

岔巴沟三川口交汇河段洪水淹没致灾 数值模拟

许泽星¹, 任洪玉², 丁文峰², 王协康^{1*}

1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都, 610065;
2. 长江水利委员会长江科学院, 武汉430010)

摘要: 干支河流交汇区河段水流相互挤压、顶托作用, 使得交汇区水流运动特性复杂多变。本文采用平面二维水动力数值模拟方法, 对岔巴沟三川口交汇河段的洪水过程进行了模拟分析, 讨论了在两条支流来水条件下交汇区洪水水位、流速场及淹没致灾特点。结果表明: 受交汇水流影响, 交汇口局部产生壅水, 水面纵比降变缓, 水位抬升导致河段淹没受灾; 在双支流来流情况下, 交汇区水流的相互掺混作用加剧, 两河顶托作用增强, 使得交汇区洪水位进一步抬升, 受灾范围进一步扩大。通过分析岔巴沟三川口交汇河段洪水演进及淹没致灾的特点, 可为岔巴沟及其他相似河段的防洪及河道治理提供理论依据。

关键词: 岔巴沟; 交汇河段; 淹没致灾; 数值模拟

1 引言

干支河流交汇是水系发育的重要地貌特征, 也是城镇与工农业的重要聚集地, 其独特的河床冲淤形态以及水流条件, 给航运、农业等提供便利, 也带来了诸多复杂的问题。尤其是山区河流, 其河道比降大, 汇流速度快, 致使河流交汇区常发生泥沙淤堵、水位抬升、水流漫滩等水沙灾害。因此, 河流交汇区水流结构特征、泥沙输移及灾害防治长期是水力学学科研究的重点和难点。自 Taylor^[1]于 1944 年通过水槽试验研究了 40° 和 135° 交汇水流的水深变化规律以来, 许多学者就交汇区水流特性展开了系列研究。Best 等^[2]通过概化水槽试验对交汇区的水流运动特性进行了系统分析并划分为多个水力特性区, 为后续研究提供了便利; Biron 等^[3]对干支流河床具有高程差的交汇形态展开了细致的研究, 发现在交汇口附近的分离区消失并且下游加速区减弱; 张琦等^[4]采用数值模拟方法对明渠交汇区水流特性进行了研究, 结果表明支流的平面形态是引起水流特性变化的的重要因素。然而, 概

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502504); 国家自然科学基金项目(41771543)。

作者简介: 许泽星(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水力学及河流动力学。

*通信作者: E-mail: wangxiekang@scu.edu.cn

化水槽模型结构简单，形式单一，难以表征天然河道交汇的复杂性，越来越多的学者采用野外原型观测、模型试验和数值模拟结合的方式对天然交汇河流进行研究。Baranya 等^[5]通过原型观测和 RANS 模型对天然交汇河道的水流结构进行了研究；周苏芬等^[6]基于实测资料与数值模拟方法，分析了不同干支来流条件下嘉陵江与长江交汇区的水位、水面坡降及床面切应力的变化。本文针对三川口交汇段洪水演进特点，采用平面二维水动力模型对河段进行了数值模拟，探讨了洪水条件下该交汇河段洪水传播特征、流速变化及淹没致灾特点，为改善交汇段河道环境、提高防洪能力及防灾减灾提供理论依据。

2 研究河段概况

岔巴沟流域位于陕西省榆林市子洲县境内，为大理河的一级支流，流域控制面积 205km²。流域内沟道发育，交汇口众多，三川口交汇段是其中一个典型的受交汇水流影响的易成灾河段，选其为研究典型。河道平面形态如图 1 所示，干流岔巴沟主河槽宽约 30m，左岸滩地宽约 110m，右岸滩地宽约 140m，支流刘家沟与干流岔巴沟交汇区有一心滩，其心滩以及边滩均被占用为农业耕地及居民住房，大洪水易满溢上滩，造成人员财产损失；距刘家沟与干流岔巴沟交汇口下游约 130m 处有支流米脂沟汇入，形成三川交汇，成灾风险加剧。据调查分析，河槽糙率为 0.028，滩地糙率为 0.035。

