

黄河上游孔兑高含沙洪水特点与冲淤特性

王平¹, 侯素珍¹, 张原锋¹, 吴保生²

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 清华大学 水利系, 北京 100084)

摘要: 黄河上游孔兑高含沙洪水经常造成其下游决堤、干流淤堵等洪水灾害, 孔兑高含沙洪水具有峰高量大、含沙量高且陡涨陡落、持续时间短的特点。初步研究认为, 孔兑高含沙洪水具有极强的输沙能力, 当含沙量超过 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 后, 所需水流强度不再增加甚至有减少的趋势; 当洪峰流量低于 $1\,000\text{m}^3/\text{s}$ 时孔兑河道有冲有淤, 断面的调整主要表现为主槽冲刷和滩地淤积; 当洪峰流量超过 $1\,000\text{m}^3/\text{s}$ 时河槽即可发生全断面的强烈冲刷, 冲刷程度随洪峰流量增大而增大。孔兑泥沙进入干流后难以排出内蒙古河段, 成为导致内蒙古河段淤积萎缩、排洪排凌能力下降的重要原因。

关键词: 孔兑; 高含沙洪水; 输沙能力; 冲淤特性

中图分类号: TV143.4

文献标识码: A

文章编号: 0468-155X(2013)01-0067-07

1 研究背景

黄河上游内蒙古河段南岸的十大孔兑(蒙语,即山洪沟)是季节性高含沙支流。暴雨期易形成峰高量大、含沙量极高的洪水,在孔兑下游泛滥成灾,同时造成黄河干流严重淤堵。支俊峰等^[1]、杨振业^[2]、武盛等^[3]曾对孔兑典型高含沙洪水淤堵黄河干流的过程和危害及淤堵条件进行了初步分析。刘韬等^[4]分析了西柳沟流域暴雨洪水产输沙特点,建立了暴雨产流产沙关系。袁金梁^[5]从较长时间尺度分析了孔兑径流泥沙特性。鉴于实测资料匮乏等因素,已有研究较少涉及孔兑高含沙洪水输沙能力及冲淤特性。

黄河中下游高含沙洪水普遍存在,拥有大量研究成果。钱宁^[6]对高含沙水流的运动特性和运动机理进行了系统的研究。万兆惠等^[7]对黄河中游干支流高含沙洪水输沙能力的研究表明,高含沙洪水具有很强的输沙能力,当含沙量超过 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 后,可以在较弱的水力强度下顺利输送。张胜利等^[8]研究了皇甫川高含沙水流特性,证明了其宾汉体性质,并指出当浑水容重大于一定值后,冲淤平衡的临界流速随浑水容重的增加呈减小趋势,也就是说输送泥沙需要的能量不再随含沙量增大而增大。尽管黄河中下游高含沙洪水与上游孔兑高含沙洪水存在较大差异,但是这些成果特别是研究方法,对于研究孔兑冲淤特性具有重要的借鉴作用。

本文重点以西柳沟孔兑为研究对象,利用实测洪水资料,对孔兑高含沙洪水特点、冲淤特性,及其对干流冲淤的影响进行了初步研究。

2 孔兑流域特征

十大孔兑由南向北并行注入黄河,位置分布见图1。各孔兑河长在 $65\sim 110\text{km}$ 之间,河道平均比降在 $2.67\%\sim 5.25\%$ 之间,总流域约 1.1万 km^2 。孔兑上游为砒砂岩丘陵沟壑区,水土流失严重,为孔兑

收稿日期: 2012-05-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2011CB403304); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB02B03); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2010-40)

作者简介: 王平(1977-),男,四川双流人,高级工程师,主要从事河床演变与水库泥沙研究工作。E-mail: wangping@hky.yrcc.gov.cn

主要泥沙来源 地表覆盖为风沙残积土 颗粒较粗 粒径大于 0.05mm 以上粗泥沙占 60% 左右。中部为库布齐沙漠 季风期大量风沙堆积在河道中 成为洪水的重要沙源。孔兑下游为冲积扇区 地势相对平坦。

