

王之君, 拓万全, 王昱, 等. 黄河上游“十大孔兑”高含沙洪水灾害过程与输沙特性[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 93–96.  
[WANG Zhijun, TA Wanquan, WANG Yu, et al. Disasters from the ten tributaries in the upper Yellow River[J]. Journal of  
Catastrophology, 2019, 34(3): 93–96. doi: 10.3969/j. issn. 1000–811X. 2019. 03. 018. ]

# 黄河上游“十大孔兑”高含沙洪水灾害过程与输沙特性<sup>\*</sup>

王之君<sup>1,2</sup>, 拓万全<sup>2</sup>, 王昱<sup>1</sup>, 张科<sup>1</sup>, 李余杰<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化  
重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:**黄河上游“十大孔兑”沙漠流域的高含沙洪水, 是该区域季节交替的风水复合侵蚀作用的结果。以“十大孔兑”流域的典型支沟苏达拉尔沟为依托, 基于野外原型观测, 系统深入地分析了沙漠粗沙高含沙洪水(泥流)输沙特性与致灾过程。研究结果表明: 该区域的高含沙洪水, 由暴雨诱发, 沿程叠加风力、水力、重力等侵蚀作用产沙, 最终演变为高含沙洪水(泥流)灾害。降雨强度大于 0.27 mm/min 且持续 35~60 min 以上的暴雨, 大多可诱发高含沙洪水, 含沙量可高达 1 400 kg/m<sup>3</sup> 以上。研究结果为开展“十大孔兑”沙漠流域风水复合侵蚀模型研究打下了坚实的理论基础; 为干旱半干旱区沙漠流域水土流失防控与灾害治理提供了工程参考意见; 对从流域侵蚀产沙角度出发, 探究黄河河道水沙变化, 维护黄河健康而言, 亦具有重要的参考价值。  
**关键词:**黄河; 十大孔兑; 高含沙洪水; 泥沙输移; 水土流失; 风水复合侵蚀  
**中图分类号:** TV142; X43; X915.5   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000–811X(2019)03–0093–04  
doi: 10.3969/j. issn. 1000–811X. 2019. 03. 018

高含沙洪水是携带一定含量粘性细颗粒的水流在某种水沙与河床边界条件下所形成的一种含沙浓度较高的特殊水流现象, 在汛期天然河流中时有发生<sup>[1–3]</sup>。干旱区河流因汛期持续而集中的高含沙洪水引发的高含沙泥流灾害, 通常对水利工程、工农业生产乃至河流生态系统带来巨大的影响和损失, 其随机性和突发性类似于山区河流上发生的泥石流。黄河上游“十大孔兑”沙漠流域的高含沙洪水, 是该区独特且季节交替的风水复合侵蚀作用的结果。“十大孔兑”高含沙洪水(泥流)入汇, 导致黄河上游内蒙古河段主槽萎缩、河流改道加剧, 小水决口, 泥沙冰凌等灾害频发。因此, 深入系统地开展风水两相作用下高含沙洪水灾害机理研究, 对于维护黄河健康、保障流域生态环境系统稳定而言, 显得尤为迫切且意义重大。研究对丰富沙漠河流泥沙动力学及风水复合土壤侵蚀理论体系而言, 具有重要的科学意义; 对于干旱区水土流失灾害防控与治理而言, 亦具有重要的实践指导价值。

高含沙洪水运动究其理论本质而言, 仍然是水流与泥沙颗粒相互作用的过程。区别于一般挟沙水流重视水流的作用, 高含沙洪水则更侧重于泥沙颗粒对水流的影响。王兴奎等<sup>[4]</sup>就高含沙洪水在黄土高原丘陵沟壑中的形成过程进行了研究; 许炯心<sup>[5–8]</sup>则从高含沙洪水悬移质粒度特征的角度出发, 结合大量实测资料, 对黄河中游黄土高原