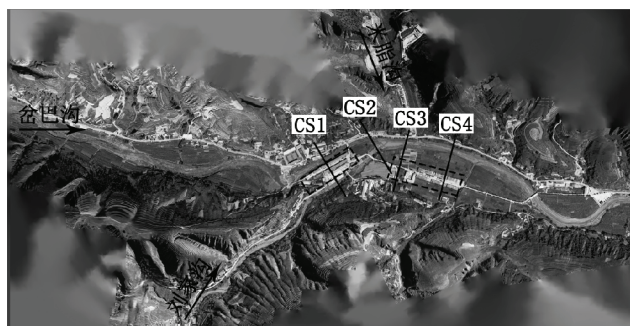


图 1 三川口河段平面形态

3 计算模型

3.1 模型的建立

在宽浅水域中，水深、流速等水力要素在垂向变化要远小于水平方向的变化，因此在计算过程中，本文采用沿水深方向平均的二维水动力模型对研究河段进行模拟。其基本控制方程如下式所示：

连续性方程：

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial uH}{\partial t} + \beta \frac{\partial uuH}{\partial x} + \beta \frac{\partial vuH}{\partial y} = -g \frac{u\sqrt{(u^2+v^2)}}{c^2} - gH \frac{\partial \xi}{\partial x} + v_i H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

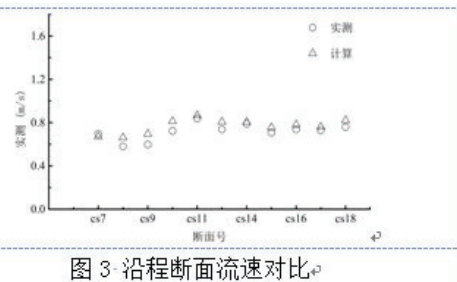
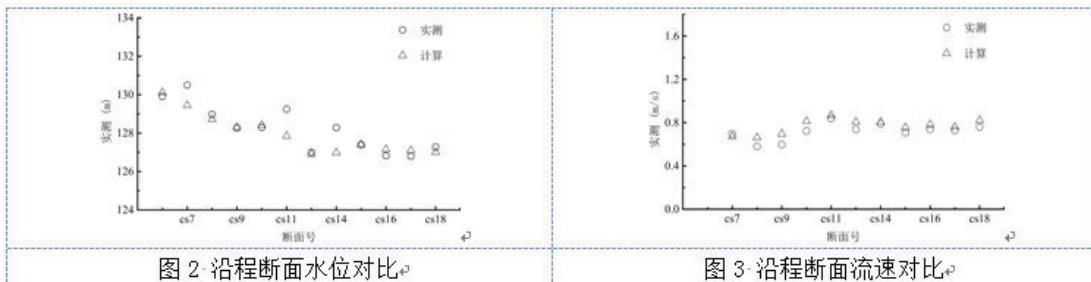
$$\frac{\partial vH}{\partial t} + \beta \frac{\partial uvH}{\partial x} + \beta \frac{\partial vvH}{\partial y} = -g \frac{v\sqrt{(u^2+v^2)}}{c^2} - gH \frac{\partial \xi}{\partial y} + v_i H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: ξ 是水位; H 是水深; u 、 v 分别是 x 、 y 方向的垂线平均流速; c 是谢齐系数; g 是重力加速度; v_i 是平均涡黏系数; β 是对流项修正系数。

根据研究河段河道地形及洪水特点, 模拟河段包括交汇前岔巴沟干流与刘家沟、米脂沟两条支流、交汇区心滩以及交汇后的干流。计算区域共包含 4 个开边界: 模型上边界位于岔巴沟上游顺直段, 距交汇口约 1.8km; 支流刘家沟边界距交汇口约 1.3km; 支流米脂沟边界距交汇口约 0.6km; 下边界距离交汇口约 1.3km。为较好模拟交汇区洪水演进情况, 模型采用 $5m \times 5m$ 的正方形网格剖分, 纵向网格数 580 个, 横向网格数为 300 个, 共计网格数 522000 个。

2.2 模型的验证

山区河道交汇问题较为复杂, 难以得到实测水文资料, 为了验证计算方法的可行性与正确性, 本文针对山区交汇河段的洪水演进过程进行了室内模型试验。试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室进行, 利用物理模型采样点的水位流速实测数据, 与相同来流条件的数模计算成果进行对比, 对模型参数予以校验。图 2 和图 3 分别为水位和流速的校验结果。可以看到试验与模拟结果保持较好的一致性, 水位与流速误差在允许范围内。这表明平面二维水动力模型参数设置基本合理, 模拟结果可信。



