2005 年实测洪水资料为基础, 定性分析了场次洪水排沙比与含沙量及流量的关系, 揭示了场次洪水的冲淤特性。张艳艳等<sup>[14]</sup>采用多项式拟合与逐步回归相结合的方法确定排沙比的主要影响因素, 以黄河下游 1950—1985 年 277 次的实测洪水资料, 建立了不考虑引水引沙的场次洪水排沙比公式。Guo<sup>[15]</sup>分析了黄河下游 1960—2012 年各河段不同流量级下冲淤比与进口含沙量的关系, 并确定了黄河下游长时段均衡输沙的水沙搭配组合。Ni<sup>[16]</sup>采用神经网络的方法分析了 1980—1998 年黄河下游游荡段洪水输沙效率与含沙量及流量的关系, 并指出了最优含沙量和最优流量的搭配组合。此外韩其为<sup>[17]</sup>改写了挟沙力计算公式, 从理论上反映了不同河型对输沙能力的影响。Huang 等<sup>[18]</sup>从理论上推导了均衡河流输沙率的关系式, 揭示了在流量、比降及泥沙组成一定的条件下, 输沙能力由过水断面宽深比决定, 且存在最优河相关系。在洪水过程给定时, 河床形态决定了水流动力条件, 因此其对泥沙输移有很大影响。然而目前研究多考虑排沙比与水沙条件的关系, 河床形态的影响只得到了间接反映, 水沙动力学计算方法过于复杂不适合实际工程运用, 因此本文将在前人研究基础上建立结构简单且能直接反映断面形态影响的排沙比计算公式, 为了解断面形态和水沙条件对河段排沙比的综合影响提供依据。

本文以黄河下游游荡段 1971—2016 年实测水沙数据和汛前汛后大断面地形资料为基础, 从不同时间尺度 (汛期和场次洪水), 分析游荡段排沙比对汛期水沙条件和前一年汛后断面形态的响应规律。

## 2 研究河段与计算方法

### 2.1 研究河段

黄河下游孟津至高村为典型的游荡段, 长约 284 km, 小浪底水库运行前河段内设有花园口、夹河滩和高村 3 个水文站以及八堡、黑石、辛寨等 28 个淤积观测断面 (图 1)。游荡河段平面上在较长范围内呈宽窄相间的藕节状<sup>[19]</sup>, 同时具有水流“宽浅散乱”、主流

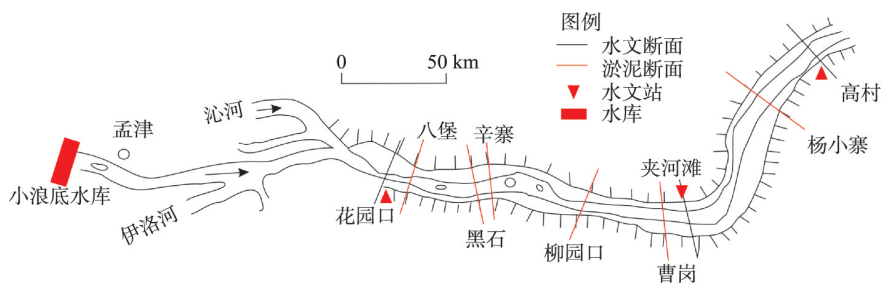


图 1 黄河下游游荡段示意

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

摆动频繁、河槽易淤善冲等演变特点<sup>[20]</sup>。游荡段滩岸土体黏粒含量少、抗冲能力差、滩岸侵蚀严重<sup>[21]</sup>, 而河床组成主要是最容易起动的粉细沙, 加之河床纵比降陡, 因此河势多变, 易形成“横河”“斜河”等危险河势<sup>[22]</sup>。

实测资料表明, 1971—2016年花园口、夹河滩和高村断面形态变化复杂。1970年汛后3个水文断面的平滩河宽分别为3234 m、1563 m、2100 m, 而1999年汛后各平滩河宽为1480 m、382 m、644 m, 减小幅度均在50%以上, 这一阶段平滩水深总体变化不大, 到2015年汛后, 各断面平滩河宽分别恢复至2501 m、1712 m、682 m, 且平滩水深增幅较大。因此小浪底水库运行前(1971—1999年)各断面河槽萎缩, 小浪底水库运行后各断面纵向冲深和横向展宽同时发生。从全河段上看, 在此期间(1971—2016年)黄河下游游荡段断面形态趋向窄深。

## 2.2 水沙过程及河床冲淤

黄河下游水沙条件受到中上游自然条件和人类活动的共同影响, 1971—2016年下游来水来沙(小浪底+黑石关+武陟)总体表现为水沙量持续减少、非汛期水量增加以及下游洪峰流量持续降低, 其中输沙量大幅度降低的主要驱动因素是黄河流域的水土保持措施<sup>[23]</sup>。图2给出了1971—2016年黄河下游汛期与水文年的水量及沙量的变化过程。1971—1985年龙羊峡水库运行前黄河下游来水来沙量变幅较大, 年最大来水量达572亿m<sup>3</sup>, 最小来水量仅为289亿m<sup>3</sup>, 年最大来沙量为20亿t, 而最小来沙量仅为6亿t。1986年以来年来水量变化幅度不大, 平均为264亿m<sup>3</sup>/a, 但非汛期水量占比由0.4增加至0.7, 平均维持在0.6; 而来沙量则持续减少, 尤其是自小浪底水库运行以来, 汛期和年来沙量减少近90%, 2000—2016年平均来沙量仅为0.62亿t/a, 汛期来沙量占全年沙量的95%。