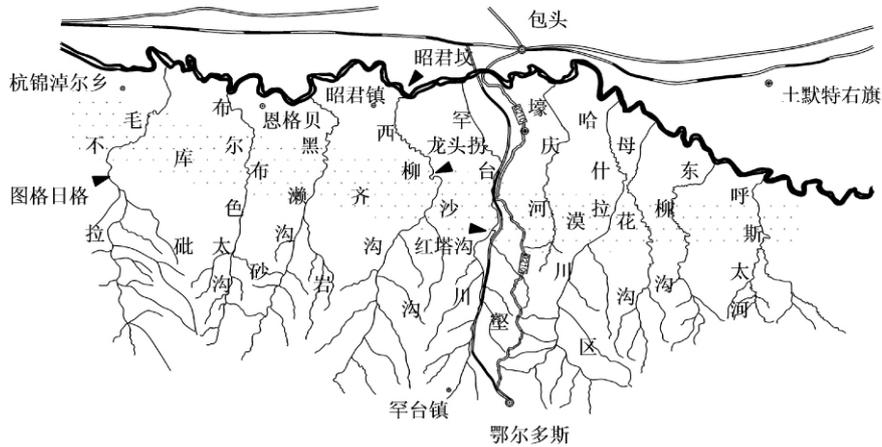


图 1 十大孔兑水系图

Fig. 1 Sketch of ten tributaries of Inner-Mongolia Yellow River

十大孔兑中西柳沟、毛不拉和罕台川三条孔兑下游各设有一个水文站,分别为龙头拐水文站、图格日格水文站(1982 年以前为官长井水文站)、红塔沟水文站(1999 年以后为响沙湾水文站)。西柳沟河长 106.5km,呈上陡下缓态势,如图 2 所示,距河口约 43km 以上为砒砂岩沟壑区,河道比降超过 5‰;龙头拐(距河口约 31km)以上至距河口 43km 之间穿越库布齐沙漠,为风沙堆积区,河道比降逐步减小,至龙头拐比降约为 2‰,相应河道断面窄深;龙头拐以下逐步进入冲积扇区,地势逐渐平坦,比降逐步降低至 1‰左右,相应河道断面也逐渐变宽。孔兑以暴雨产流为主,上游丘陵沟壑区风沙残积土和风化砂、砾岩以及中部河段河道内堆积的风沙,为暴雨产沙提供了充足的沙源,加之河道比降大,输沙能力强,产、汇流均很快,所形成的洪水一般都为高含沙洪水,含沙量高达数百甚至上千公斤。

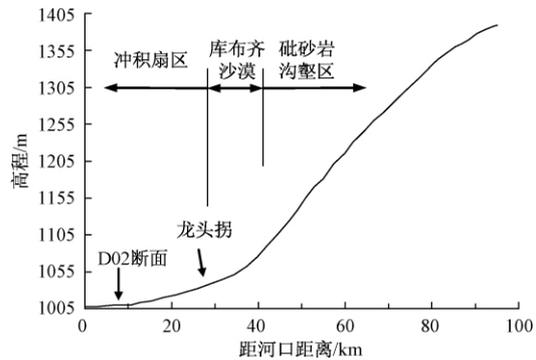


图 2 西柳沟河道纵剖面图

Fig. 2 Sketch of channel profile of Xiliugou gully

3 孔兑高含沙洪水特性

3.1 高含沙洪水水沙特征

孔兑高含沙洪水首先表现为峰高量大、含沙量高。根据对西柳沟龙头拐站 1961 - 1989 年间 20 场主要洪水的统计:洪水洪峰流量平均为 $1440\text{m}^3/\text{s}$,最大为 $6940\text{m}^3/\text{s}$ (1989 年 7 月 21 日),最小为 $312\text{m}^3/\text{s}$ (1981 年 7 月 26 日),洪峰含沙量平均为 $911\text{kg}/\text{m}^3$,最大为 $1550\text{kg}/\text{m}^3$ (1973 年 7 月 17 日),最小为 $194\text{kg}/\text{m}^3$ (1976 年 7 月 28 日) (洪峰流量和含沙量均为瞬时值,下同)。洪水平均水量 $1532\text{万}\text{m}^3$ 、沙量 $680\text{万}\text{t}$,最大洪量、沙量分别为 $7275\text{万}\text{m}^3$ 、 $4012\text{万}\text{t}$ 均出现在 1989 年 7 月 21 日洪水中,最小洪量、沙量分别为 $169\text{万}\text{m}^3$ 、 $52\text{万}\text{t}$ 均出现于 1988 年 7 月洪水中。

