

黄河河潼区间泥沙与洪水复杂响应分析

范念念, 李慧奇, 田苏茂, 马宇

(四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 以泥沙为主线, 结合几场典型洪水, 对黄河河潼区间泥沙与洪水的复杂响应进行了分析。结果表明, 暴雨分布不同会使河道冲淤变化产生显著差异, 暴雨分布于细沙区对下游河床的影响较快。“揭河底”、沙坎、异重流等使洪水出现特殊现象。“揭河底”会明显降低河道的削峰能力; 沙坎会拦蓄部分洪水然后被冲开, 使洪水反常增大; 异重流及洪水中夹杂的煤块会增加洪水的复杂性。

关键词: 泥沙; 河潼区间; 洪水; 冲淤

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)03-216-04

中图分类号: P333

Complex Responses Between Flood and Sediment Movement in Hekou—Tongguan Section of the Yellow River

FAN Nian-nian, LI Hu+qi, TIAN Su-mao, MA Yu

(Institute of Hydraulic Engineering and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: This study aims at analyzing the complex responses between sediment movement and flood based on a series of field investigations in Hekou—Tongguan section of the Yellow River. Results show that the channel adjustments such as sediment deposition and erosion vary with the difference of storm distribution pattern. “Bed-exposed erosion”, sand bar, and density flow are the causes for the abnormal phenomena of floods. “Bed-exposed erosion” may cut down the ability of flood peak reduction; and sand bar may impound a part of flood and then be broken. As a result, they may cause flood increasing abnormally. Density flow and coal may make floods more complex.

Keywords: sediment; Hekou—Tongguan section; flood; deposition and erosion

1 前言

黄河河潼区间是指内蒙古托克托县河口镇至陕西潼关区间。此段干流河长 849 km, 有皇甫川、朱家川、窟野河、秃尾河、三川河、无定河、清涧河、延河、汾河、北洛河、渭河等支流汇入。该区间流域面积 $2.9 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占黄河流域面积的 38%, 但年输沙量占到黄河年输沙量的 90% 以上。区间汛期暴雨强度大, 支流众多, 产汇流快, 干支流常发生较大洪水。区间地面物质组成多样, 产沙量大, 而产沙多集中于暴雨洪水。本区间是黄河泥沙尤其是粗泥沙的最主要来源, 一直是水土保持的重点。有关此区域的研究也较多。王光谦等定量研究了植被覆盖差异对多沙粗沙区产水产沙影响^[1], 但对基本地面物质组成的考虑略有不足; 许炯心等对地面物质组成与产沙模数与输

沙特征做过探讨^[2], 但仍需深入。本文以该区间的几次典型洪水为例, 对洪水及泥沙的复杂响应进行初步探讨, 以便为黄河复杂水沙运动特性研究提供一定的科学依据。

2 洪水与泥沙的复杂响应

2.1 暴雨分布对河道冲淤的影响

该区间地貌类型多样, 有些大的支流流域内就有多种地貌类型。以窟野河为例, 流域内有沙质丘陵区、砾质丘陵区、黄土丘陵区, 各类型区分布如图 1 所示。窟野河流域面积 8706 km^2 , 是黄河重要的多沙粗沙支流, 也是吴堡站洪水的重要来源。出口站温家川站从建站至 1986 年(即流域内开发煤炭之前), 年均径流量 $6.78 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均输沙量 $1.12 \times 10^8 \text{ t}$, 年

均含沙量 165 kg/m^3 [3]。实测最大含沙量 1700 kg/m^3 , 为世界之最。实测最大洪峰流量 $14000 \text{ m}^3/\text{s}$, 为黄河各支流之冠。