流域高含沙洪水的形成过程与空间分布特征进行了系统的分析, 也对黄河上游内蒙古河段十大孔兑侵蚀产沙进行了系列研究, 王平等<sup>[9–10]</sup>则就孔兑高含沙洪水冲淤特性进行了分析。上述研究已开始关注到特殊的风水交替侵蚀作用与高含沙洪水的关系并提出从两相流角度认知高含沙洪水的发生发展过程。拓万全等<sup>[11–12]</sup>以黄河上游内蒙古河段“十大孔兑”典型沟道为例, 通过长期持续的风水复合侵蚀过程观测, 在明确并量化风沙过程对流域高产沙的主体贡献之基础上, 提出了适用于干旱区沙漠河流高含沙洪水发生与控制的关键气候因子及地貌因子, 取得了黄河上游干旱区沙漠流域风水复合侵蚀及高含沙洪水(泥流)研究方面的理论性突破。王之君等<sup>[13–14]</sup>则在此基础上侧重从高含沙洪水固体物质组成角度出发, 进一步明确了“十大孔兑”高含沙洪水发生发展的物理过程及两相流本质, 提出了区别于黄河中游黄土高原流域粘性高含沙洪水临界发生标准的黄河上游沙漠宽谷流域沙漠粗沙高含沙洪水的临界含沙量标准及最优粒度指标, 进而对流域高含沙洪水防控及水土流失治理提供了参考依据。本文将在持续开展野外观测的基础上, 侧重从洪水过程角度就“十大孔兑”高含沙洪水演进乃至发展成泥流灾害的输沙过程进行分析, 为下一步建立基于真实物理图景的流域风水复合侵蚀产沙耦合数学模型奠定基础。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019–02–24      修回日期: 2019–04–13  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51269009); 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403302); 中科院西部之光人才培养计划项目(29Y329971)  
第一作者简介: 王之君(1980–), 男, 甘肃武威人, 讲师, 理学博士, 主要从事干旱区自然灾害理论与防治、工程泥沙等方面研究。E-mail: wzj1159@163.com

1 区域概况

“十大孔兑”(孔兑取蒙语山洪沟之意)位于黄河上游沙漠宽谷段下段,干流三湖河口-头道拐水文站区间右岸,黄河河套内,108°47'~110°58'E,39°47'~40°30'N之间,由南部鄂尔多斯高原发源,流经库布齐沙漠,横穿下游洪积平原后汇入黄河干流。自西向东依次为毛不拉孔兑、布尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉川、母花河、东柳沟和虎斯太河(图1a,图1b, T1~T10)。该区是我国典型的干旱半干旱区,属大陆性气候。冬季严寒而漫长,夏季炎热而短暂,季节及昼夜温差极大。冬春两季剧烈的风沙活动和夏秋两季高强度的暴雨事件所致的季节性风水交替作用,构成了本区自然气候的显著特点。区域地势南高北低,上游砒砂岩丘陵沟壑区海拔1300~1500 m,沟壑纵横,地表破碎、植被稀疏、水土流失严重,是雨季高含沙洪水的产流区;中游库布齐沙漠横贯东西,海拔1200~1400 m,罕台川以西多为流动沙丘,以东则以半固定沙丘为主。风季黄沙滚滚,搬运大量沙漠粗沙堆积在沟谷底部及岸坡,发育典型的沙漠沟道,是高含沙洪水重要的沙漠粗沙物质储备区。下游为冲洪积扇区,海拔1000 m左右,地势平坦,土地肥沃,属黄河冲积平原,也是内蒙古自治区重要的粮食产区之一。

