

河道束窄段对上游洪水过程特性的影响

董美君¹, 侯精明¹, 王添¹, 马勇勇¹, 张晔¹, 张凡¹, 谭显伦², 杨磊³, 杨祎玲³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安市水务局, 陕西 西安 710007; 3. 西安市水灾害防御管理中心, 陕西 西安 710016)

摘要: 为了研究束窄河段对洪水演进过程特征的影响,采用二维全水动力模型 GAST 模拟了束窄段河道洪水过程,通过理想河道和灞河上游实际河道分析了河道束窄程度与洪水特性间的定量关系。结果表明:束窄断面形状对洪水过程特征中水深、流速影响的大小依次为 V 形 > U 形 > 梯形 > 矩形。断面形状相同时,束窄程度越大对水深和流速影响越大。河道束窄段上游水位壅高,下游水位相对降低但流速更大。扩宽河道束窄段可以降低上游水位及上下游流速差。在“8·19”洪水下,灞河束窄河段束窄程度降低时(原河道束窄程度为 64.4%,河道疏浚后束窄程度分别为 55.6%、46.7%、37.8%),上游最大水深分别减小 0.669、0.985 和 1.066 m,上下游流速差分别减小 0.702、1.592、2.550 m/s。洪量越大则河道水位越高、流速越大,束窄程度变化对水位和流速变化的影响也越大。将“8·19”洪水进行缩放入流情况下,原始河道最大水深分别为 2.177、2.778、3.618 m,束窄程度为 37.8% 时最大水深减小至 1.866、2.367、3.175 m。通过分析不同束窄程度的束窄段河道洪水过程特性,可为束窄段河道防洪提供参考。

关键词: 河道束窄段; 洪水过程; 水力要素; 数值模型; 灞河上游

中图分类号:TV143

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)06-0069-10

Influence of narrow river reach on flood hydraulic characteristics

DONG Meijun¹, HOU Jingming¹, WANG Tian¹, MA Yongyong¹, ZHANG Ye¹, ZHANG Fan¹, TAN Xianlun², YANG Lei³, YANG Yiling³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Water Bureau, Xi'an 710007, China; 3. Xi'an Water Disaster Prevention and Management Center, Xi'an 710016, China)

Abstract: In order to study the influence of narrow river reaches on flood evolution, the two-dimensional all-hydrodynamic model GAST was used for numerical simulation, with which the quantitative relationship between the narrowing of the river reach and the flood hydraulic characteristics of the ideal river and Bahe River was analyzed. The results show that the influence of the narrow section shape on water depth and flow rate in the flood evolution process in decreasing order is: V-shaped, U-shaped, trapezoidal and rectangular. When the shape of the sections are the same, the greater the narrowing of the section, the deeper the influence on water depth and velocity. The water level in the upstream of the narrow reach is higher than that in the downstream, but the velocity is on the opposite, so broadening the narrow reach can reduce the difference of water level and velocity between the upstream and downstream. Under the flood 8·19, the upstream water depth of the three working conditions (original narrowing degree is 64.4%, after dredging the narrowing degree of the three working conditions become 55.6%, 46.7% and 37.8%) can be reduced to 0.669, 0.985 and 1.066 m, and the flow velocity difference can be reduced by 0.702, 1.592 and 2.550 m/s. When the flood volume increases, the water level and flow velocity of the river increase, so does the influence of narrow reach width change on water level and velocity. Under

收稿日期:2022-12-19; 修回日期:2023-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52009104、52079106); 中德合作交流项目(M-0427); 陕西省科技创新团队项目(2020TD-023)

作者简介:董美君(1999—),女,四川绵阳人,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者:侯精明(1982—),男,河北怀安人,博士,教授,博士生导师,研究方向为河流动力学。

the three inflow conditions, the maximum water depth of the original reach is 2.177, 2.778 and 3.618 m, and the maximum water depth is reduced to 1.866, 2.367 and 3.175 m after increasing the narrowing degree to 37.8%. The analysis of hydraulic characteristics of the narrow river reach with different narrowing degrees can provide a reference for the flood control of narrow river reaches.

Key words: narrow reach; flood evolution; hydraulic characteristic; numerical model; the upstream of Bahe River

1 研究背景

山区河流一般河床下切较深、岸坡陡峻、河身狭窄,且平面形态复杂、迂回曲折、极不规则,因而暴雨后往往发生洪水陡涨。山区河流由于分布范围广泛、地形成因多样、山洪致灾风险高等特征一直是研究热点^[1-4]。河流受地形、洪水或人为因素影响会形成河道束窄段,而束窄的河道断面处往往成为跨河桥梁的修建地址,造成河道进一步束窄,愈发降低了卡口处的行洪能力^[5-7]。对于河道束窄段行洪特点,国内学者已经做了多方面研究。韩剑桥等^[8]针对渭河咸阳段卡口河段的桥梁建设对河道行洪能力的影响进行了研究,提出卡口河段建设桥梁河道宜有适当的疏浚措施;姚高岭等^[9]就伊洛河黑石关卡口的处理方案进行了防洪影响分析,建议进行河道卡口扩宽以消除防洪安全隐患;胡朝阳等^[10]研究了乌龙江峡兜卡口的阻力特性以及壅水效应与流量的关系,计算了不同洪水重现期下卡口壅水高度和影响范围;邓明文等^[11]通过河工模型试验探讨了典型卡口河段的平面形态、水流特性与河床演变规律;施雅风等^[12]通过历史水文数据研究了武汉市九江河段中游卡口的阻水效应,并提出扩卡增泄可以减轻中游防洪压力。以上研究从不同角度结合工程应用对河道束窄卡口进行了研究,但未从卡口河道对洪水演进过程特征如水位、流速、水深等的影响进行规律分析。本文以灞河上游某束窄河段为研究对象,采用二维全水动力模型模拟河道不同束窄条件下束窄段附近的水力要素变化,根据模拟结果提出不同束窄程度河段上下游的防洪措施。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