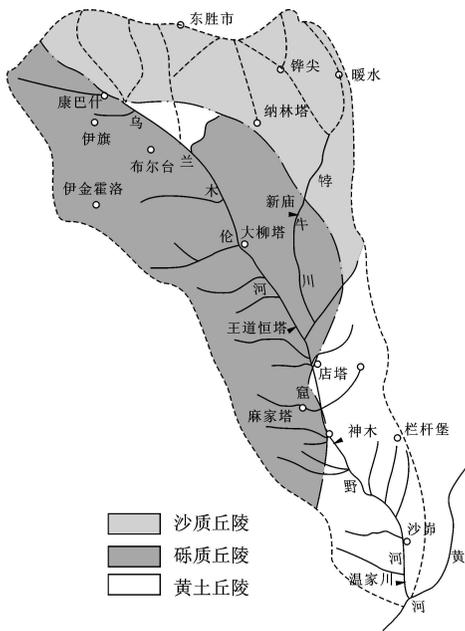


图1 研究区各地貌类型区分布图

窟野河泥沙粒径粗, 沙量大, 对干流影响剧烈, 是重点治理对象。但流域内地貌类型多样, 沙质与砾质丘陵区产沙粒径较粗, 而黄土丘陵区产沙粒径较细。当细泥沙含量达到一定值时, 便会形成高含沙水流, 挟沙能力显著增强, 同时也不易形成明显的拦门沙坎。

1971年7月23—25日及1976年8月1—2日, 流域内均发生了暴雨洪水。两次洪水的水沙特征(温家川站)及对黄河北干流的冲淤量见表1。

由表1可知, 两次洪水的最大洪峰流量、洪水总量、最大含沙量、输沙量均差异不大。但暴雨分布明显不同。造成“76·8”洪水的暴雨分布于上游粗沙区, 黄土丘陵区降雨量小, 提供的细沙十分有限, 无法形成高含沙洪水。府谷—吴堡段淤积 $1.954 \times 10^8 \text{ t}$, 吴堡—龙门段淤积 $4.3 \times 10^7 \text{ t}$ 。而造成“71·7”洪水的暴雨分布于全流域, 暴雨中心偏向下游的黄土丘陵区。洪水中细沙含量高, 形成高含沙洪水, 挟沙能力强, 府谷—吴堡段仅淤积 $9.41 \times 10^4 \text{ t}$, 吴堡—龙门段还冲刷 $3.47 \times 10^7 \text{ t}$ 。

表1 窟野河“71·7”及“76·8”洪水统计

特征洪水	最大洪峰/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪水总量/ 10^4 m^3	最大含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	输沙量/ 10^4 t	府吴冲淤/ 10^8 t	吴龙冲淤/ 10^8 t
“71·7”	13 500	30 853	1 136	16 940	+ 0.941	- 0.347
“76·8”	14 000	24 833	1 340	18 226	+ 1.954	+ 0.430

注: 府吴冲淤表示府谷至吴堡段的冲淤量; 吴龙冲淤表示吴堡至龙门段的冲淤量; 正号表示淤积, 负号表示冲刷。

由上述分析可知, 即使在多沙粗沙支流, 也可以形成高含沙洪水。洪水的水沙特征会因暴雨分布于不同的地貌类型区而有显著不同, 从而给下游河道造成的冲淤变化也有明显差异。黄河北干流总的来说是冲淤平衡的, 但仍对泥沙有调节作用。若暴雨仅分布于粗沙区, 则北干流调节作用强, 下游做出响应所需的时间长, 如1976, 1989等年份; 若粗沙、细沙区均出现暴雨, 则大部分泥沙直接随洪水到龙门以下, 很快对三门峡等相关工程产生显著影响, 如1964, 1967, 1971, 1977等年份。

该区域的水沙运动特性, 也可从其它方面加以说明。如潼关水文站1943—1946年停测, 1947年恢复观测后的潼关高程比1942年上升1 m。涂启华等认为[4]这是有疑问的, 因为停测期间的来水来沙并无使潼关高程上升1 m的不利因素。其实, 1946年7月18日, 窟野河发生 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的调查最大洪水[5]。笔者在考察途中遇到两位老人, 分别来自神木县栏杆堡镇与沙峁镇(均位于窟野河流域的黄土丘陵区), 均