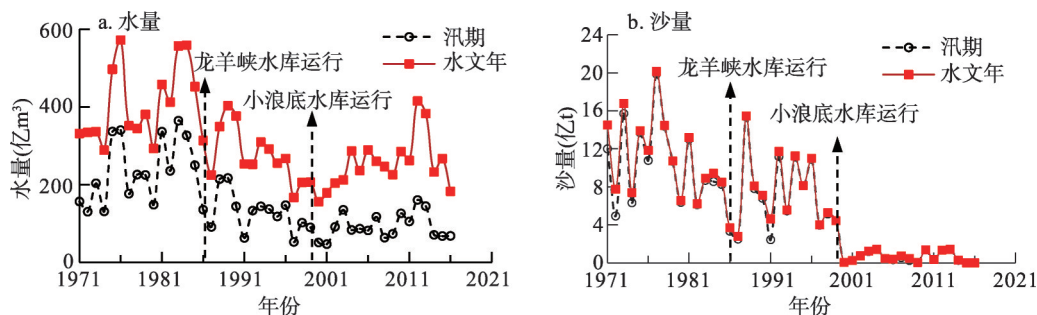


图2 黄河下游来水来沙量的变化过程

Fig. 2 Temporal variations in flow-sediment regime entering the Lower Yellow River

图3a给出了1971—2016年黄河下游及游荡段累计冲淤量的变化过程, 二者趋势基本一致。龙羊峡水库运行前(1971—1985年)下游冲刷期和淤积期交替发生; 但在1986—1999年, 受龙羊峡等水库的调节作用以及降雨等因素的影响, 下游枯水历时增加, 汛期水量占比减少, 河流输沙动力不足, 导致下游基本处于持续淤积状态。1999年累计淤积量达到最大值(31.83亿m<sup>3</sup>), 其中游荡段累计淤积17.14亿m<sup>3</sup>; 小浪底水库运行后黄河下游河床持续冲刷, 至2016年全下游累计冲刷量为19.11亿m<sup>3</sup>, 其中游荡段占全下游冲刷量的72%。

## 2.3 计算方法

**2.3.1 排沙比计算** 考虑到水文断面的位置, 以花园口站汛期或场次洪水来沙量作为进口沙量  $W_{s, in}$ , 以高村站汛期或场次洪水来沙量作为输沙量  $W_{s, out}$ , 暂用花园口—高村河段(花高段)排沙比(SDR)代表游荡段的输沙能力, 相应计算关系可写成如下:

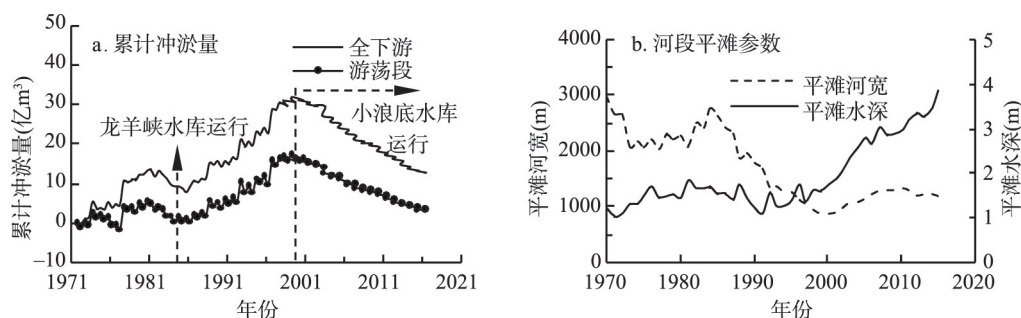


图3 黄河下游累计冲淤量变化及花高段平滩河槽形态参数

Fig. 3 Variations in accumulated channel evolution volume in the Lower Yellow River (a) and characteristic bankfull channel parameters (b) in the braided reach between Huayuankou and Gaocun

$$SDR = W_{s, out} / W_{s, in} \quad (1)$$

计算结果表示游荡段排沙比的实测值,  $SDR$  越大说明输沙效率越高;  $SDR > 1$ , 说明花高段发生冲刷 (基于输沙率法计算);  $SDR < 1$ , 说明花高段发生淤积;  $SDR = 1$ , 花高段接近冲淤平衡, 可视为高效输沙。

**2.3.2 河段尺度的平滩河槽形态参数计算** 此处采用基于对数变换的几何平均方法, 并结合考虑断面间距影响的加权平均方法<sup>[24]</sup>, 可求得花高段汛后平均的平滩河槽形态参数:

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

式中:  $G_{bf}^i$ 、 $G_{bf}^{i+1}$  分别表示第  $i$ 、 $i+1$  个断面的平滩河槽形态参数, 如平滩河宽  $B_{bf}$ 、平滩水深  $H_{bf}$ ;  $\Delta x_i$  表示这 2 个断面之间的距离;  $N$  为河段内实测淤积断面数量;  $L$  为花高段长度;  $\bar{G}_{bf}$  为河段平滩河槽形态参数 (如平滩河宽  $\bar{B}_{bf}$ , 平滩水深  $\bar{H}_{bf}$ )。该加权平均法保证了水流连续性条件, 但其计算精度与河段内布设的统测断面数量有关。夏军强等<sup>[25]</sup>分析了黄河下游统测断面数量分别为 91 个和 333 个 (对应的游荡段统测断面数量为 28 个和 156 个) 2 种情形下各河段平均平滩参数的大小, 计算结果发现, 各河段数值相差均在 3% 以内。故此处汛后平均的花高段平滩河槽形态参数采用基于 18 个统测断面的计算结果 (对应游荡段为 28 个统测断面)。

在河床演变分析中, 通常采用水位平滩时的河槽特征值来表示河道的主槽形态, 本文采用应用广泛且简洁的宽深比关系式, 即河相系数  $\zeta$  ( $\zeta = \sqrt{\bar{B}_{bf}} / \bar{H}_{bf}$ ) 来表示主槽形态。考虑到汛前主槽形态与河道输沙能力密切相关, 故此处平滩河宽和水深都取前一年相应值 (1970—2015 年)。基于式 (2) 计算得到的平滩河宽和水深, 如图 3b 所示。