孔兑洪水还具有洪峰尖瘦、陡涨陡落、持续时间短等特点。西柳沟龙头拐站主要洪水过程起涨至洪水峰值出现时差平均为 1.4h,洪水持续时间平均为 18h。涨峰最快的为 1981 年 7 月洪水,洪峰流量从 $0.17\text{m}^3/\text{s}$ 涨至 $884\text{m}^3/\text{s}$ 仅用时 0.1h;最慢的为 1966 年 8 月洪水,洪峰流量从 $4.95\text{m}^3/\text{s}$ 涨至 $3660\text{m}^3/\text{s}$

也只用时 4.9h。洪水历时最短的为 1988 年 9 月洪水,历时仅 5h; 最长为 1976 年 8 月洪水,历时也仅 51h。图 3 为西柳沟龙头拐站和毛不拉图格日格站 1989 年 7 月 21 日洪水过程。

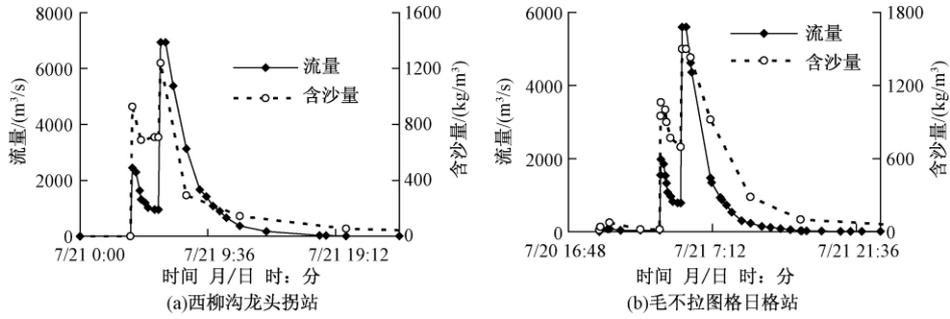


图 3 孔兑典型洪水过程 (1989)

Fig. 3 Typical flood processes in Xiliugou and Maobula gullies in 1989

3.2 孔兑高含沙洪水水沙关系

暴雨洪水期间,冲积河流洪水含沙量随流量的增加而增加。点绘孔兑不同洪水流量和含沙量关系(图 4)后发现,含沙量呈现出随流量增大而增大的趋势,但同一流量下含沙量差异较大,如流量在 $100\text{m}^3/\text{s}$ 时,含沙量在 $50 \sim 800\text{kg}/\text{m}^3$ 之间变化,变幅为 16 倍。造成这种差异的原因与暴雨分布和下垫面产沙条件不同有关。黄河中游黄土丘陵沟壑区的实测资料表明,由于受河道边界条件和流域泥沙补给能力的影响,当流量增大到一定程度后,随着流量继续增大,含沙量不再增大,而是维持在一定值,如黄土沟壑区小流域最大含沙量在 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 左右^[9],而中游皇甫川、孤山川、窟野河等最大含沙量大致在 $1400 \sim 1600\text{kg}/\text{m}^3$ ^[6]。图 4 表明,西柳沟等孔兑洪水具有类似的流量和含沙量关系,当流量超过约 $300\text{m}^3/\text{s}$ 以后,含沙量可以达到最大值,约 $1500\text{kg}/\text{m}^3$ 左右,此后随着流量继续增大,含沙量不再增大,仍维持 $1500\text{kg}/\text{m}^3$ 左右。孔兑高含沙洪水密切的水沙关系还表现在洪峰流量与洪水水量、沙量之间的关系上(图 5),显然洪峰流量越大,洪水过程相应的洪水总量和输沙总量也越大,特别是洪峰流量大于 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 后这种趋势尤为明显。