灞河发源于秦岭北坡蓝田县灞源镇麻家坡以北,是黄河支流渭河的一级支流,全长 107 km,流域面积为 2 564 km²。研究选取蓝田县境内灞源镇与九间房镇之间的灞河上游段作为研究对象,该河段具有河床比降大、洪水期水流湍急、河床左右摆动、河道弯曲多等特点。蓝田县域内水系分布及研究选

取的灞河束窄河道位置如图 1 所示。2021 年 8 月 19 日,陕西省西安市蓝田县遭遇暴雨侵袭,此次暴雨降雨量大、历时短、范围集中,雨量超过 100 年一遇,当地部分房屋、道路被雨洪冲毁,群众被困,此次洪水为该区域罕见特大自然灾害^[13]。通过走访调研发现,所研究河段上通有 G40 国道高速公路,高架桥建桥处河道束窄,岸坡与桥下冲刷严重、洪痕水位高^[14]。

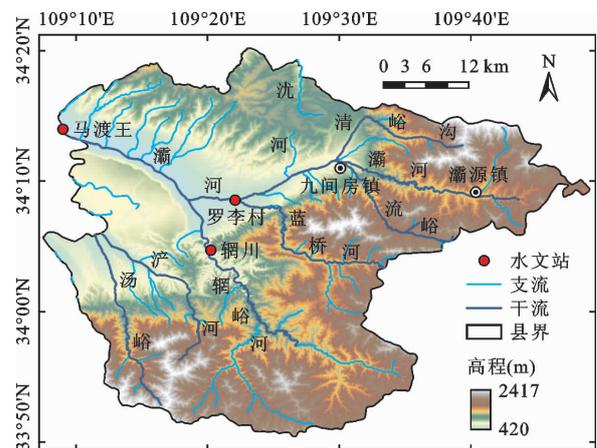


图 1 蓝田县水系分布及研究区灞河河段位置

2.2 数据来源

研究区实际地形数据来源于高分三号卫星,该卫星是我国首颗高分辨率雷达卫星,于 2016 年 8 月发射^[15],具有多种成像模型,可以满足气象、水利、农业、环保等部门的应用需求。利用高分三号提取灞源镇至九间房镇的影像信息,使用遥感图像处理平台 ENVI(the environment for visualizing images)进行影像处理^[16],提取出地形分辨率为 5 m 的数字高程模型(digital elevation model, DEM)。由于 DEM 分辨率对洪水模拟有重要影响^[17],利用 ArcGIS 裁剪出所需河道 DEM 后使用克里金(Kriging)插值法^[18]对高程插值,使局部河道地形 DEM 精度达到 1 m;理想地形通过编程生成河道坐标与高程,精度为 1 m。研究区 2021 年 8 月 19 日发生过暴雨洪水过程(以下简称“8·19”洪水),洪水水位通过实地走访调研以及测量洪痕所得。入流流量为罗李村水文站站实测资料移用,由于罗李村水文站与调研地所在万军回村地理

位置相近且属于同一片流域,产汇流特性相似,因而使用水文比拟法^[19]移用灞河中下游罗李村实测“8·19”流量过程,以此作为入流流量。

2.3 数值模型

本文采用基于显卡 (graphics processing unit, GPU) 加速的地表水及其伴随输移过程模型 (GPU accelerated surface water flow and transport model, GAST) 作为洪水演进模型^[20]。模型中模拟洪水演进过程的方程为二维浅水方程 (shallow water equations, SWEs), 该方程仅考虑具有自由液面的水流, 并且只研究水平方向运动而忽略垂向运动, 忽略紊流黏性项、运动黏性项、科氏力和风应力。二维非线性浅水方程守恒格式用以下矢量式表达^[21-23]:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x - S_{fx} \\ -gh\partial z_b/\partial y - S_{fy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{q} 为变量矢量; \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 分别为 x 、 y 方向上的通量矢量; \mathbf{S} 为源项矢量, 包括净雨源项、摩阻力源项 S_f 及底坡源项; h 为水深, m; q_x 和 q_y 分别为 x 和 y 方向上的单宽流量, m^2/d ; t 为时间, s; i 为净雨强度, mm/h ; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速, m/s ; z_b 为河底高程, m。

摩阻源项 S_f 在 x 、 y 方向上的表达式为:

$$\begin{cases} S_{fx} = gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \\ S_{fy} = gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \end{cases} \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; n 为曼宁系数, $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ 。

模型应用动力波方法来进行洪水演进过程的模拟计算, 即采用 Godunov 格式的有限体积法数值求解控制方程^[24]。选用二阶 MUSCL (monotone upstream scheme for conservation law) 方法对变量值进行空间插值来提高计算精度。在控制单元内, 界面上的物质与动量通量通过 HLLC (Harten - Lax - van Leer contact)

近似黎曼求解器计算。为了适应任意复杂非结构化网格, 底坡源项采用底坡通量法处理, 即将一个计算单元中的坡面源项转换为位于该单元边界上的通量, 该方法能与界面通量很好地协调, 便于达到全稳条件。计算过程使用 GPU 提升计算速度^[25-26]。

2.4 模型验证

通过模拟水深与洪痕水深对比验证模型精度, 灞河上游河段长度约为 19.55 km, 河道纵比降为 1.94%, 研究区河道 DEM 如图 2 所示。进行模型验证的河道断面位于河段中游万军回村高速路下, 其 DEM 见图 2(a); 本研究模拟计算所选取的束窄河段位于灞源镇, 其 DEM 见图 2(b)。

罗李村水文站控制流域面积为 658.2 km^2 , 入流口断面控制上游流域面积为 217.0 km^2 , 移用后流量过程以及模拟的验证断面水深变化如图 3 所示。据洪水调研过程中现场洪痕测量结果, “8·19”洪水发生时水位在高架桥梁支座下部结构顶部以上约 0.5 m 位置, 水深为 3.0~3.5 m。根据天然河道糙率确定方法^[27], 曼宁值为 0.025。模型模拟的验证断面最大水深为 3.31 m, 与洪痕吻合, 由此可见 GAST 模型模拟精度良好, 可以作为灞河上游河道洪水演进模拟的工具。