**2.3.3 来水来沙条件的计算方法** 来水来沙条件是河床形态调整的主要动力, 包括流量、含沙量等组合情况<sup>[26]</sup>。从泥沙分布时间上看, 黄河下游河道来沙主要集中在汛期 (占全年来沙量的 80%~90%), 同时汛期来沙又集中在几场洪水, 导致高含沙洪水发生, 从而使黄河下游河道淤积严重。实测资料表明: 高含沙洪水是造成下游河道严重淤积的主要原因, 也是引起河床变形的主要因素<sup>[9]</sup>。因此本文选定汛期和场次洪水的来沙系数  $\xi$ <sup>[27]</sup> 以及水流冲刷强度  $F$ <sup>[28]</sup> 来表示水沙条件。

来沙系数为平均含沙量与平均流量的比值 ( $\xi = \bar{S} / \bar{Q}$ ), 反映了相对于来水量而言来沙量的多寡。水流冲刷强度可表示为:

$$F = (\bar{Q}^2 / \bar{S}) / 10^4 \quad (3)$$



式中:  $\bar{Q}$  和  $\bar{S}$  分别为花园口站汛期或场次洪水平均流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 及含沙量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $F$  为汛期或场次洪水的水流冲刷强度 ( $\text{m}^9/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$ ), 为水流动量对河床演变的作用<sup>[19]</sup>。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 排沙比与来水来沙条件的关系

汛期水沙资料采用花园口站 1971—2016 年实测数据, 该时期汛期平均流量变化范围为  $422.6\sim 3576.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , 含沙量变化在  $0.37\sim 89.77 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。因此汛期流量与含沙量的变幅较大, 体现了各种水沙组合。需要指出的是在此期间除了 1997 年外其余年份汛期的水量比 (出口水量与进口水量的比值) 均处于  $0.8\sim 1.0$ , 说明花高段汛期引水比较少, 加上汛期大河冲淤变化幅度大, 因此这 45 年汛期引水引沙对该河段冲淤调整影响可以忽略。但是 1997 年花高段汛期水量比急剧减少为 0.6, 显然除了引水作用还有其他人为因素不可忽略, 因此认为该年汛期水量不守恒, 故此处分析中将该组数据剔除。场次洪水资料采用 1971—2007 年的实测水沙数据, 但数据来源有限, 部分年份 (1986 年、1987 年、1990 年、1993 年、2000 年、2001 年、2003 年) 缺失资料。其中 1985 年以前的数据, 来源于黄委水科所<sup>[29]</sup>编制的统计资料, 其余采用申冠卿等<sup>[30]</sup>统计的高含沙洪水资料, 总计 108 场次洪水。这些场次洪水平均流量在  $1100\sim 7200 \text{ m}^3/\text{s}$  变化, 含沙量在  $10\sim 226 \text{ kg}/\text{m}^3$  变化, 因此这些洪水基本上不含清水小流量 ( $\bar{S} < 10 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $\bar{Q} < 1700 \text{ m}^3/\text{s}$ )<sup>[31]</sup> 的组合情况。由于场次洪水相比于全汛期而言属于较小时间尺度, 而短时间内洪水过程无法完全传播到下游, 再加之可能出现的洪峰沿程增值或沿程衰减现象, 因此分析场次洪水排沙比时需要引入水量比因子来考虑场次洪水的不恒定性<sup>[14]</sup>。

##### 3.1.1 汛期排沙比与来水来沙条件的关系

###### (1) 排沙比与来沙系数的关系

分析花高段汛期排沙比与汛期来沙系数 (花园口站) 的关系, 并将结果点绘于图 4a 中, 二者呈较好的负相关关系。说明相对于来水量而言, 来沙量较小时, 排沙比较大, 河段甚至发生冲刷。当花园口站来沙系数在  $0\sim 0.15 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$  变化时, 花高段排沙比变幅为  $0.5\sim 4.0$ , 且变化幅度较大, 说明游荡段输沙能力变幅比较大。小浪底水库运行前汛期排沙比大部分小于 1, 说明在研究期内水库运行前黄河下游游荡段基本处于淤积状态。由拟合的幂函数关系式可以求得排沙比为 1 时的来沙系数为  $0.012 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ 。Ma 等<sup>[32]</sup>分析了 1951—2004 年黄河下游游荡段汛期冲淤量与来沙系数的关系, 并将来沙系数  $0.006 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$  视为冲淤平衡临界值。该值小于此处曲线的拟合值, 因为在冲淤平衡 (冲淤量为 0 或排沙比为 1) 附近, 二者不是简单的单值关系。Ma 等<sup>[32]</sup>取冲淤平衡对应的最小来沙系数作为临界水沙条件, 曲线拟合则考虑了点群的分布, 得到了平均统计结果。

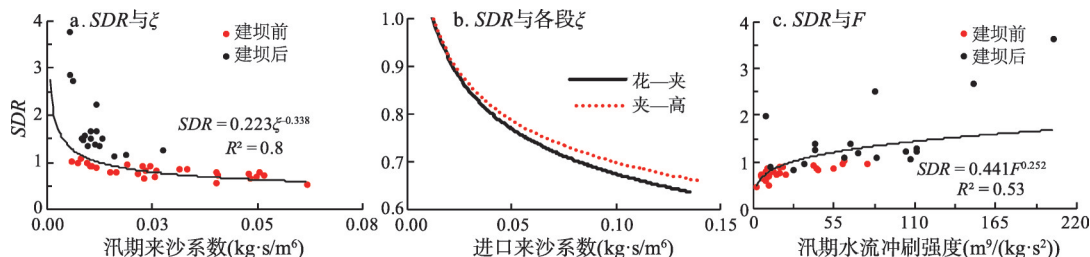


图4 汛期排沙比与来水来沙条件的关系

Fig. 4 Relationship between SDR and flow-sediment regime during flood seasons

为进一步研究游荡段的输沙特性, 现将花高段分为2段: 花园口至夹河滩(花夹段)和夹河滩至高村(夹高段)。分析排沙比与所在河段进口来沙系数的关系(图4b), 花夹段与夹高段同属于游荡段, 因此从数值上来看排沙比相差不大。但是在同一来沙系数下, 夹高段的排沙比大于花夹段, 说明相对窄深的夹高段的输沙效率得到了强化。