对那次洪水记忆颇深。据他们介绍, 发洪水时自己家附近降雨很强, 且历时超过一天。由此可见, 细沙区出现了暴雨, 有利于泥沙向下游输送。某些年份, 9—10月黄河上游会出现连阴雨, 使北干流出现洪峰小, 含沙量小而历时长的洪水, 这种洪水会促使潼关高程上升[6]。而此年9月15日黄河青铜峡出现 $6230 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水, $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上流量持续9 d, 是宁夏有水文记载以来的最大洪水[7]。因此, 1946年的水沙条件极为不利, 停测期间潼关高程上升1 m是完全合理的。

2.2 小北干流丧失削峰能力是形成1843年特大洪水的主要原因

黄河龙门至潼关段称小北干流, 河长126 km, 比降0.4‰, 两岸滩地十分宽广, 发生洪水时会漫滩, 削峰作用非常显著。如1967年8月11日, 龙门站洪峰流量 $21000 \text{ m}^3/\text{s}$, 为该站实测最大洪水, 洪峰传到潼关, 削峰率达60.4% (扣除区间来水)。但有些时候小北干流会发生“揭河底”冲刷, 即高含沙条件下河床

沿程剧烈冲刷的现象。“揭河底”一次就可使河槽刷深几米甚至近十米,河槽过水能力明显增强。若“揭河底”后再次出现洪水,此河段削峰能力将明显减弱甚至丧失。如 1977 年陕北多暴雨,先发生“揭河底”冲刷,同年 8 月 6 日又出现洪水,龙门洪峰流量 $12\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$,但洪峰传到潼关时达到 $15\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$,扣除区间来水,削峰率为 -16.6% 。揭河底冲刷较严重时,河道需较长时间才可恢复,如 1933 年发生的“揭河底”冲刷,1935 年还没有恢复。产生大范围“揭河底”冲刷应具备以下 4 个条件^[8]:(1) 洪峰流量大,且持续时间长。龙门站最大瞬时流量大于 $7\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$,流量大于 $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的洪峰持续历时在 8 h 以上或最大日平均流量大于 $3\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 。(2) 洪峰与沙峰过程基本相应或沙峰略滞后于洪峰。(3) 水流含沙量大,且持续时间长。龙门站瞬时最大含沙量大于 $542\ \text{kg}/\text{m}^3$,含沙量大于 $400\ \text{kg}/\text{m}^3$ 的沙峰持续 16 h

以上。(4) 河床调整达到临界状态。即当河床横断面形态和比降调整达到一定程度,而且河床淤积物具有一定厚度,固结程度较高。

1842 年洪水,吴堡站出现了 $32\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的调查最大洪水^[5],能够满足“揭河底”冲刷条件,使河槽过流能力明显增大。1843 年再次发生洪水,洪峰沿该河段沿程增加,才是造成了三门峡调查最大洪水的最重要原因。研究 1843 年黄河历史洪水,有利于合理确定相关工程的防洪标准。

2.3 沙坎使洪水反常增大

2003 年夏季洪水(表 2),天桥水电站下泄流量只有 $9\ 860\ \text{m}^3/\text{s}$,而下游的府谷站最大流量却为 $13\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,为该站实测最大洪水。两者之间河长只有 6 km,区间集水面积也不过 $182\ \text{km}^2$,洪峰流量却增大 $3\ 140\ \text{m}^3/\text{s}$ 。尽管对此,关于反常现象已有一定的研究,但其合理性尚待加强。

表 2 2003 年黄河中游干支流主要控制站洪水特征值统计^[9]