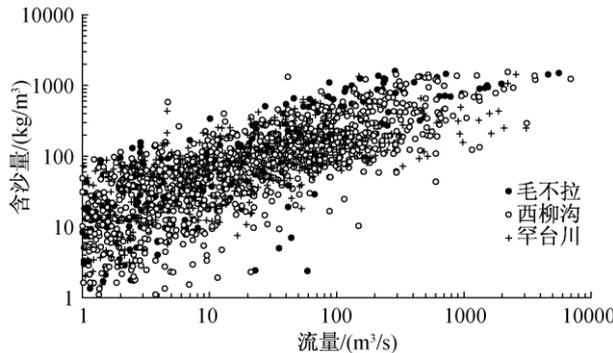


图 4 典型孔兑含沙量和流量关系图

Fig. 4 Relationship between sediment concentration and flood discharge in typical tributaries

3.3 孔兑高含沙洪水水流特性和输沙能力

高含沙水流可分为两相流和伪一相流,在高含沙洪水频发的黄河中游粗泥沙来源区,其高含沙洪水多为两相流^[6]。由于孔兑砒砂岩源区地表物质较粗,导致孔兑洪水携带泥沙较粗。但由于缺乏观测资料,对孔兑泥沙粒径情况的认识极为不足。根据对西柳沟 2010 年 7 月 31 日一次悬移质泥沙取样测定的结果,其中值粒径约为 0.05mm (图 6)。由于取样时流量和含沙量分别仅为 $25\text{m}^3/\text{s}$ 和 $35\text{kg}/\text{m}^3$,故对大洪水而言,该中值粒径是明显偏细的。图 7 是黄河中游皇甫川洪水期悬沙中值粒径与含沙量的关系,可以看出中值粒径随含沙量的增大而增大的趋势十分明显,当含沙量超过 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 后,中值粒径可以达到 $0.3 \sim 0.35\text{mm}$ 之间。由于皇甫川与孔兑均发源于砒砂岩地区,可以认为两者悬沙粒径具有相似性,从而可以推

知孔兑泥沙粒径是很粗的。上述分析说明孔兑高含沙洪水应该与中游粗沙区高含沙洪水一样,为高含沙两相流。高含沙两相流在运行过程中一般会发生沿程泥沙分选^[6],粗颗粒泥沙会先淤积下来。作者在对孔兑考察中发现在孔兑中部河床淤积物中存在大量粗砂和砾石,往下则逐渐减少,到下游平原河段则全是泥沙,这显然是高含沙洪水沿程分选的结果,从而证明孔兑高含沙两相流的特性。

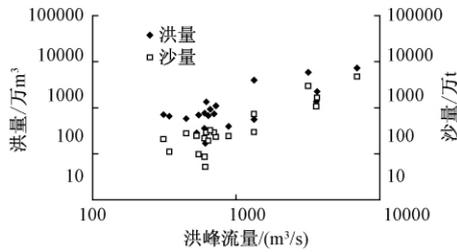


图5 西柳沟典型洪水洪峰流量与洪量、沙量的关系
Fig. 5 Relationship between flood volume (or sediment quantity) and flood peak in Xiliugou gully

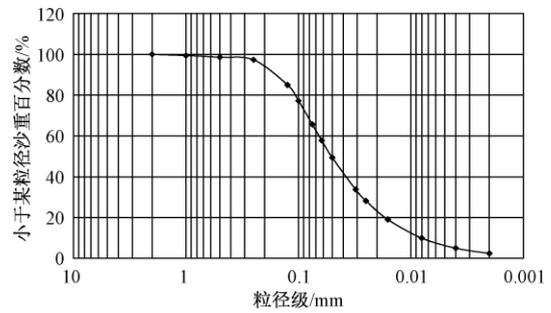


图6 西柳沟龙头拐2010年7月31日取样悬沙级配
Fig. 6 Grain size gradation of suspended load at Longtouguaai station on Xiliugou gully in July 31th, 2010