## (2) 排沙比与水流冲刷强度的关系

基于花园口站1971—2016年历年汛期水流冲刷强度, 点绘花高段历年汛期排沙比与汛期水流冲刷强度的关系(图4c)。花园口站的汛期冲刷强度集中在 $100 \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ 以内, 排沙比大致集中在0~1.5, 排沙比随着汛期冲刷强度的增加而缓慢加大, 两者呈一定的幂函数关系, 与以来沙系数为自变量的经验公式比, 决定系数减小了34%。

## 3.1.2 场次洪水排沙比与来水来沙条件的关系

### (1) 排沙比与来沙系数的关系

选择每年汛期的第一场洪水作为分析对象, 点绘花高段场次洪水排沙比与花园口站相应来沙系数的关系, 如图5a所示。来沙系数增大, 场次洪水的排沙比减小, 与汛期输沙特性一致。这些洪水的来沙系数在 $0 \sim 0.15 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 变化, 场次洪水排沙比变化范围为 $0.3 \sim 1.2$ , 在来沙系数相对较小时, 场次洪水排沙比迅速减小, 但当来沙系数相对较大时, 场次洪水排沙比减小幅度变缓。许炯心<sup>[33]</sup>在研究黄河下游洪水输移特性时已经观察到洪水排沙比与含沙量、来沙系数之间存在转折点, 说明场次洪水排沙比与水沙组合关系存在某种临界条件, 并指出相应的临界排沙比约为0.7。图5a曲线的上半段, 即排沙比大于0.75时, 场次洪水排沙比随来沙系数的增大下降速率较快, 而在曲线下半段, 排沙比的下降速率减小, 这与前述研究相符。此外还应该注意到, 图中大部分洪水排沙比低于1, 有些甚至低于0.5, 属于严重淤积情形。

### (2) 场次洪水排沙比与水流冲刷强度的关系

点绘场次洪水排沙比与花园口站相应场次洪水的水流冲刷强度的关系, 如图5b所示。虽然数据点较为分散, 但场次洪水排沙比随水流冲刷强度的增大而增大的趋势明显。当冲刷强度由较小增长至 $30 \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ 左右时, 排沙比的增幅很大; 当冲刷强度继续增大时, 场次洪水排沙比的增幅放缓, 说明继续加大流量对河道输沙的作用不大, 转折点对应的临界排沙比也在0.7左右。

### (3) 场次洪水排沙比与水量比的影响

水量比对场次洪水排沙比的不确定性有很大影响, 因此在排沙比对来沙系数的响应中增加考虑水量比因子, 率定得到的计算关系为:

$$SDR = 0.487 \zeta^{-0.149} \left( \frac{W_{\text{高村}}}{W_{\text{花园口}}} \right)^{1.161} \quad (R^2 = 0.76) \quad (4)$$

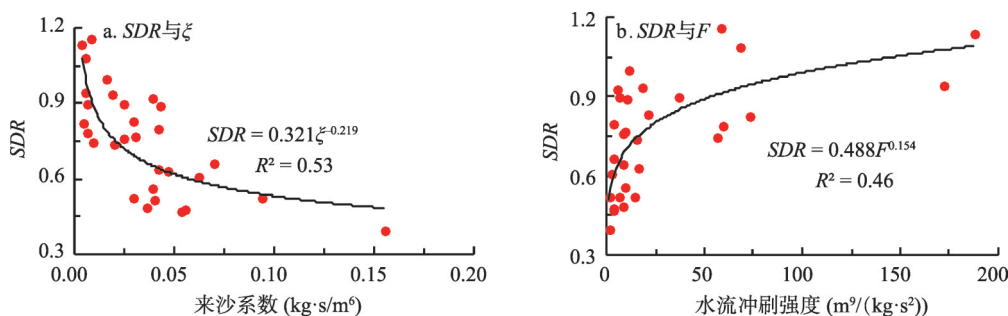


图5 场次洪水排沙比与水沙条件的关系

Fig. 5 Relationship between SDR and flow-sediment regime in flood events

该经验公式表明场次洪水排沙比与水量比呈正相关，且决定系数提高了43%。对于场次洪水而言，水量比反映了洪水过程的不恒定性，水量比越大，表明沿程流量衰减幅度较缓，能耗减少，水动力条件增强<sup>[34]</sup>，因此输沙效率增强。

### 3.2 排沙比与主槽形态的关系

#### (1) 汛期排沙比与主槽形态的关系

点绘花高段1971—2016年历年汛期排沙比与花高段前一年汛后主槽形态的关系，如图6a所示。图6a表明断面越宽浅，河段排沙比越小，当河相系数大于 $15/\text{m}^{0.5}$ 时，河段汛期排沙比基本小于1（处于淤积状态）。从整体上看花高河段在这些年份中有冲有淤，汛期排沙比在1上下浮动。当河相关系从0增加至 $20/\text{m}^{0.5}$ 时，汛期排沙比从3.6减小至0.7，变化较大；当断面形态变得更加宽浅（河相系数大于 $20/\text{m}^{0.5}$ ）后，汛期排沙比维持在较低水平（0.5以下）。

#### (2) 场次洪水排沙比与主槽形态的关系

由于场次洪水的造床作用比较强烈，因此选取每年汛期的第一场洪水作为研究对象，点绘第一场洪水与上年汛后主槽形态的关系，如图6b所示。虽然场次洪水排沙比范围较小，但当排沙比在0~1.5范围内变化时，会发现图6b散点分布特点与图6a较为相似。值得说明的是每场洪水过后断面形态会发生较大变化，而变化后的断面形态无实测数据，从而造成场次洪水排沙比与断面形态的数据系列相对较少。故从图6难以得出排沙比与前期断面形态的定量关系，还需要分析断面形态与水沙条件对河段排沙比的综合影响。