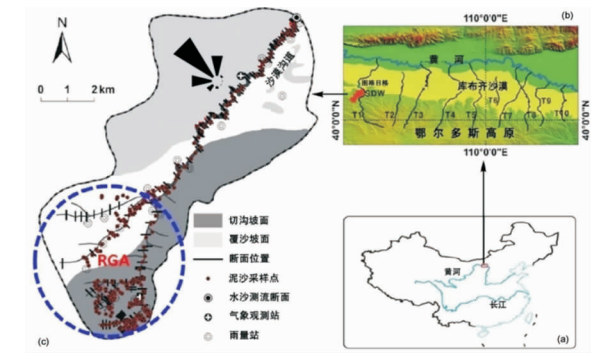


图1 苏达ラル沟小流域泥流观测场地理位置示意图

“十大孔兑”各流域形态相似,呈南北狭长型,各孔兑几乎等距离切割,由南向北直奔黄河。如图1c所示,本文选定的研究区域为苏达ラル沟沙漠小流域,是“十大孔兑”最西端毛不拉孔兑(图1, T1)典型的季节性高含沙洪水支沟。流域面积约59 km<sup>2</sup>,其中上游丘陵沟壑区切沟发育,面积32 km<sup>2</sup>,中部

流动沙丘面积21 km<sup>2</sup>,沙漠沟道全长8 km,由西南向东北方向蜿蜒延伸,与正北方向交角约38°,沟道平均坡度0.005 8。上游覆沙砒砂岩切沟是雨季重要的产流区域(图1, RGA),而中部沙漠沟道是风季大量风沙暂时堆存的场所,尤其以左岸沙丘及沟道底部为盛。上游暴雨诱发的高含沙洪水裹挟大量沙漠粗沙倾泻而下,汇入毛不拉孔兑并进而汇入黄河,严重者造成水下沙坝淤堵黄河等泥沙灾害。因该区对季节性交替的风沙水沙过程极为敏感,属温带草原与荒漠过渡区的典型生态高度脆弱区,故而选作理想的研究区域,依托开展风水复合侵蚀及高含沙洪水灾害过程机理研究。

2 研究方法

为方便开展高含沙洪水侵蚀产沙及致灾过程研究,2011年起,在苏达ラル沙漠流域建立了高含沙洪水(沙漠泥流)野外观测场。2011年5月风季结束后,我们在沟道末端汇入毛不拉孔兑的河口处选择了一个相对顺直且沟道底部砾石粒径较细的河道断面,修建了一个底宽17.4 m,顶宽21.6 m的混凝土测流断面(图2a,图2b),其上架设浮子式水位计监测水位(图2a),2012年,将浮子式水位计换为能够自计水位的超声波水位计(图2b)。参考 Arcement and Schneider[15]的研究中的相关公式,将所测水位换算为流量。与此同时,在暴雨洪水演进过程中,分别用固定在断面上方2.5 m长不锈钢缆上的容量480 ml和550 ml的采沙瓶采集洪水水面以下50 cm内的悬沙水样;采样时间间隔设定为:涨水及洪峰时段1~2 min;退水时段3~10 min。沙样经烘干以确定悬沙浓度(含沙量)。在苏达ラル沟道上设置并用布设于横断面两岸的简易桩标记了180个横断面,其中80个断面布设在约8 km长的中部沙漠沟道上,断面平均间距80 m,其余断面布设在上游产流区的沟道上;用 FTS832 型全站仪进行了断面测量,棱镜测距精度±(2 mm + 2 ppm),以便测算沟道单位长度的风沙堆积量和泥沙冲淤量。此外,我们还在流域内分批布设了46个雨量站(2011年18个,2012年28个,以上游产流区为主),用来监测降雨强度、降雨量及其时空分布等(图1c)。

基于2011-2012年罕见且难得的四场暴雨(2011年8月23日,2012年7月18日,2012年7月19日及2012年7月27日),观测其诱发的高含沙洪水(泥流)的发生发展及侵蚀产沙过程,进而分析其输沙特性,探明致灾物理机制。