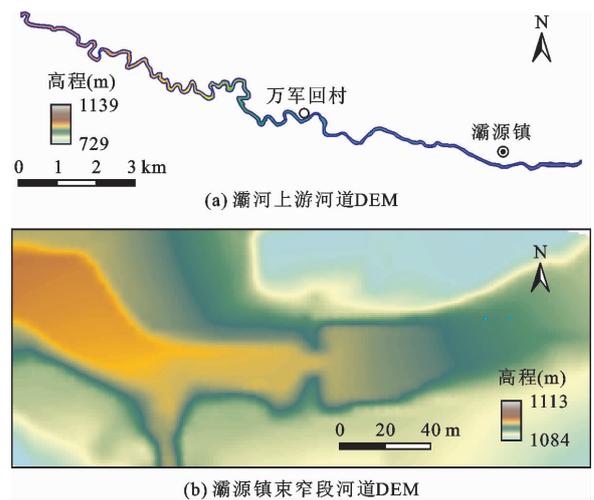


图 2 研究区河道 DEM

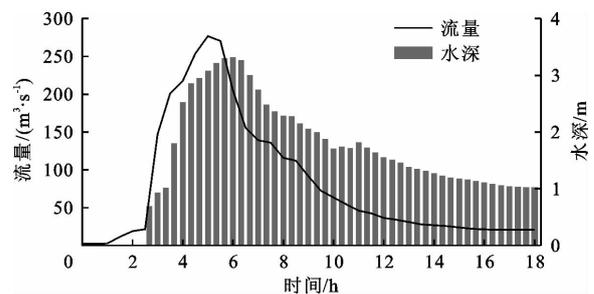


图 3 模型验证流量过程以及模拟的验证断面水深变化

2.5 模型设置

2.5.1 理想河道设置 设置一段长度 2 km 的河道,纵比降为 5‰,上游 1 km 为深 10 m、宽 100 m 的矩形河道,下游束窄段长度为 1 km,河道原始宽度为 100 m,下游河道设置 4 种断面形状,分别为 V 形、U 形、梯形和矩形。在此基础上将下游河道宽度分别束窄 0%、20%、35%、50%、70%,共 20 种组合

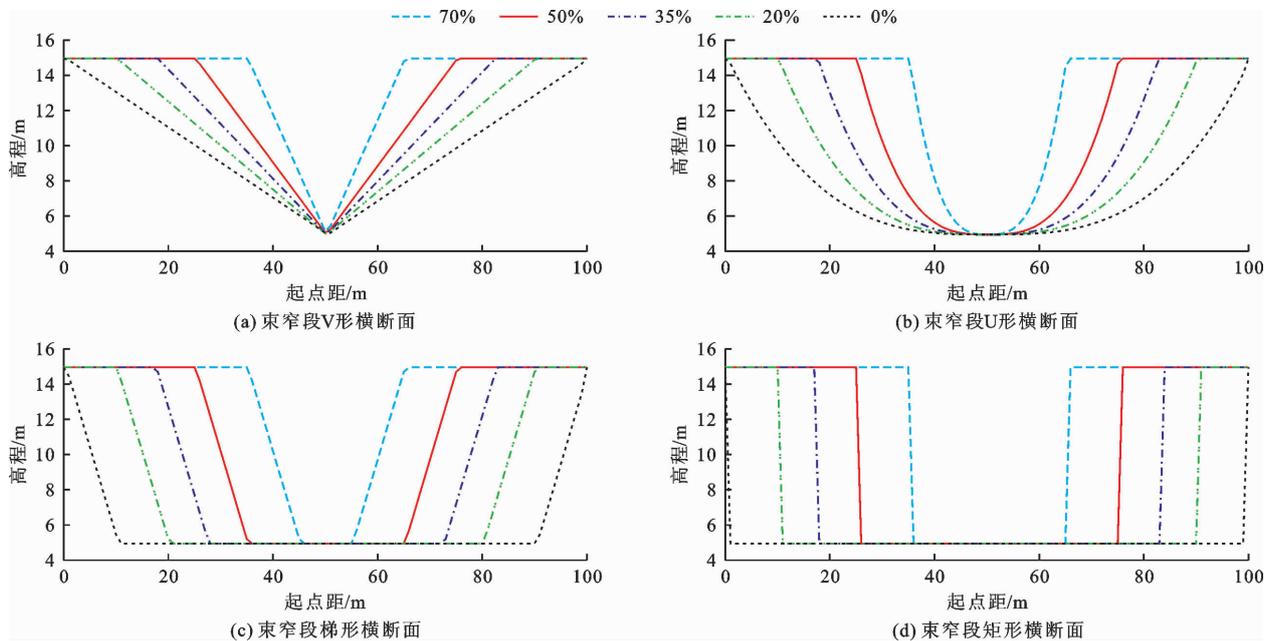


图4 理想河道束窄段4种形状横断面不同束窄程度示意图

2.5.2 研究区河道设置 研究区河道为天然束窄的河段,原始河道束窄段为 U 形断面,宽度为 16 m,相对于上游断面束窄 64.4%,利用 GIS 空间分析工具进行束窄段河道地形处理,将束窄河道分别拓宽为 20、24 和 28 m 依次作为工况 1、2、3,相对于上游断面分别束窄了 55.6%、46.7%、37.8%。束窄段河道不同拓宽程度横断面如图 5 所示。恒定流入流量设为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,非恒定流采用罗李村实测“8·19”洪水流量水文比拟法移用的实际入流,以及将“8·19”实际洪水流量过程分别整体缩小 50%、放大 200% 后所得洪水作为模拟的输入数据。“8·19”入流过程洪峰流量为 $276.815 \text{ m}^3/\text{s}$,缩放后洪峰流量分别为 138.408 、 $553.630 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 结果与分析

3.1 理想河道恒定流洪水演进

3.1.1 河道沿程水面线变化 在束窄河道断面上、下游各 0.5 m 处以及 100 m 范围内每间隔 10 m 取计算断面。理想河道束窄段不同形状横断面和束窄程度时,上下游沿程水面线变化见图 6,束窄断面上