#### (3) 河段输沙能力与典型断面主槽形态的关系

选取位于游荡段的曹岗及高村作为典型断面，分析典型断面主槽形态调整对河段输沙能力的影响。分别绘制这两个典型断面1990年汛后以及2007年汛后的横断面形态，如图7所示。相比于1990年汛后，2007年汛后曹岗站和高村站的平滩河宽分别缩窄35%和48%，而平滩水深增大近两倍。相应地，曹岗站河相系数由 $37.13/\text{m}^{0.5}$ 减小到 $9.58/\text{m}^{0.5}$ ，高村站的河相系数则由 $29.1/\text{m}^{0.5}$ 减小至 $7.68/\text{m}^{0.5}$ 。游荡段2008年汛期排沙比为1.1，而1991年汛期排沙比仅为0.51。尽管这两年的来水来沙条件不同，但是从定性上仍然可以判断，较窄深的断面形态更有利于游荡段输沙。

### 3.3 不同时间尺度的排沙比与水沙条件及主槽形态的关系

**3.3.1 汛期排沙比与水沙条件及主槽形态的关系** 同时考虑水沙条件与主槽形态的影响，建立汛期排沙比与来沙系数（或水流冲刷强度）、河相系数之间的综合关系式：

$$SDR = k\zeta^a (\ln \zeta)^b + c \quad (5)$$

$$SDR = kF^a (\ln \zeta)^b + c \quad (6)$$

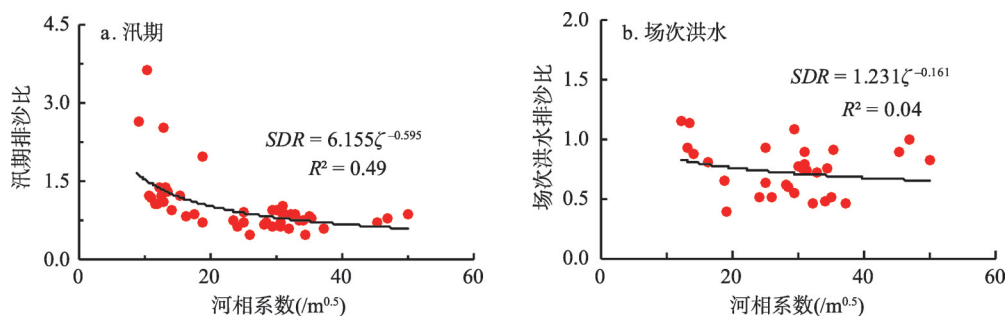


图6 汛期和场次洪水排沙比与断面形态的关系

Fig. 6 Relationship between SDR and channel geometry during flood seasons and flood events

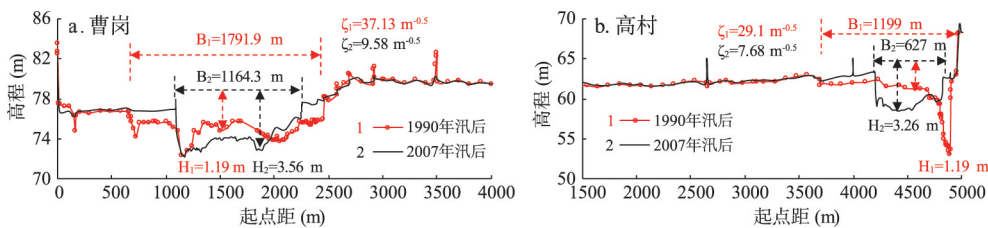


图7 典型断面主槽形态对河段输沙的影响

Fig. 7 Influence of channel geometry at typical cross-sections on sediment-transport capacity in the braided reach

式中：排沙比  $SDR$  为百分数； $\zeta$  表示当年汛期来沙系数， $F$  表示当年汛期水流冲刷强度， $k$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  为参数，其中参数  $c$  包含了河道比降、糙率等因素的影响；变量含义及单位同上。根据 1971—2016 年花高段排沙及实测水沙数据和前一年汛后断面形态，利用 SPSS 回归分析得到系数及指数（表 1）。从参数率定结果上可以发现：① 来沙系数和河相系数的指数均为负值，水流冲刷强度的指数为正值，说明来流流量越大，含沙量越小，断面形态越窄深，相应河道排沙比越大，即河道的输沙能力越强；② 综合考虑水沙条件和断面形态的影响，经验公式的决定系数得到了不同程度的提高，以水流冲刷强度和河相系数建立的排沙比计算公式决定系数提高了 54%，增幅较大；③ 式(5)中来沙系数和河相系数的综合因子所占比例较大，平均占比 65%，式(6)中水流冲刷强度和河相系数的综合因子占比较小，平均为 24%，如 1993 年汛期排沙比为 0.787，前者占比 62%，而后者占比仅 6%。因此式(5)以来沙系数和河相系数为自变量的计算关系在物理机制上更加合理。

表1 式(5)~(6)参数率定表  
Tab. 1 Calibrated parameters in Eq. (5) and Eq. (6)

自变量	系数指数				$R^2$
	$k$	$a$	$b$	$c$	
来沙系数	0.097	-0.476	-0.138	0.296	0.82
水流冲刷强度	0.002	1.746	-2.245	0.834	0.71

绘制花高段历年汛期排沙比与式(5)~(6)计算值的变化过程，如图 8 所示。在排沙比变化幅度较为平缓的年份（1971—1999 年），图 8a 能更好的反映汛期排沙比的变化过程；在排沙比变幅较剧烈的年份（2000 年以后），二者均能大致跟随其变化趋势。而 2000 年由于小浪底水库蓄水拦沙效益显著，当年汛期平均含沙量减少为  $3.38 \text{ kg/m}^3$ ，相比于 1999 年汛期减少幅度高达 92%，相应的汛期来沙系数减少至  $0.007 \text{ kg}\cdot\text{s/m}^6$ ；排沙比发生突变，由 1999 年的 0.74 增加至 2000 年的 2.01，但由于河床存在滞后响应作用，故图中计算值的拟合曲线均无法体现这一波动情况。