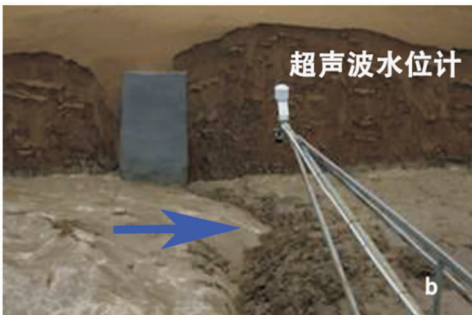


图2 高含沙洪水测流断面及仪器布设图

表 1 苏达拉尔沙漠小流域暴雨诱发高含沙洪水特征值统计表

2011 – 2012					
降雨强度: >0.27 mm/min					
发生日期	降雨量/mm		降雨历时 /min	洪峰流量 /(m <sup>3</sup> /s)	峰值含沙量 /(10 <sup>6</sup> mg/l)
	范围	平均值			
2011 年 8 月 13 日	17.4 ~ 37.2	30.14	35	160	1.4
2012 年 7 月 18 日	30 ~ 121	62.16	45	80	1.23
2012 年 7 月 19 日	70 ~ 84	74.7	60	53	1.12
2012 年 7 月 27 日	32 ~ 38	36.1	40	74	1.28

3 结果分析

3.1 高含沙洪水形成过程

“十大孔兑”的高含沙洪水，起初是暴雨经产汇流过程而形成的山洪。山洪沿着沟道快速演进，沿程裹挟大量泥沙，进而形成高含沙洪水乃至泥流灾害。降雨是高含沙洪水产生的首要诱发因素。观测结果表明：降雨强度大于 0.27 mm/min 且持续 35 ~ 60 min 的四场暴雨均诱发产生高含沙洪水，如表 1 所示。以 2012 年 7 月 18 日降雨过程为例，绘制其降雨量等值线图如图 3 所示。



图 3 降雨量等值线图(2012. 7. 18)

由图 3 及表 1 可知，本次降雨主要集中流域上游下段丘陵沟壑区与中游沙漠沟道区交界处，

45 min降雨历史内平均降雨量 62.16 mm，进而诱发此次高含沙洪水乃至泥流灾害过程。

3.2 高含沙洪水发展过程

观测结果表明：四场暴雨洪水诱发高含沙洪水，其峰值悬移质含沙量达到  $1.1 \times 10^6 \sim 1.4 \times 10^6$  mg/l(表 1)，最终演变为侵蚀能力极强泥流灾害。四场暴雨洪水的洪峰流量及输沙过程线详见笔者研究团队此前发表的研究成果<sup>[11,13]</sup>，此处不再赘述。仍以 2012 年 7 月 18 日的高含沙洪水过程为例，说明其沿程侵蚀产沙并演变为泥流灾害的过程。如图 4 所示，洪水输沙过程来势迅猛，传播速度极快，洪水沿沙漠沟道倾泻而下，侵蚀冲刷沟道，含沙量猛增，经历了由含沙水流到高含沙洪水乃至泥流的演变过程。