对于高含沙水流,当含沙量特别是细泥沙含量达到一定程度时,高含沙水流已非一般意义的挟沙水流,水流往往表现为非牛顿体的性质。这时水体中粘性细颗粒泥沙形成一定的结构,可以支持泥沙颗粒悬浮而不沉降,从而使得高含沙水流具有很大的挟沙能力^[6]。孔兑高含沙两相流由于含沙量极高,仍具有非牛顿体特征。从西柳沟高含沙洪水挟沙能力因子 U^3/gh 与含沙量关系来看(图8), U^3/gh 随着含沙量增大而增大,当含沙量超过 300kg/m^3 后,随含沙量增大 U^3/gh 呈减小趋势,这与文献[7]中黄河中游干支流高含沙水流含沙量与 U^3/gh 变化关系一致。说明西柳沟洪水含沙量达到一定量值后,所需水流强度不再增加,甚至存在减少的趋势。

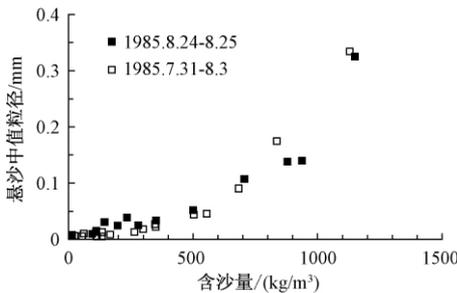


图7 皇甫川洪水悬沙中值粒径与含沙量的关系
Fig. 7 Relationship between median grain size of suspended load and sediment concentration in Huangfuchuan River

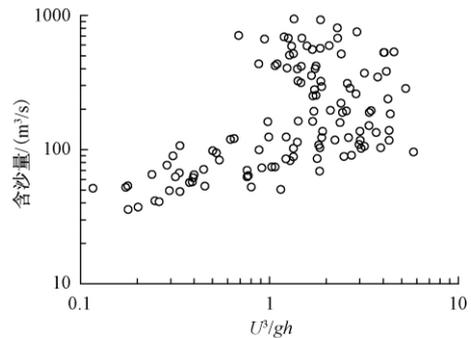


图8 西柳沟洪水含沙量与挟沙能力因子 U^3/gh 的关系
Fig. 8 Relationship between factor U^3/gh and sediment concentration

4 孔兑高含沙洪水冲淤特性

4.1 高含沙洪水的一般冲淤特点

黄河高含沙水流实测资料表明,高含沙洪水冲淤特性主要表现在四个方面^[6]。一是强烈的冲刷或揭河底现象,如黄河干流龙门河段、渭河临潼一带,高含沙洪水时常发生强烈的河床冲刷,河床冲深可达 $7\sim 8\text{m}$,冲刷距离达几十公里。二是当细泥沙含量达到一定程度,形成伪一相流时,高含沙洪水可以长距离输送不发生淤积。三是高含沙洪水一旦丧失稳定输送的条件时,在河道中就会产生严重淤积和强烈的河床变形,也就是滩地淤积抬升,主槽缩窄刷深。四是高含沙洪水一旦进入层流状态,其流动就会停滞,产生浆河,造成严重淤积。

4.2 孔兑高含沙洪水冲刷条件和断面调整特点

暴雨洪水期间,孔兑高含沙洪水不但具有峰高量大、含沙量高的特点,河槽也往往产生强烈冲刷。从西柳沟龙头拐断面洪水期冲淤面积与洪峰流量关系图(图9)可以看出,当流量低于 $1\ 000\text{m}^3/\text{s}$ 时河道有冲有淤,以冲刷居多,冲淤幅度较小。这种情况下断面的调整主要表现为主槽冲刷和滩地淤积。河道总体冲淤性质主要决定于主槽冲刷量和滩地淤积量的叠加大小。如西柳沟1988年9月9日洪水,洪峰流量 $531\text{m}^3/\text{s}$,最大含沙量 $1\ 290\text{kg}/\text{m}^3$,洪水过后深槽部分河宽由132m缩窄至84m,槽深由0.55m增加至1.21m,嫩滩部分平均淤积厚度为0.42m,其河槽形态变化见图10。当洪峰流量超过 $1\ 000\text{m}^3/\text{s}$ 后,河床冲刷强度明显增大。1989年7月21日洪水,洪峰流量和最大含沙量分别高达 $6\ 940\text{m}^3/\text{s}$ 和 $1\ 240\text{kg}/\text{m}^3$,洪水过后,龙头拐断面主槽平均冲刷下切1.17m,最大冲深1.87m,主槽过流面积增大 273m^2 ,增幅达40.7%(图10)。