**3.3.2 场次洪水排沙比与水沙条件及主槽形态的关系** 考虑到洪水较强的造床作用，场次洪水以每年汛期第一场洪水为标准，研究其与当年水沙条件及汛前主槽形态综合因素的响应关系。建立的场次洪水排沙比公式可写为：

$$SDR = k\zeta^a + b \ln \zeta + c \tag{7}$$

$$SDR = kF^a + b \ln \zeta + c \tag{8}$$

式中： $SDR$  为场次洪水排沙比， $k$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  为参数，变量含义及单位同上。根据 1971—2007 年场次洪水排沙比及相应的水沙资料和断面形态数据，率定式(7)~(8)中参数（表 2），结果发现：① 来沙系数项为负值，且指数大于 0，说明在其他项不变时，场次洪水排沙



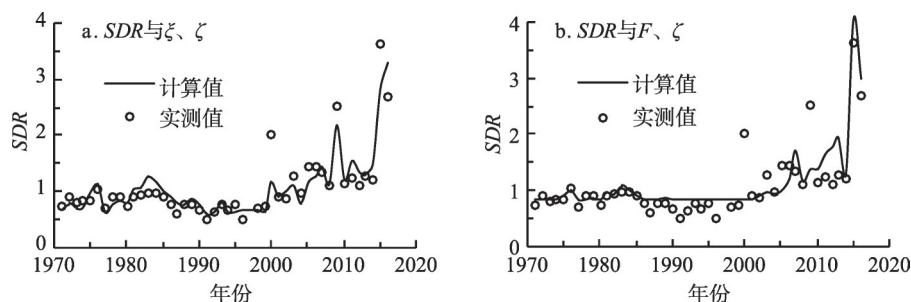


图8 汛期排沙比计算值与实测值的对比

Fig. 8 Comparison between the calculated and measured values of SDR during flood seasons

表2 式(7)~(8)参数率定表

Tab. 2 Calibrated parameters in Eq. (7) and Eq. (8)

自变量	系数				$R^2$
	$k$	$a$	$b$	$c$	
来沙系数	-1.876	0.467	-0.113	1.486	0.60
冲刷强度	-0.829	-0.251	-0.072	1.447	0.48

比随来沙系数的增大而减小,水流冲刷强度项为负值,但其指数小于0,故场次洪水排沙比随水流冲刷强度的增大而增大,河相系数项为负值,排沙比与其呈负相关;②综合考虑这2个因素的影响,场次洪水排沙比计算公式的决定系数略有提升;③从数值大小上看,式(7)中 $k\zeta^a$ 基本小于 $b\ln\zeta$ ,平均而言前者为后者的90%,表明断面形态因子的影响权重大于来沙系数,而式(8)中 $kF^a$ 大于 $b\ln\zeta$ ,说明水流冲刷强度的影响权重大于断面形态因子;④场次洪水排沙比经验公式的决定系数较低,可能与数据系列长度较少有关。

在式(4)中增加考虑断面形态因子,率定得到的计算公式为:

$$SDR = 1.362\zeta^{-0.067} \left( \frac{W_{\text{高村}}}{W_{\text{花园口}}} \right)^{0.513} - 0.055 \ln \zeta - 0.713 \quad (R^2 = 0.77) \quad (9)$$

该经验公式的决定系数提升不大,说明来沙系数和水量比因子是场次洪水排沙比的主要控制因素,该式计算结果可为花高段高效输沙用水提供参考。比较式(7)与式(9)的决定系数及影响因素占比大小可以得出场次洪水排沙比影响因素的权重顺序:来沙系数与水量比综合因子>断面形态>来沙系数。

绘制游荡段场次洪水排沙比与式(7)~式(9)计算值的变化过程,如图9所示。图9a与图9b能基本反映场次洪水排沙比的变化过程,但计算值与实测值差别较明显。图9c能跟随各场次洪水排沙比的变化趋势,计算值与实测值吻合相对较好。

## 4 结论

(1)对花高段1971—2016年汛期及场次洪水的排沙比、水沙条件(来沙系数和水流冲刷强度)等计算结果的分析表明:花高段排沙比与来沙系数呈负相关,与水流冲刷强度呈正相关,且与前者关系更为密切,其决定系数在汛期尺度下比后者提高了46%;计算得到了汛期游荡段不淤的临界来沙系数,约为 $0.012 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ;增加考虑洪水水量的影响后,场次洪水排沙比经验公式的决定系数可提高43%。

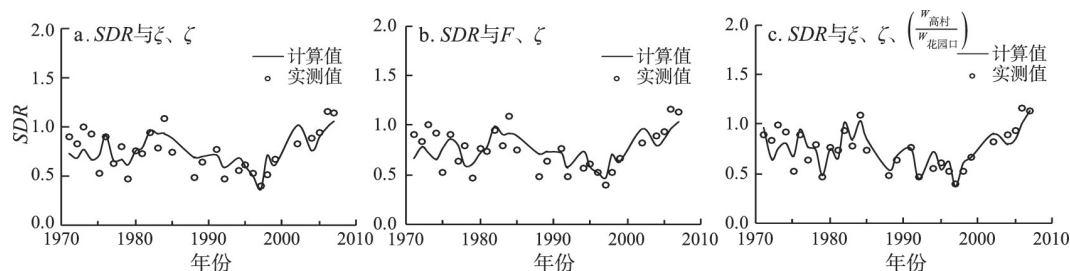


图9 场次洪水排沙比计算值与实测值对比

Fig. 9 Comparison between the calculated and measured values of SDR for flood events

(2) 花高段排沙比与主槽形态呈负相关, 当河相系数大于  $15/\text{m}^{0.5}$  时, 排沙比小于 1, 且在分段研究游荡段排沙比与水沙条件的关系时, 发现夹河滩至高村段排沙比随来沙系数的变幅比花园口至夹河滩段小, 表明当来沙系数增大时, 相对窄深段排沙比的减小幅度较缓。