模拟工况。将束窄 0% (无束窄) 作为相同断面形状下水位流量变化程度的参照,各不同形状束窄段横断面如图 4 所示。河道糙率统一设为 0.025,入流流量为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟时长为 2 h,每间隔 60 s 输出数据。使用理想地形进行模拟可以控制非必要变量,更直观地反映束窄程度影响下束窄段河道的洪水演进过程特征变化规律。

游最大水深及上下游水深差见图 7。

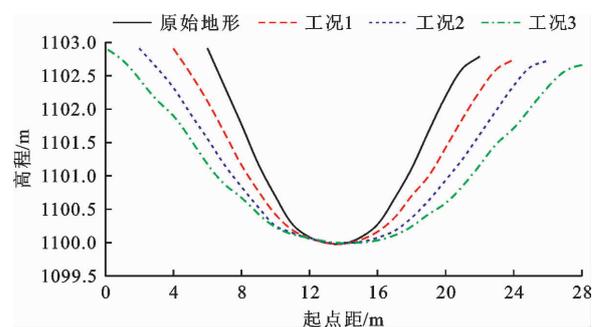


图5 研究区天然河道束窄段不同拓宽程度横断面

由图 6 可以看出,理想河道束窄段上游水位壅高程度大,而下游水位变幅小,影响范围均超过 100 m;只改变下游断面形状而不束窄河道宽度时,断面形状改变处河道纵向水面线变化幅度大小排序为 V 形 > U 形 > 梯形 > 矩形,其中, V 形断面变幅为 2.023 m, U 形和梯形断面变幅分别为 0.775 和 0.171 m,矩形断面变幅为 0,即水面无落差。模拟结果表明,束窄段下游水位降低到一定程度后会逐渐抬升直至达到相对稳定。

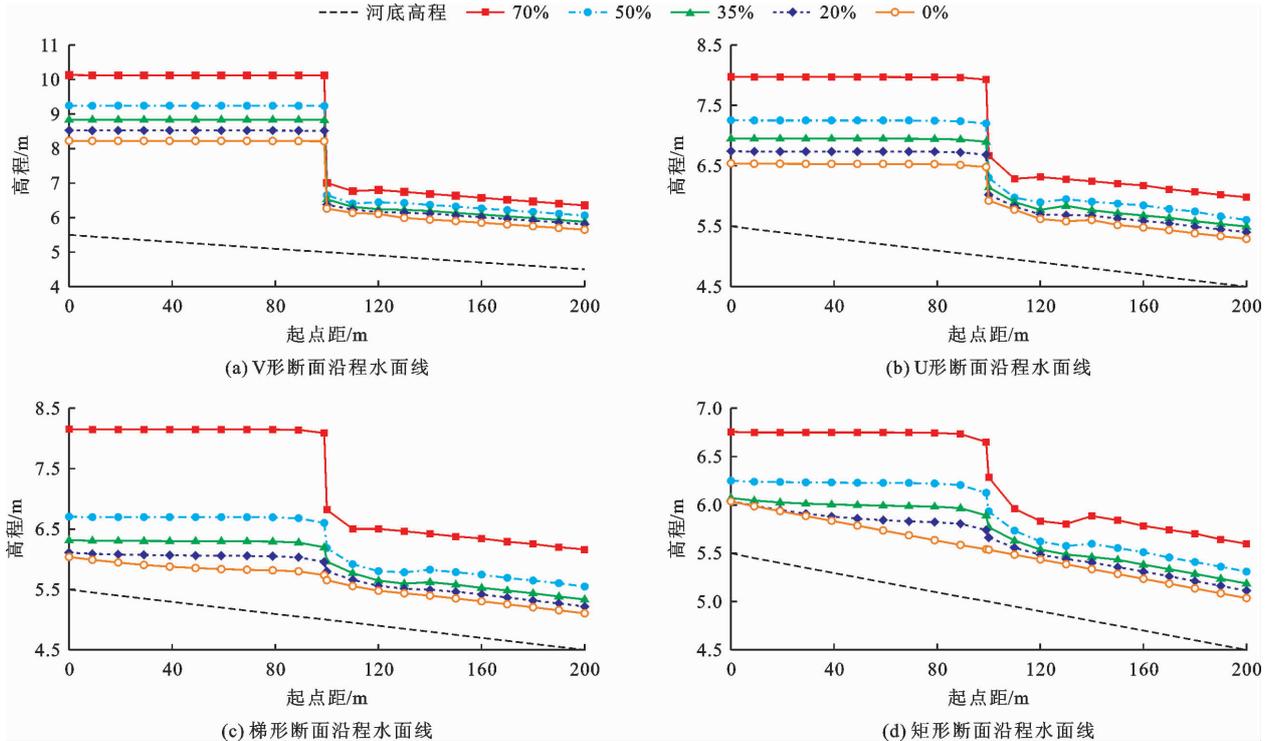


图 6 理想河道束窄段不同形状横断面和束窄程度时上下游沿程水面线变化

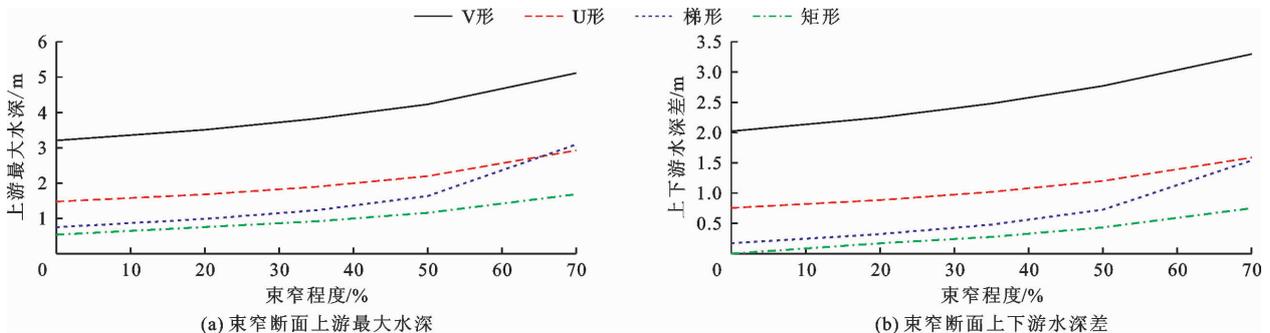


图 7 理想河道束窄段不同形状横断面和束窄程度时上游最大水深及上下游水深差

分析图 7 可知,下游河道束窄横断面形状相同时,束窄程度越大则河道水深变化幅度越大,且上游水深变化明显大于下游,上游断面水深及束窄处上下游水深差随着束窄程度的增大而增大;下游河道从束窄 0% 增大至束窄 70% 时,束窄处上游水深变幅及上下游水深差变幅大小排序为梯形 > V 形 > U 形 > 矩形,相应上游水深变幅分别为 2.343、1.908、1.449、1.147 m,上下游水深差变幅分别为 1.368、1.275、0.833、0.750 m。