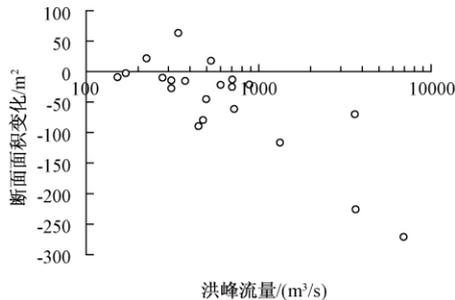


图9 龙头拐洪峰流量与河床冲淤关系

Fig. 9 Relationship between channel scouring and silting and flood peak at Longtouguaui

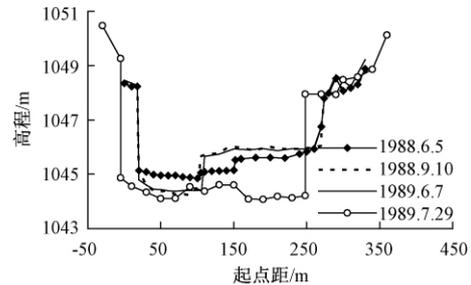


图10 龙头拐1988.9.9和1989.7.21洪水前后断面图

Fig. 10 Sketch of Longtouguaui cross-section before and after flood

图11是龙头拐断面平均河底高程变化过程,可以看出该断面长期以来河底高程基没有发生趋势性变化,河槽断面仍能基本维持冲淤平衡。而下游冲积平原区河道情况则有所不同,由于比降减小,河道展宽,泥沙易于淤积,加之堤防的存在限制了河道的摆动,下游河道逐渐淤积抬升,形成典型的“悬河”。图12为距河口约5km处河道断面图,主槽河宽330m,最大深度3.45m,滩面高出堤外地面约2~3m。可见长期来看龙头拐以上河道只是输沙的通道,而下游平坦河段是泥沙堆积的场所。

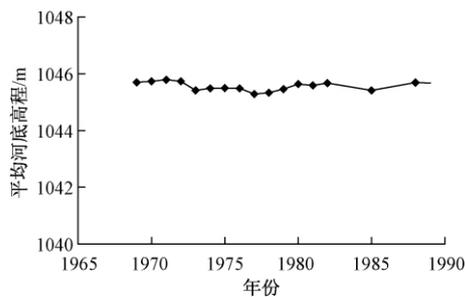


图11 西柳沟龙头拐断面平均河底高程变化过程

Fig. 11 Variation of average elevation of Longtouguaui cross-section of Xiliugou gully

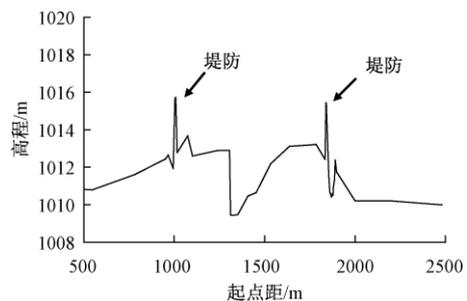


图12 西柳沟下游典型断面图(距河口约5km)

Fig. 12 Sketch of cross-section in lower Xiliugou gully(5km above river mouth)

4.3 孔兑高含沙洪水对干流河道的影响

由于孔兑入汇处黄河河段比降只有万分之一左右,挟沙能力很低,孔兑洪水挟带的大量泥沙往往在干支流交汇河段迅速淤积形成沙坝,严重时阻断黄河,壅高水位,引起洪水灾害。历史上孔兑洪水淤积阻断黄河的事件多次发生,如1989年7月21日发生的西柳沟高含沙洪水堵河事件中干流形成的沙坝高达2~4m、长600~1000m、上下游范围达7km。图13是该场洪水过程中干流水位流量变化过程,可以看出洪水进入黄河后由于水流顶托和泥沙淤积,导致干流水位急剧抬升和流量降低,昭君坟站(入汇口上游1.5km处)水位壅高幅度达2.18m。由于河床大量淤积,洪水过后干流水位仍长时间维持在较