4 计算结果与分析

根据三川口河段特殊的交汇形态和岔巴沟干流与两条支流的洪水组合效应, 拟定了 3

种模拟工况(表 1)。由于研究河段缺乏实测资料,干流与支流来流均按曹坪站五十年一遇的设计洪峰流量面积比的一次方推求^[7]。通过对比支流有无来流情况下洪水演进的形态变化,讨论山区复杂交汇河段淹没致灾的特点及支流的顶托效应。

表 1 各工况参数

工况编号	岔巴沟干流流量	刘家沟支流流量	米脂沟支流流量
	Q_M (m^3/s)	Q_{T1} (m^3/s)	Q_{T2} (m^3/s)
1	310	0	0
2	310	116	0
3	310	116	78

受干支流两股水流相互顶托的影响,交汇区的水面形态较单一顺直河道更加复杂。从图 4 中可以发现,受支流入汇影响,在远离交汇口的上游段,水面比降较大,靠近交汇口的局部河段水面比降趋于变缓,在两处汇流交界面上出现局部水位抬升,呈中间高两边低的水面形态。这主要因为交汇区水流相互混掺,相互顶托、挤压,交汇口沿上游产生壅水,导致局部水位抬高,比降变缓。此外,受滩槽阻力以及支流水流强度的影响,单支流来流与双支流同时来流对干流水面纵比降的变化发展程度也不同。相对于单支流入汇,双支沟同时来流情况下,水面比降减缓趋势更为明显。

从图 5 岔巴沟深泓线沿程流速分布可以看出,支沟来流导致上游缓坡段流速大大降低,在汇口流速呈现出先减小后增大的特点;仅有刘家沟入汇时,汇口下游段流速相对无支流入汇时明显增加;当双支沟来流时,两支沟入汇口的中间段流速减小,下游段较远区域流速骤降。这主要由于两条支流入汇形式不同,刘家沟与岔巴沟交汇为 30° 的“Y”形交汇,而米脂沟入汇岔巴沟为 90° 的“T”形交汇。入汇角的变化会对入汇口附近及下游较远区域流速分布造成较大的影响。刘家沟入汇对干流的顶托挤压作用相对较弱,更易归顺主流方向,导致下游较远区域流速增强;米脂沟 90° 入汇时,对干流顶托、混掺作用增强,岔巴沟过流面束窄,导致汇口局部流速增大,水流高速区偏向右岸,下游段水流流速减小。

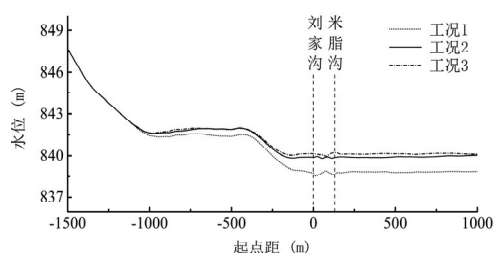


图 4 岔巴沟交汇区河段沿程水面线

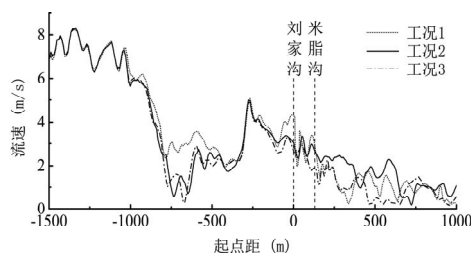


图 5 岔巴沟交汇区河段沿程流速

为进一步探究在洪水条件下研究河段交汇区淹没致灾特点,本文对交汇淹没范围及上下游特征断面横向水位展开研究,相应特征断面布置图见图 1。由图 6 可知,仅岔巴沟来流下,CS1~CS3 断面处的房屋及道路均未受灾,仅在下游的 CS4 处洪水漫过路面约 0.6m;当刘家沟支流入汇时,受灾风险性大大提高,交汇河段水位整体抬升约 1m,原本未成灾的

地区转变为受灾对象，如 CS1 和 CS3 房屋，均受到支流入汇影响而受灾；当双支流来流时，受灾范围进一步扩大，主要影响河段为刘家沟入汇口至下游段。综上，说明干支流交汇是三川口河段淹没致灾的重要因素之一，刘家沟与米脂沟入汇岔沟极大的加剧了河段成灾的严重性。