3.1.2 河道沿程流速变化 理想河道束窄段横断面形状和束窄程度不同时,上下游沿程流速变化见图 8,束窄断面下游最大流速及上下游流速差见图 9。

由图 8、9 可以看出,理想河道沿程流速变化规律与水位变化相反,束窄处上游断面平均流速降低,下游断面流速先升高后降低,流速在束窄断面下游

10 ~ 20 m 范围内达到最大。当河道束窄程度不变仅改变束窄段断面形状时,上下游流速差最大的为 V 形断面,其平均流速差为 3.514 m/s(流速差范围为 0.322 ~ 3.841 m/s),其次为 U 形、梯形断面,平均流速差分别为 2.310 m/s(流速差范围为 0.721 ~ 3.031 m/s)、0.798 m/s(流速差范围为 1.348 ~ 2.146 m/s),矩形断面为顺直河道故流速不变,上下游流速均为 1.866 m/s。当束窄段断面形状相同仅改变束窄程度时,上游最小流速随束窄程度的增大而减小,下游最大流速随束窄程度的增大而增大。下游河道从束窄 0% 增大至束窄 70% 时,上下游流速差变幅大小排序为梯形 > 矩形 > U 形 > V 形,分别为 3.459、2.948、1.733、1.085 m/s。

3.2 研究区实际河道恒定流洪水演进

取研究区实际河道长度约 123 m,其中上游长

度 103 m、下游长度 20 m。在束窄段上下游每间隔约 5 m 设置 1 个计算断面,总共取 23 个计算断面。上游恒定入流下断面水力要素稳定时刻各工况沿程水面线及流速变化如图 10 所示;河道束窄段不同拓

宽工况下,束窄段上下游 11# ~ 23# 计算断面(束窄断面编号为 19#)相对于原始河道的水位变化见图 11(a),束窄段上下游水力要素随束窄程度的变化见图 11(b)。