(3) 建立了花高段汛期和场次洪水排沙比与断面形态及水沙因子的综合关系, 量化了断面形态对输沙能力的影响。以汛期来沙系数和河相系数为自变量的汛期排沙比经验公式精度较高, 决定系数为 0.82; 对于场次洪水排沙比而言, 断面形态的影响权重大于来沙系数。因此可参考文中的经验公式, 基于汛前河道形态, 塑造相应的上游水沙条件, 进而提高游荡河段输沙能力。

## 参考文献(References)

- [1] Yao Wenyi, Su Yunqi, Li Yong. Influencing factors and judging indexes for the basic flood-conveying and sediment-transporting capacity in the Lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2009(1): 1-9. [姚文艺, 苏运启, 李勇. 黄河下游排洪输沙基本功能的影响因素及判别指标. *泥沙研究*, 2009(1): 1-9.]
- [2] Xu Jiongxin. Influence of basin factors and human activities on sediment-transporting capacity in the lower Yellow River. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(8): 775-781. [许炯心. 流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响. *中国科学: 地球科学*, 2004, 34(8): 775-781.]
- [3] Yan Ming, He Li, Wang Yanjun, et al. Temporal and spatial variation of flood-conveying and sediment-transporting capacity of the lower reaches of the Yellow River during 1950-2015. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 1-6, 12. [颜明, 贺莉, 王彦君, 等. 1950—2015 年黄河下游河道排洪输沙时空演变. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 1-6, 12.]
- [4] Shen Hongbin, Wu Baosheng, Wu Huali. A review on the effects of boundary condition on sediment transport efficiency in the Lower Yellow River. *Advances in Water Science*, 2019, 30(3): 445-456. [申红彬, 吴保生, 吴华莉. 黄河下游河道边界条件影响输沙效率研究述评. *水科学进展*, 2019, 30(3): 445-456.]
- [5] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. Suspended sediment transport response to upstream wash-load supply in the sand-bed reach of the Upper Yellow River, China. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 562-570.
- [6] Shen Hongbin, Wu Baosheng. Exponent change rule of power law for sediment transport in alluvial rivers. *Advances in Water Science*, 2018, 29(2): 179-185. [申红彬, 吴保生. 冲积河流泥沙输移幂律函数指数变化规律. *水科学进展*, 2018, 29(2): 179-185.]
- [7] Liang Zhiyong, Liu Jixiang, Zhang Houjun. Study on critical conditions of scour-and-siltation in flood seasons in the lower Yellow River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2004, 2(2): 146-150. [梁志勇, 刘继祥, 张厚军. 黄河下游河道洪水冲刷淤积临界水沙条件的研究. *中国水利水电科学研究院学报*, 2004, 2(2): 146-150.]
- [8] Wu Baosheng, Zhang Yuanfeng. Analysis on sediment transport in the Lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2007(1): 30-35. [吴保生, 张原锋. 黄河下游输沙量的沿程变化规律和计算方法. *泥沙研究*, 2007(1): 30-35.]
- [9] Fei Xiangjun, Fu Xudong. A study of sediment-transporting characteristics, sediment delivery ratio and siltation ratio in the Lower Yellow River. *Yellow River*, 2009, 31(11): 6-8, 11. [费祥俊, 傅旭东. 黄河下游河道排沙比、淤积率与输沙特性研究. *人民黄河*, 2009, 31(11): 6-8, 11.]
- [10] Fu X D, Jiang L W, Wu B S, et al. Sediment delivery ratio and its uncertainties on flood event scale: Quantification for