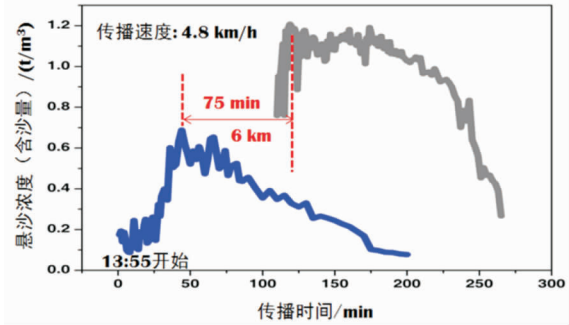


图 4 2012 年 7 月 18 日高含沙洪水输沙过程

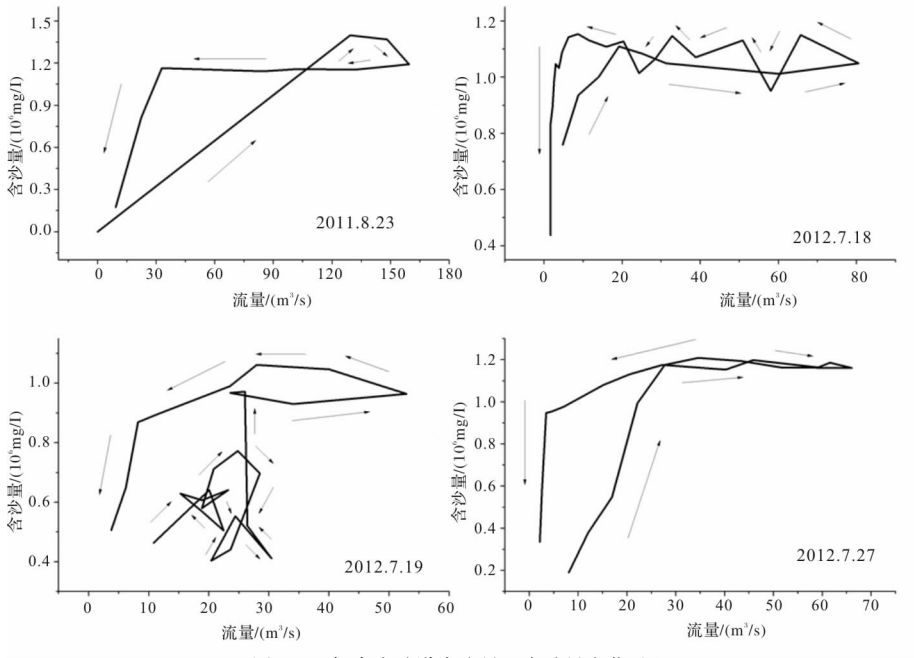


图 5 四场高含沙洪水流量 - 含沙量变化过程

### 3.3 高含沙洪水输沙特性

笔者团队前期野外观测结果表明:洪水过程表现出流量陡涨陡落的特点,且水峰沙峰同步,沙峰消退过程明显滞后于洪峰,体现出明显的“小水挟大沙”特点<sup>[11,13]</sup>。绘制其流量含沙量关系曲线得知:相应的流量-含沙量变化过程表现为逆时针的绳套关系(图5)。分析图5不难发现,伴随着沿程含沙量的增大,沙峰随洪峰波动明显,流量与含沙量之间并非单值关系,而出现明显的“水沙双峰”现象,这说明即使在退水阶段,沟道内仍有丰富的沙漠粗沙补给来源,即为前文所述的沟道左岸高大沙丘源源不断的沙漠粗沙在坡脚水流侧向掏蚀作用下重力侵蚀滑塌所致;这意味着沟道高含沙洪水的演进及泥流灾害的发生是沿程各类侵蚀作用的复杂叠加过程。

## 4 结论

本文选取黄河上游“十大孔兑”典型沙漠支沟苏达拉尔沟作为原型,基于野外原型观测与数据分析,系统深入地探究了沙漠粗沙离散型高含沙洪水(泥流)输沙过程与机理,为下一步开展“十大孔兑”沙漠流域风水复合侵蚀模型理论研究打下了坚实的理论基础,同时也为干旱半干旱区沙漠流域水土流失防控与灾害治理提供了工程参考意见。研究对从流域侵蚀产沙角度出发,探究黄河河道水沙变化,维护黄河健康而言,亦做了初步且较为有益的尝试。

(1)黄河上游“十大孔兑”沙漠流域的高含沙洪水,是季节性风水复合侵蚀的结果。沟道高含沙洪水输沙过程十分复杂,是流域产汇流路径上风力、水力、重力等侵蚀作用的叠加和集中反映。

(2)“十大孔兑”沙漠流域的高含沙洪水均由暴雨诱发,在沿程输移过程中,因丰富的沙漠粗沙补给,常演变为高含沙泥流灾害;伴随着沿程含沙量的增大,沙峰随洪峰波动明显,流量与含沙量之间并非单值关系,呈现“水沙双峰”的逆时针绳套关系。

(3)“十大孔兑”流域的高含沙洪水侵蚀过程剧烈,加之风沙活动,土壤侵蚀及水土流失严重。实际工程中可通过流域防风固沙措施的实施,减少暴雨洪水的泥沙输入,一定程度上预防并控制其演变成泥流灾害。