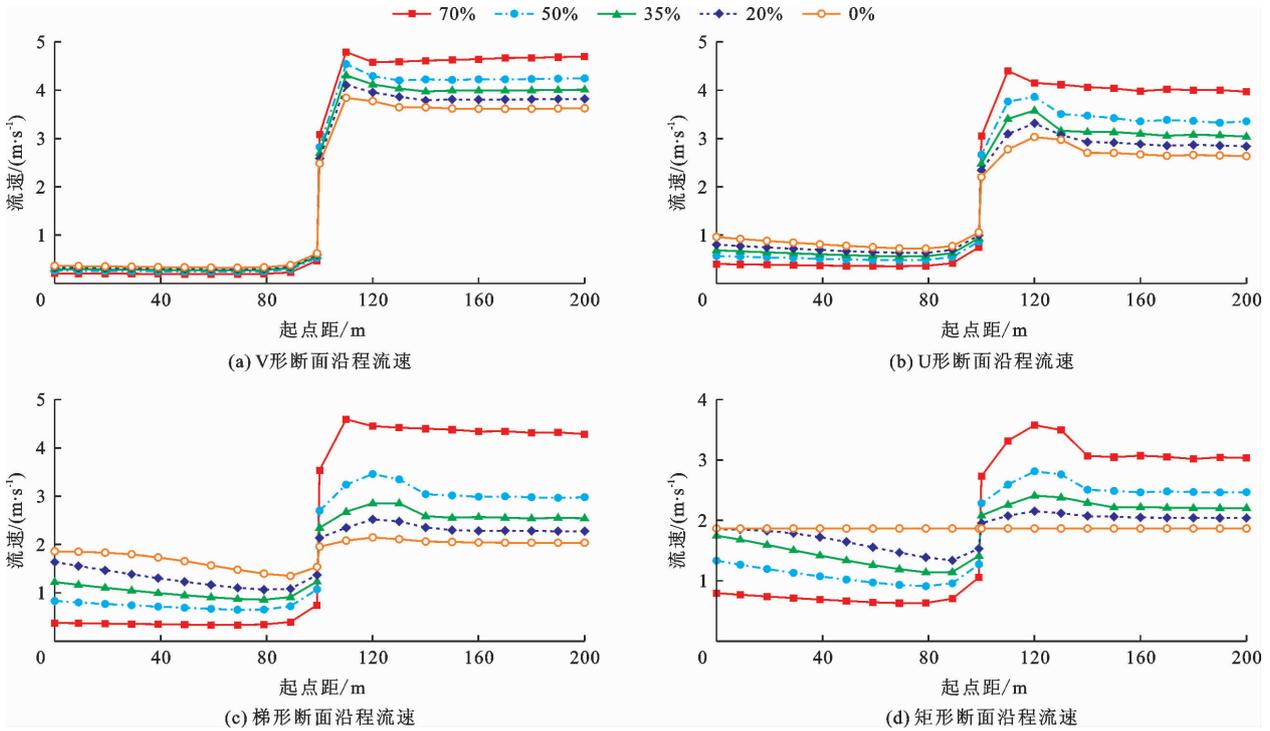


图 8 理想河道束窄段不同形状横断面和束窄程度时上下游沿程流速变化

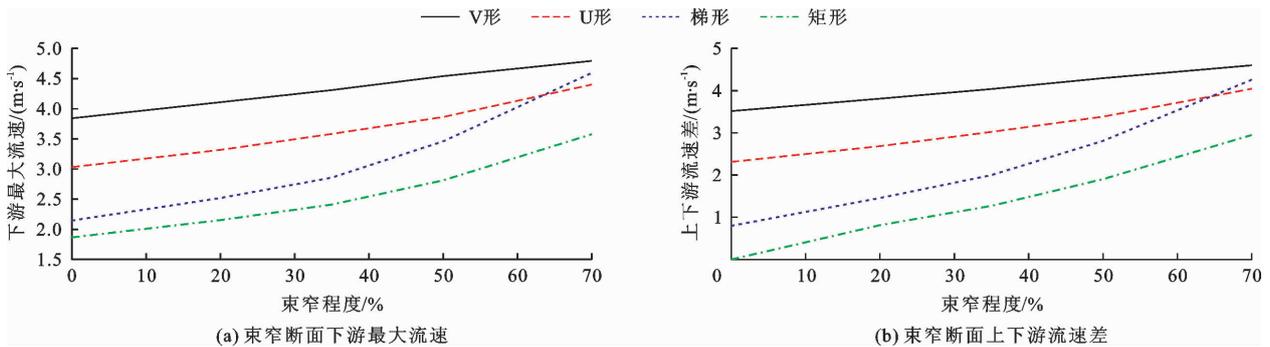


图 9 理想河道束窄段不同形状横断面和束窄程度时下游最大流速及上下游流速差

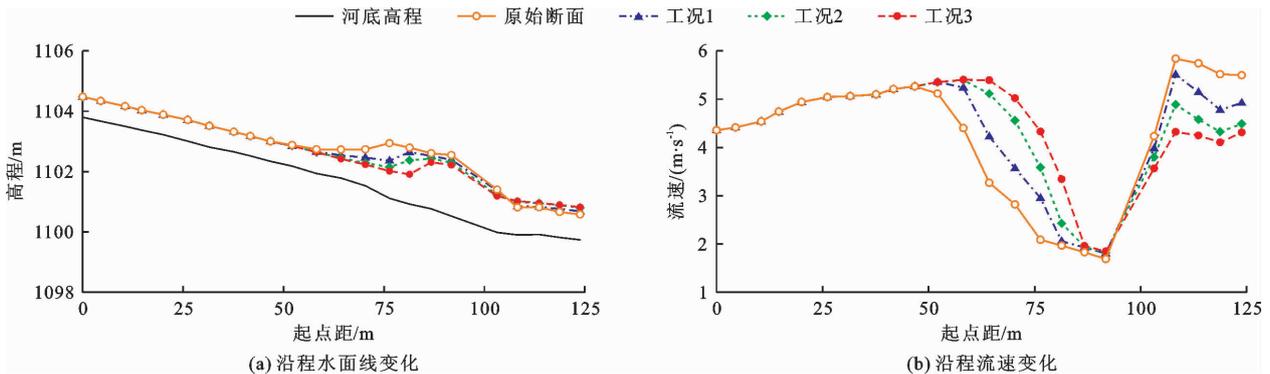


图 10 研究区实际河道恒定流各工况沿程水面线及断面流速变化

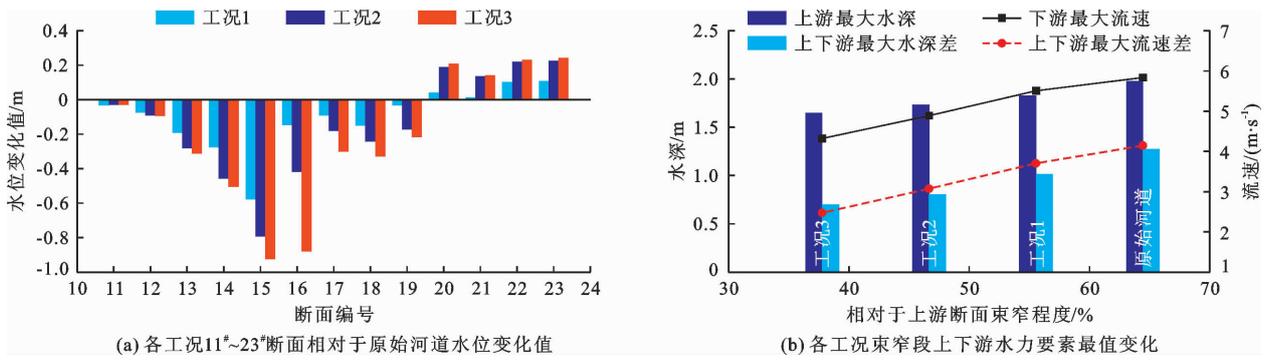


图 11 研究区实际河道恒定流各工况束窄段上下游水力要素变化

由图 10 可知,在 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 恒定流量入流条件下,束窄断面及其上游水位壅高,下游水位降低,束窄断面宽度变化对上游水面线的影响范围大约为 50 m ,水位壅高值在束窄断面上游 10 m 处达到最大。恒定流稳定流速与水深变化趋势相反,影响范围同样约为 50 m ,最大流速位于束窄断面下游 5 m 处,束窄段拓宽后其上游最小流速增大,下游最大流速降低,流速差减小。

由图 11(a)可知,河道拓宽后,束窄段上游水深均有所减小,拓宽程度越大则水深减小幅度越大。3 种工况均为束窄段上游 25 m 处(15#断面)的水深减小幅度最大,该断面工况 1、2、3 水深减幅分别为 0.576 、 0.791 和 0.924 m ,相应束窄断面(19#断面)水深分别减小了 0.032 、 0.172 和 0.216 m 。由图

11(b)可知,上游最大水深、下游最大流速以及上下游最大水深差、流速差均随河道束窄程度的增大而增大。原始河道(束窄 64.4%)下游最大流速为 5.836 m/s ;工况 3(束窄 37.8%)下游最大流速为 4.323 m/s ,因河道拓宽最大流速差也从原始河道的 4.148 m/s 减小为工况 3 的 2.476 m/s 。