- the Lower Yellow River. *Science China: Technological Sciences*, 2010, 53(3): 854-862.
- [11] Han Qiwei. Regulation of flow-sediment in the Yellow River. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(9): 1015-1026. [韩其为. 论黄河调水调沙. 天津大学学报, 2008, 41(9): 1015-1026.]
- [12] Xu J X. A study of sediment delivery by floods in the lower Yellow River, China. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(4): 553-566.
- [13] Li Xiaoping, Li Yong, Qu Shaojun. Study on characteristics of flood scour and fill and high efficient sediment transport of the Lower Yellow River. *Yellow River*, 2010, 32(12): 71-73. [李小平, 李勇, 曲少军. 黄河下游洪水冲淤特性及高效输沙研究. 人民黄河, 2010, 32(12): 71-73.]
- [14] Zhang Yanyan, Wu Baosheng, Fu Xudong. Characteristics of sediment transport by flood events in the lower Yellow River. *Journal of Hydrological Engineering*, 2012, 31(3): 70-76. [张艳艳, 吴保生, 傅旭东. 黄河下游河道场次洪水输沙特性分析. 水力发电学报, 2012, 31(3): 70-76.]
- [15] Guo S L, Sun D P, Jiang E H, et al. Equilibrium sediment transport in lower Yellow River during later sediment-retaining period of Xiaolangdi Reservoir. *Water Science and Engineering*, 2015, 8(1): 78-84.
- [16] Ni J R, Liu X Y, Li T H, et al. Efficiency of sediment transport by flood and its control in the Lower Yellow River. *Science in China Series E: Engineering and Materials Science*, 2004, 47(Suppl.1): 173-185.
- [17] Han Qiwei. Some rules of sediment transportation and deposition-scouring in the lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2004(3): 1-13. [韩其为. 黄河下游输沙及冲淤的若干规律. 泥沙研究, 2004(3): 1-13.]
- [18] Huang H Q, Nanson G C. Hydraulic geometry and maximum flow efficiency as products of the principle of least action. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(1): 1-16.
- [19] Li Jie, Xia Junqiang, Deng Shanshan, et al. Recent bank retreat processes and characteristics in the braided reach of the Lower Yellow River. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 517-525. [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. 水科学进展, 2015, 26(4): 517-525.]
- [20] Zhang Yuanfeng, Wang Ping. Variation characteristics of bedforms in wandering reach of the Lower Yellow River. *Yellow River*, 2018, 40(8): 8-11. [张原锋, 王平. 黄河下游游荡型河段床面形态变化特征. 人民黄河, 2018, 40(8): 8-11.]
- [21] Xia Junqiang, Wu Baosheng, Wan Yanping, et al. Composition and mechanical properties of soil in the bank of the braided reach of the Lower Yellow River. *Science Bulletin*, 2007, 52(23): 2806-2812. [夏军强, 吴保生, 王艳平, 等. 黄河下游游荡段滩岸土体组成及力学特性分析. 科学通报, 2007, 52(23): 2806-2812.]
- [22] Qi Pu, Sun Zanying, Yu Shoubing. Enlightenment on Yellow River governance from naturally developed stable channels in wandering reaches of lower Yellow River. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(6): 45-48. [齐璞, 孙赞盈, 于守兵. 黄河下游游荡河段自然形成的稳定河道对黄河治理的启示. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 45-48.]
- [23] Liu Cheng, He Yun, Liu An. Key drivers of changes in sediment loads of rivers. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(1): 1-7. [刘成, 何耘, 刘桢. 河流输沙量变化的主要驱动因素. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 1-7.]
- [24] Xia J Q, Li X J, Zhang X L, et al. Recent variation in reach-scale bankfull discharge in the Lower Yellow River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(6): 723-734.
- [25] Xia Junqiang, Wu Baosheng, Wang Yanping, et al. Estimating the bankfull discharge in the Lower Yellow River and analysis of its variation processes. *Journal of Sediment Research*, 2010(2): 6-14. [夏军强, 吴保生, 王艳平, 等. 黄河下游河段平滩流量计算及变化过程分析. 泥沙研究, 2010(2): 6-14.]
- [26] Li Jie, Xia Junqiang, Zhang Shiyuan. Variation in width-depth ratio of the braided reach in the Lower Yellow River undergoing hyperconcentrated flood processes. *Yellow River*, 2016, 38(11): 26-30. [李洁, 夏军强, 张诗媛. 高含沙洪水后黄河下游游荡段宽深比变化规律. 人民黄河, 2016, 38(11): 26-30.]
- [27] Wu Baosheng, Shen Guanqing. The physical meaning of incoming sediment coefficient. *Yellow River*, 2008, 30(4): 15-16. [吴保生, 申冠卿. 来沙系数物理意义的探讨. 人民黄河, 2008, 30(4): 15-16.]
- [28] 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. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(10): 1585-1601.
- [29] Fan Zuoying, Han Shaofa. A Compilation of Basic Data on Channel Evolution in the Lower Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, 1987: 459-463. [樊左英, 韩少发. 黄河下游河床演变基本资料汇编. 郑州: 黄河水利委员会水利科学研究所, 1987: 459-463.]
- [30] Shen Guanqing, Zhang Yuanfeng, Shang Hongxia. Mechanism of Response to Flood and Sediment-transporting Rule in the Lower Yellow River. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy Press, 2008: 90-93. [申冠卿, 张原锋, 尚红霞. 黄河下游河道对洪水的响应机理与泥沙输移规律. 郑州: 黄河水利出版社, 2008: 90-93.]

- [31] Xu Jiongxin. Sediment transport efficiency of floods in the lower Yellow River in relation with water-sediment combination and channel geometry. *Journal of Sediment Research*, 2009, 8(4): 45-50. [许炯心. 黄河下游洪水的输沙效率及其与水沙组合和河床形态的关系. *泥沙研究*, 2009, 8(4): 45-50.]
- [32] Ma Y X, Huang H Q, Nanson G C, et al. Channel adjustments in response to the operation of large dams: The upper reach of the lower Yellow River. *Geomorphology*, 2012, 147/148: 35-48.
- [33] Xu Jiongxin. Study on sediment transport in the lower Yellow River during flood period. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 562-568. [许炯心. 黄河下游洪水的泥沙输移特征. *水科学进展*, 2002, 13(5): 562-568.]
- [34] Li Guoying. Analysis on mechanism of peak discharge increasing during flood routing in lower reaches of Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(5): 511-517. [李国英. 黄河洪水演进洪峰增值现象及其机理. *水利学报*, 2008, 39(5): 511-517.]

## Response of sediment delivery ratio to the incoming flow-sediment regime and channel geometry in the braided reach of the Lower Yellow River

CHENG Yifei, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, WANG Yingzhen

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,

Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** One of the main tasks for the river regulation in the Lower Yellow River (LYR) is to improve sediment transport capacity of the braided reach, which is influenced by incoming flow and sediment regime as well as riverbed boundary condition. Variations in the reach-scale geomorphic coefficient and incoming flow-sediment regime (incoming sediment coefficient and fluvial erosion intensity) were investigated, using the hydrological data and cross-sectional profiles surveyed in the braided reach between Huayuankou and Gaocun over the period from 1971 to 2016. Empirical relationships were then established to quantitatively demonstrate the integrated effects of flow-sediment regime and the post-flood channel geometry in the previous year on the values of sediment delivery ratio (SDR) during flood seasons and flood events respectively in the study reach. Results indicate that: (1) the values of SDR of flood seasons and flood events increased with a smaller incoming sediment coefficient or a larger fluvial erosion intensity, and the incoming sediment coefficient was equal to  $0.012 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$  when the value of flood-season SDR approached 1. The correlation coefficient is 0.76 for the relationship between flood-event SDR, incoming sediment coefficient, and the ratio of the water volume at the inlet section to the one at the outlet section in the study reach. (2) The SDR of the braided reach decreased with wider and shallower channel geometry, and it was less than 1 when the geomorphic coefficient was greater than  $15/\text{m}^{0.5}$ . (3) The determination coefficient is 0.82 for the empirical function established among flood-season SDR, incoming sediment coefficient and geomorphic coefficient, and the weight of the channel geometry is greater than the incoming sediment coefficient in the function of flood-event SDR. The established functions can reflect the sediment-transport characteristics of the braided reach, which is helpful to quantify the influence of channel geometry and flow-sediment regime on sediment transport capacity.

**Keywords:** channel geometry; flow-sediment regime; sediment delivery ratio; flood season; flood event; braided reach; Lower Yellow River