高水位,直至8月12日以后才基本恢复正常,历时25天。

孔兑洪水泥沙的影响不仅限于交汇区局部河段,对交汇区上下游较长范围河段的冲淤也存在很大影响。图14是1989年7月21日洪水前后干流三湖河口和头道拐站输沙量过程图,其中三湖河口站位于最上游的毛不拉孔兑上游,头道拐站位于最下游的孔兑呼斯太河下游。可以看出7月21-25日头道拐输沙量远大于三湖河口,显然是受支流来沙的影响,这表明部分支流来沙被输出到头道拐以下河段。统计了7月20-25日三湖河口、头道拐和支流三站输沙量之和(表1),可以看出洪水前后三条孔兑总来沙量达11395万t,而洪水前后头道拐输沙量仅比三湖河口多了516万t,可见大部分支流来沙淤积在干流河道中。虽然之后沙坝逐渐冲刷,但并不意味着冲刷后的泥沙都能排出内蒙古河段,表1中直到9月底头道拐站输沙量也只比三湖河口多了1153万t,远低于支流来沙量12347万t,表明大部分支流来沙仍然淤积在干流河道中。

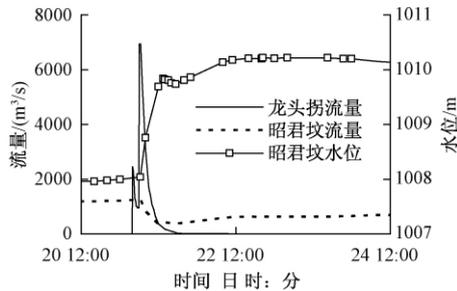


图13 “89.7.21”洪水昭君坟水位流量过程
Fig. 13 Water level and discharge processes at Zhaojunfen station during “1989.7.21” flood

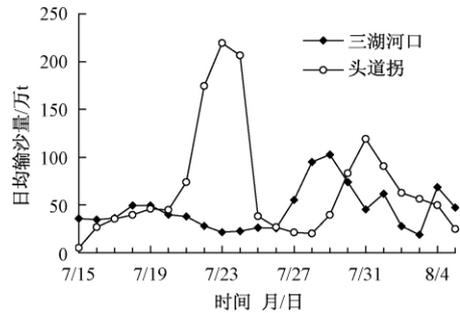


图14 1989年7月21日孔兑洪水前后干流输沙过程
Fig. 14 Sediment load process at Sanhuhekou and Toudaoguai stations during “1989.7.21” flood period

由于孔兑泥沙粒径较粗,加之内蒙古黄河流量小、比降较缓,泥沙淤积后很难排出本河段,从而成为内蒙古河段淤积萎缩、排洪排凌能力下降的重要因素^[10,11]之一,如黄河干流昭君坟断面主槽过流能力由20世纪70-80年代的2200~3200 m³/s减至90年代的1400 m³/s^[12]。杨根生等^[13]认为十大孔兑是黄河巴彦高勒-头道拐段泥沙淤积和致灾的根源,十大孔兑对巴彦高勒-头道拐段淤积粗沙的贡献率从1954年的50.5%增加到2000年的87.8%。

表1 1989年7月21日洪水前后不同时段干支流主要站输沙量 单位:万t
Table 1 Sediment load at stations on main stream and tributaries in different periods unit: 10⁴t

时段	三湖河口	头道拐	龙头拐、图格日格、红塔沟三站之和
1989.7.20-7.25	242	758	11395
1989.7.20-9.30	7289	8442	12347

5 结论

通过黄河上游孔兑高含沙洪水资料的分析,对孔兑高含沙洪水特点、冲淤特性及其对干流冲淤的影响进行了初步研究,得出以下认识:

(1) 黄河上游孔兑高含沙洪水具有峰高量大、含沙量高且陡涨陡落、持续时间短的特点;洪水期间,含沙量与流量关系密切,随流量增大而增大,但存在最大值,当含沙量达到1500 kg/m³左右后不再随流量增大而继续增大。