3.3 实际河道非恒定流洪水演进

3.3.1 “8·19”洪水河道束窄段水面线及流速变化 在“8·19”洪水入流过程中,峰值时刻各工况沿程水面线与断面平均流速变化如图 12 所示;河道束窄段不同拓宽工况下,束窄段上下游 $10\# \sim 23\#$ 计算断面(束窄断面编号为 $19\#$)相对于原始河道的水位变化见图 13(a),束窄段上下游水力要素随束窄程度的变化见图 13(b)。

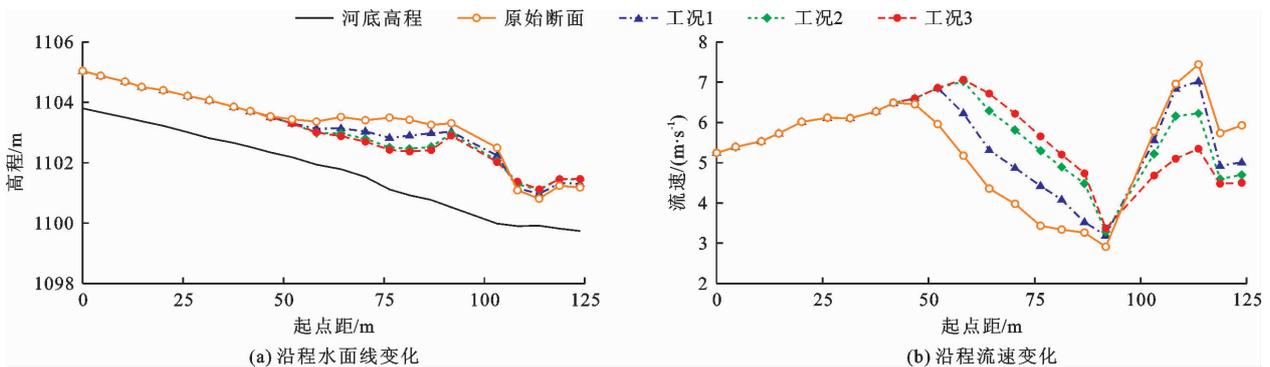


图 12 研究区实际河道“8·19”洪水峰值时刻各工况沿程水面线及断面流速变化

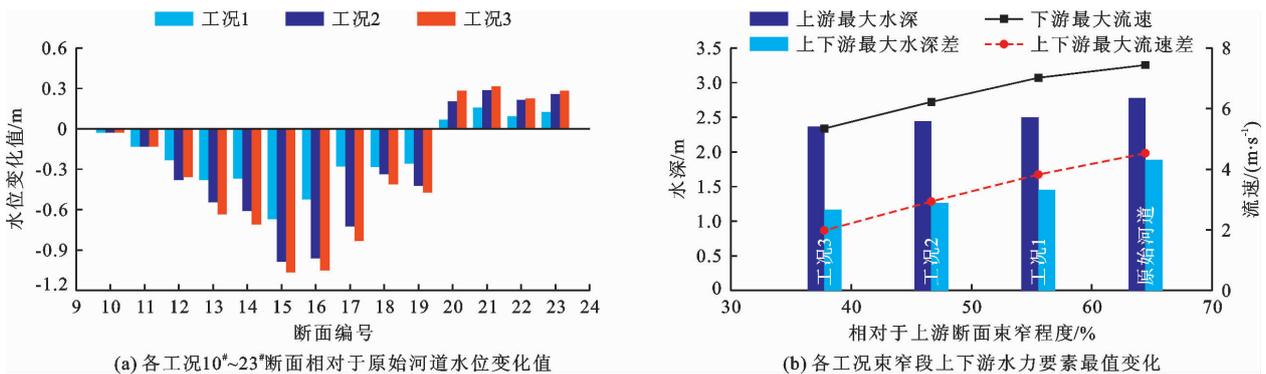


图 13 研究区实际河道“8·19”洪水峰值时刻各工况束窄段上下游水力要素变化

由图12可知,“8·19”实际洪水流量下,束窄段上下游水深变化规律与恒定入流相同,束窄河道宽度变化对上游水面线与流速的影响范围约为55 m,水位壅高值在束窄断面上游10 m处达到最大。峰值流速与水深变化趋势相反,最大流速位于束窄断面下游10 m处。束窄段拓宽后其上游最小流速增大,下游最大流速降低,流速差减小。

由图13(a)可知,随束窄程度的变化,最大水深、流速及其差值的变化规律与恒定流相同。在束窄断面上游25 m处(15#断面)的水深减小幅度最大,3种工况水深减幅分别为0.669、0.985和1.066 m,相应束窄断面(19#断面)水深分别减小了0.258、0.422和0.471 m,下游水深变化相对较小。可见束窄段河道拓宽对上游水深变化有较大的影响,为了减轻束窄段上游防洪压力可以拓宽束窄段处河道。由图13(b)

可知,原始河道(束窄64.4%)下游最大流速为7.441 m/s;工况3(束窄37.8%)下游最大流速为5.346 m/s。束窄断面上下游最大流速差也随着束窄河道的拓宽而减小,原始河道及3种工况的上下游最大流速差分别为4.529、3.827、2.937、1.979 m/s,与原始河道相比,拓宽后3种工况的上下游最大流速差分别减小了0.702、1.592、2.550 m/s。

3.3.2 不同洪水量级河道束窄段水位及流速变化

将“8·19”洪水过程进行缩放后得到新的洪水过程,设定缩小50%的洪水流量过程为 Q_1 ，“8·19”实际洪水流量过程为 Q_2 ,放大200%的洪水流量过程设为 Q_3 。河道束窄段不同拓宽工况下,各量级洪水峰值时刻沿程水面线及流速变化如图14所示;各量级洪水过程束窄段上下游水力要素随束窄程度的变化见图15。