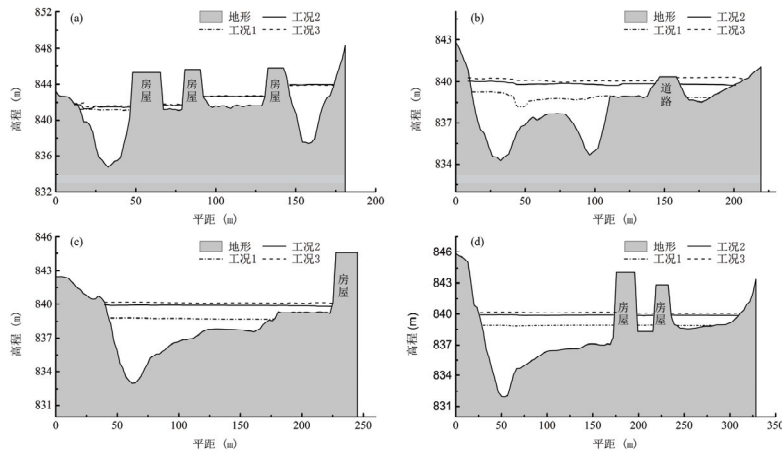


图6 特征断面水位横向分布（横向距离:河道左岸至右岸；(a) CS1 (b) CS2 (c) CS3 (d) CS4

5 小结

三川口河段的水流交汇形式特别，受两条支流的相互顶托作用，交汇区水流特征变化更加复杂，受灾可能性激增。本文基于二维水动力模型对研究河段进行了模拟，分析了交汇区洪水条件下的流速、水面形态以及致灾特点，得出如下结论。

(1) 受两条支流交错影响，三川口交汇区形成局部壅水，水面纵比降明显变缓。流量较大的刘家沟对交汇后的主流起主要作用，双支沟来流情况下水面比降减缓趋势更为明显。

(2) 三川口交汇河段在支沟来流情况下，淹没受灾风险性大大提高，受灾范围进一步扩大。支流入汇打破了原有的水力平衡，交汇区内水流混掺，水流相互顶托产生壅水，河道流速减小，行洪能力大大降低，很大程度上加剧了灾害严重性。

参考文献

- 1 TAYLOR E H. Flow Characteristics at Rectangular Open-Channel Junctions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 109(1): 893-902.
- 2 BEST J L. Flow Dynamics at River Channel Confluences: Implications for Sediment Transport and Bed Morphology Recent Developments in Fluvial Sedimentology[M].Recent Developments in Fluvial

- Sedimentology, 1987: 27-35.
- 3 BIRON P, BEST J L, ROY A G. Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(12): 676-682.
 - 4 张琦, 丁全林, 钱乐乐, 等. 交汇口支流水动力特性数值模拟研究 [J]. 人民长江, 2017, 48(11): 101-106.
 - 5 BARANYA S, OLSEN N, JÓZSA J. Flow analysis of a river confluence with field measurements and RANS model with nested grid approach [J]. River Research and Applications, 2015, 31(1): 28-41.
 - 6 周苏芬, 叶龙, 刘兴年, 等. 嘉陵江与长江交汇水流顶托效应特性研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(S1): 7-11.
 - 7 杨涛, 陈界仁, 周毅, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域水沙侵蚀过程的情景模拟分析 [J]. 中国水土保持科学, 2008, (02): 8-14.

Numerical simulation of flood inundation at confluence zone in Sanchuankou of Chabagou

XU Ze-xing¹, REN Hong-yu², DING Wen-feng², WANG Xie-kang¹

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan University, Chengdu, 610065;
2.Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan
430010, China)

Abstract: The flood characteristics at river confluence are very complicated resulted by flow interactions between main river and tributary river. In this paper, a two-dimensional hydrodynamics model is applied to simulate flood process at river confluence of Sanchuankou in Chabagou. The flood water level, flow velocity and disaster-causing characteristics under the inflow conditions of two tributaries are discussed. Results show that the backwater occurs near the confluence affected by the tributaries. The vertical ratio of water surface decreases slowly, and the rise of water level leads to flooding disaster in the reach. In the case of another tributary downstream inflow, the mixing effect of water flow in the intersection area is increased, and the interaction between two rivers are intensified, which further increases the flood level and expands the backwater range in the confluence area. This study can provide a theoretical basis for flood control and river regulation of the chabagou reach or other similar areas by analyzing the characteristics of flood routing and disaster-causing at river confluence in Sanchuankou of Chabagou.

Key words: Chabagou; River Confluence; Flood Disaster; Numerical Simulation.