河名	站名	最大流量		最大含沙量		水量/ $(10^8\ \text{m}^3)$	沙量/ $(10^8\ \text{m}^3)$
		数值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	出现时间	数值/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	出现时间		
皇甫川	皇甫	6 500	0730T4:30	520	0730T4:36	0.52	0.220
县川河	旧县	600	0730T7:24	520	0730T7:24	0.06	0.015
黄河	府谷	13 000	0730T8:00	360	0730T10:00	1.35	0.200
孤山川	高石崖	2 900	0730T7:36	425	0730T7:00	0.19	0.063
朱家川	桥头	1 380	0730T9:30	375	0730T9:30	0.23	0.071
秃尾河	高家川	162	0730T8:36	348	0730T8:42	0.02	—
窟野河	温家川	2 200	0730T11:54	367	0730T13:00	0.23	0.057
黄河	吴堡	9 400	0730T21:30	168	0731T4:00	2.63	0.270
黄河	龙门	7 230	0731T13:18	127	0801T12:00	2.74	0.210

注:表 1 引自参考文献[1],个别数据与原文有出入,但不影响定性分析。

天桥水电站大坝建在府谷县与保德县交界的黄河干流上。坝址原河床平均高程 811 m,有泄洪排沙闸 7 孔,底坎高程 811 m,4 台发电机组的进水口高程为 816 m。为排沙需要,在电站各机组下方分别设置 2 孔冲沙孔,冲沙孔底坎高程 809.5 m,比原河床平均高程还低。排沙设施的这种布置,从总体上分析是合理的。然而冲沙孔底坎低于原河床平均高程,在开启冲沙孔过程中,造成电站下游附近河床发生局部冲刷,冲起来的泥沙运行较短距离后就落淤,形成一道横跨全断面的沙坎,又反过来影响电站尾水位^[6]。天桥水电站为径流式电站,在敞泄洪水之初,下泄流量不太大,十分利于冲刷下游局部河床,堆积沙坎,然后流量继续增大,便冲开沙坎,使洪峰反常增大。府谷站在这次洪水涨水坡施测第 67,68 次流量之间,水位上涨 1.11 m,断面面积增加 $490\ \text{m}^2$,而流量只增加 $490\ \text{m}^3/\text{s}$ ^[5]更是证明此论断的有利证据。因此,天桥

水电站坝下游局部河段被冲刷,泥沙在下游不远处形成沙坎,沙坎又被冲开才是使天桥至府谷段洪峰增量很大的最主要原因。

上述的窟野河“76·8”洪水,由于窟野河口拦门沙坎的作用,吴堡站形成了 $24\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 的反常特大洪水^[10],为该站实测最大洪水。

由以上分析可见,沙坎可由支流来沙形成于干支流交汇处,也可由上游干流来沙堆积而成。在适宜的情况下,均可拦蓄部分洪水后被冲开,蓄水下泄,使下游洪水反常增大。

2.4 干支流洪水遭遇使洪峰削减

2003 年夏季洪水(表 2)的另一特殊现象是府谷—吴堡有较多支流发生了洪水,从洪峰出现时间上来看也非常有利于干支流洪水遭遇,但府谷站洪峰流量为 $13\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,而吴堡站仅为 $9\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$,洪水沿程削减。

当干支流含沙量差别很大时,河口处会产生异重流。作者曾在渭河渭南段创造了不同条件,模拟当支流流量远小于干流时交汇处产生的异重流(如图2)。当时下游不远处的渭河华县站流量 $58 \text{ m}^3/\text{s}$,渭河水为黑色,含沙量很小,模拟含沙水流均为黄色。在河边挖了几条与渭河主流流向夹角不同的小沟,观察到如下现象当小沟含沙量较小时,若两流向关系如图2的1方位,则形成明显的“泾渭分明”现象,并在渭河右岸发生少量淤积;若两流向关系如图2的3方位,则两水流混掺较快;若两流向关系如图2的2方位,则现象介于两者之间。但当小沟含沙量很大时,不论两流向关系如何,均在交汇口形成异重流,沿河岸迅速下潜。