(2) 孔兑高含沙洪水具有极强的输沙能力。孔兑高含沙洪水的输沙能力随着含沙量增大而增大,当含沙量超过300 kg/m³后,输沙能力因子 U^3/gh 呈减小趋势,输送同样的高含沙水流所需水流强度呈减少趋势。

(3) 当洪峰流量低于1000 m³/s时孔兑河道有冲有淤,以冲刷居多,冲淤幅度较小。断面的调整主要表现为主槽冲刷和滩地淤积;当洪峰流量超过1000 m³/s时河槽即可发生全断面的强烈冲刷,冲刷程度随洪峰流量增大而增大。

(4) 孔兑泥沙进入黄河干流后不仅淤堵干流,造成灾害,而且难以排出内蒙古河段,成为内蒙古河段淤积萎缩、排洪排凌能力下降的重要原因。

参考文献:

- [1] 支俊峰,时明立. “89.7.21”十大孔兑区洪水泥沙淤堵黄河分析[R]. 黄河水沙变化研究,郑州:黄河水利出版社,2002.
- [2] 杨振业. 1961、1966年内蒙古昭君坟段泥沙淤积黄河受阻的情况分析[J]. 人民黄河,1984(6):15-19.
- [3] 武盛,于玲红. 西柳沟泄洪对包钢造成的危害及其对策[J]. 包钢科技,2001,27(增刊):159-161.
- [4] 刘韬,张士峰,刘苏峡. 十大孔兑暴雨洪水产输沙关系初探[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(3):18-21.
- [5] 袁金梁. 鄂尔多斯高原水文泥沙特性[J]. 内蒙古水利,1995(1):39-42.
- [6] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京:清华大学出版社,1989.
- [7] 万兆惠,沈受百. 黄河干支流的高浓度输沙现象,黄河泥沙研究报告选编[R]. 郑州:黄河水利科学研究院,1978.
- [8] 张胜利,孟庆枚. 皇甫川高含沙水流特性初步分析[J]. 人民黄河,1980(3):44-49.
- [9] 费祥俊,邵学军. 泥沙源区沟道输沙能力的计算方法[J]. 泥沙研究,2004(2):2-8.
- [10] 刘晓燕,侯素珍,常温花. 黄河内蒙古河段主槽萎缩原因和对策[J]. 水利学报,2007,40(9):18-21.
- [11] 侯素珍,王平. 黄河宁蒙河道排洪指标及径流条件分析[J]. 人民黄河,2005,27(9):24-25,27.
- [12] 侯素珍,常温花,王平,等. 黄河内蒙古段河道萎缩特征及成因[J]. 人民黄河,2007,29(1):25-27.
- [13] 杨根生,拓万全. 风沙对黄河内蒙古河段河道淤积泥沙的影响[J]. 西北水电,2004(3):44-49.

Scouring and silting characteristics of hyper-concentrated floods of ten tributaries of Upper Yellow River

WANG Ping¹, HOU Su-zhen¹, ZHANG Yuan-feng¹, WU Bao-sheng²

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou Henan 450003, China;
2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The hyper-concentrated floods from the ten tributaries empty into the Inner-Mongolia Yellow River often cause dike break and channel plug in the lower reaches of the mainstream. The hyper-concentrated floods are characterized by high peak, large flood volume, high sediment concentration, sharp rising and dropping and short duration. The preliminary research shows the hyper-concentrated floods of those tributaries have strong capacity in sediment transport. The flow intensity needed to transport sediment does not increase with the sediment concentration, even to decline, when the sediment concentration is above 300kg/m³. When the flood peak discharge is below 1 000m³/s, sedimentation or scouring both can occur in the river channel. The adjustment of the cross-section is presented by the feature of scouring channel and silting floodplain. When the flood peak exceeds 1 000m³/s, the whole river bed can be scoured, and the larger the flood peak is, the stronger the scouring becomes. The sediment carried into the mainstream by the floods can hardly be transported out of the Inner-Mongolia Yellow River, and thus becomes one of the main reasons for the channel shrinkage and reduction in flood and ice flood discharging capacity of the Inner-Mongolia Yellow River in recent years.

Key words: ten tributaries; hyper-concentrated flood; capacity of sediment transport; characteristics of scouring and silting