## 参考文献:

- [1] 梁志勇. 黄河高含沙水流泥沙运动与河床演变 [M]. 黄河水利出版社, 2001.
- [2] Bradley J B. Transition of a Meandering River to a Braided System due to High Sediment Concentration Flows [C]// River Meandering, ASCE, 2015.
- [3] 许炯心. 华南花岗岩地区的高含沙水流及其地貌学意义 [J]. 泥沙研究, 1992, 17 (2): 14-21.
- [4] 王兴奎, 钱宁, 胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程 [J]. 水利学报, 1982, 13 (7): 28-37.
- [5] 许炯心. 风水两相作用对黄河流域高含沙水流的影响 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005, 35 (9): 899-906.
- [6] 许炯心. 风水两相作用对黄河支流悬移质粒度特征的影响及其意义 [J]. 自然科学进展, 2005, 18 (8): 958-964.
- [7] 许炯心. “十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系 [J]. 泥沙研究, 2013, 38 (6): 28-37.
- [8] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因 [J]. 中国沙漠, 2014, 34 (6): 1641-1649.
- [9] 王平, 侯素珍, 张原峰, 等. 黄河上游孔兑高含沙洪水特点与冲淤特性 [J]. 泥沙研究, 2013, 38 (1): 67-73.
- [10] 王平, 胡恬, 郭秀吉, 等. 黄河上游沙漠宽谷段高含沙支流对干流的淤堵影响 [J]. 中国沙漠, 2017, 37 (06): 192-201.
- [11] TA W, WANG H, JIA X. The contribution of aeolian processes to fluvial sediment yield from a desert watershed in the Ordos Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2014, 29 (1): 80-89.
- [12] TA W, WANG H, JIA X. Aeolian process-induced hyper-concentrated flow in a desert watershed [J]. Journal of Hydrology, 2014, 511 (7): 220-228.
- [13] WANG Z, TA W. Hyper-concentrated flow response to aeolian and fluvial interactions from a desert watershed upstream of the Yellow River [J]. Catena, 2016, 147: 258-268.
- [14] 王之君. 黄河上游沙漠宽谷段高含沙洪水灾害机理与河型响应 [D]. 北京: 中国科学院大学 2016.
- [15] Arcement GJ, Schneider VR. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains [R]. US Geological Survey Water Supply Paper, 1989, 2339: 1-38.

## Routing Process and Sediment Transport of Hyper-concentrated Flow Disasters from the Ten Tributaries in the Upper Yellow River

WANG Zhijun<sup>1,2</sup>, TA Wanquan<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup> and LI Yujie<sup>1</sup>

(1. School of energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Key Laboratory of Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The hyper-concentrated flows from the Ten Tributaries in the Upper Yellow River are recognized as the result of severe and seasonal alternate aeolian-fluvial interactions. Here, based on the typical tributary i. e., Sudalaer desert channel of the Ten Tributary watershed, the sediment transport process and the mechanism of hyper-concentrated (mud) flow disasters mainly composed of coarse aeolian sands were studied systematically by means of field observation. Our results indicate that the hyper-concentrated flows in the study area are always induced by rainfall, and ultimately develop into mud flow disasters under the coupling erosion effects of aeolian-fluvial interactions and gravitational erosion during the routing processes, with the critical value of rainfall intensity exceeding 0.27 mm/min, rainfall duration about 35~60 min, and sediment concentration exceeding 1 400 kg/m<sup>3</sup>. These main findings could provide a solid foundation for aeolian-fluvial interaction modeling research and may give some helpful advice on governing and mitigating water and soil erosion, and are even of great guiding significance for water sand sediment variability research as well as maintaining the health of the Yellow River from the perspective of watershed scale.

**Key words:** Yellow River; ten tributaries; hyper-concentrated flow; sediment transport; water and soil erosion; aeolian-fluvial interaction