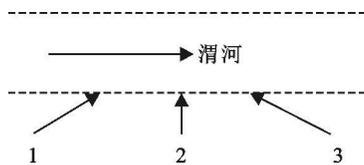


图2 异重流现象示意图

2003年夏季洪水,府谷—吴堡间支流洪峰远小于干流,但含沙量明显大于干流。支流洪水到达河口,形成异重流潜入河底,河底异重流被冲向下游并逐渐混掺,而支流又不断补充异重流,这对洪水有一定的拦蓄削减作用。支流流域内多煤矿,占用河道堆积煤炭的现象较普遍,洪水中漂浮着很多煤块。煤块到河口处,因干流含沙量小,容重小,煤块便会沉入河底,这对削减洪峰也有一定作用。因此,支流在河口形成异重流,并且漂浮的煤块在此处沉入河底,是造成这次干支流洪水遭遇但洪峰反而削减的重要原因。

3 结论

(1) 地貌类型多样的多沙粗沙支流,不同的暴雨分布产生的洪水水沙特征会有明显差异。一般地,若能产生足够的细泥沙,则粗泥沙更容易输送,对下游河床影响快。

(2) 正常情况下,黄河小北干流对削减洪水具有显著作用,但当该河段发生揭河底冲刷时,削峰能力会明显降低甚至丧失。

(3) 洪水期间河道中常产生拦门沙坎,拦门沙坎可由支流带来的泥沙形成于干支流交汇处,也可由上游干流带来的泥沙形成。一般可拦蓄部分洪水后被

冲开,形成类似溃坝洪水,使下游洪水反常增大。

(4) 该区间洪水期间干支流交汇处常产生异重流,一些支流洪水中还会夹有大量煤块,使洪水现象复杂,而究竟对洪水有何影响,尚需深入研究。

(5) 本文对水沙复杂响应进行了初步讨论,尚有更多的工作需要深入,如根治占用河道堆放煤炭,洪水预报,异重流研究等。

(6) 黄土高原,尤其是位于中游的多沙粗沙区水土流失极为严重。因此,因地制宜,加大水土保持力度,建设山川秀美工程才是解决洪水与泥沙问题的根本途径。

致谢 本次考察活动得到四川大学水电学院的资助;在考察途中,得到延安市水利局,陕西省水文局延安分局,神木县采兔沟水库建设工地,黄河潼关水文站,以及薛小妮、刘政、李刚、刘波等单位及个人的大力支持,本文特承王文圣教授、王协康研究员的指导。对以上单位及个人致以诚挚感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 王光谦,张长春,刘家宏,等.黄河流域植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J].泥沙研究,2006(2):10-16.
- [2] Xu Jiongxin, Yan Yunxia. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations[J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 219-232.
- [3] 焦恩泽.窟野河水沙特性及变化分析[C]//汪冈,范昭.黄河水沙变化研究.郑州:黄河水利出版社,2002:538-550.
- [4] 吴保生,张仁.三门峡水库建库前潼关高程变化研究成果的比较分析[J].泥沙研究,2004(1):70-78.
- [5] 黄河中游水文水资源局.黄河中游水文[M].郑州:黄河水利出版社,1996.
- [6] 焦恩泽.黄河水库泥沙[M].郑州:黄河水利出版社,2004:216-222,335.
- [7] 黄河水利委员会.民国黄河大事记[M].郑州:黄河水利出版社,2004:235-237.
- [8] 薛选世.黄河小北干流揭河底冲刷对策探讨//匡尚富.中国水利学会首届青年科技论坛论文集[C].北京:中国水利水电出版社,2004:284-285.
- [9] 黄河水利科学研究所.2003年黄河河情咨询报告[M].郑州:黄河水利出版社,2005:102,155.
- [10] 苏念良,马文进,蔡文彦,等.窟野河水文特性分析[J].水资源与水工程学报.2007,18(2):65-68.