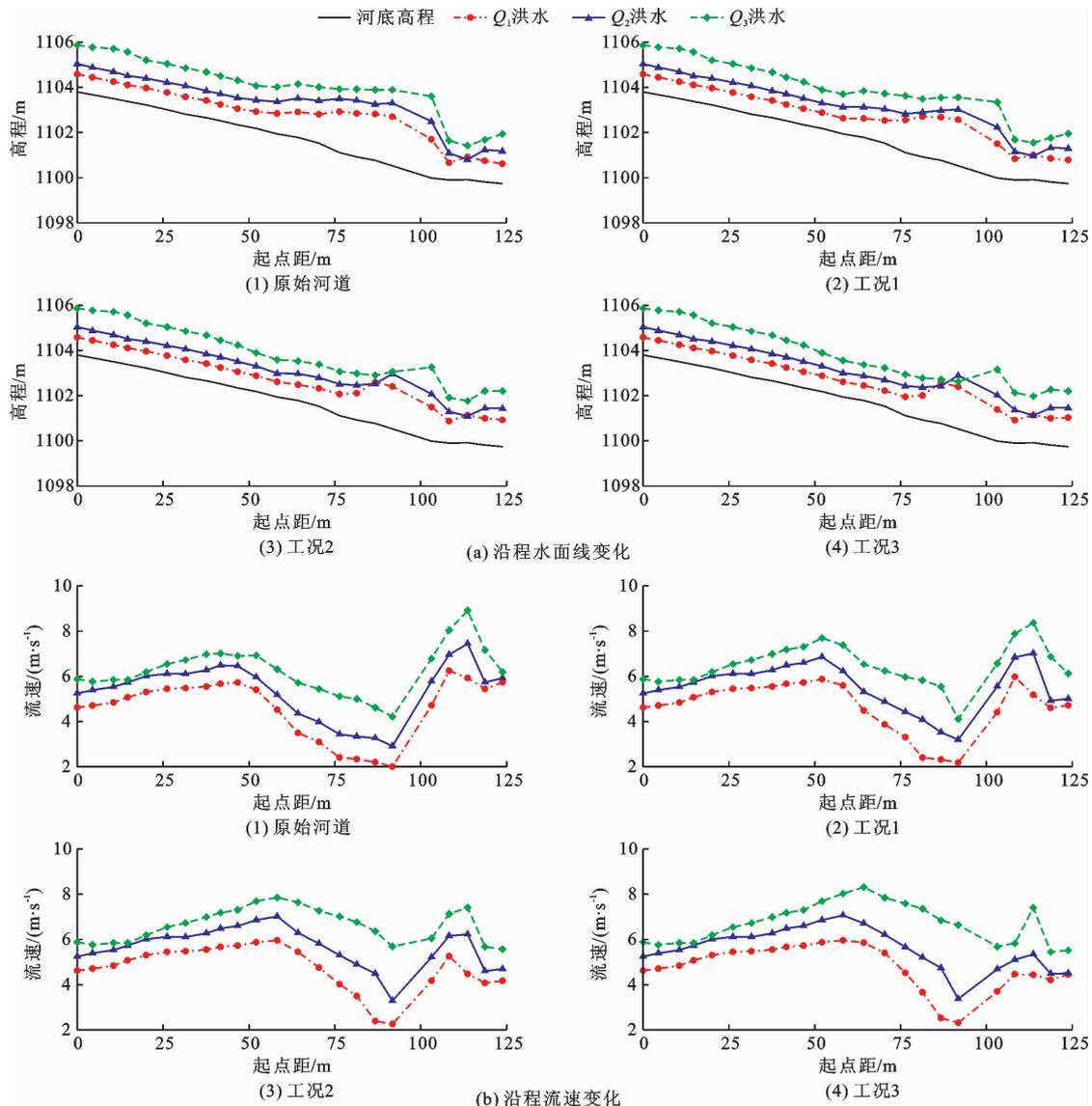


图14 研究区实际河道不同工况各量级洪水峰值时刻沿程水面线及流速变化

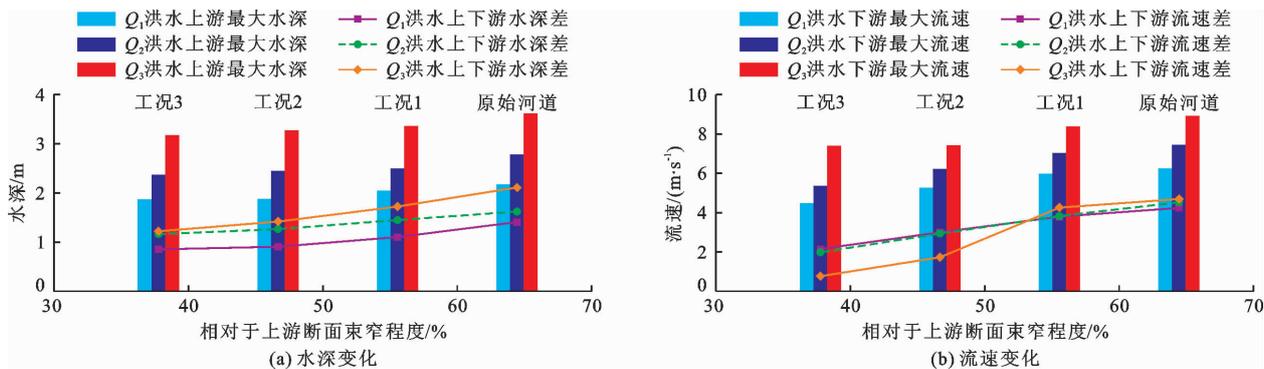


图 15 研究区实际河道不同工况各量级洪水过程束窄段上下游水力要素变化

由图 14 可知,束窄段上下游水深变化规律与“8·19”洪水相同,即上游水位壅高、下游水位降低,且洪量越大则水位越高、断面流速越大。 Q_1 、 Q_2 洪水水位最大壅高断面位于束窄断面上游 10 m 处, Q_3 洪水水位最大壅高断面位于束窄断面处,表明洪量增大时越靠近束窄段壅水越高。 Q_1 洪水最大流速断面位于束窄断面下游 5 m 处, Q_2 、 Q_3 洪水最大流速断面位于束窄断面下游 10 m 处,表明洪量较小时越靠近束窄段流速越大。

由图 15 可知,束窄程度越小,则各级洪水上游最大水深越小,上下游水深差值也越小;束窄程度相同时,入流流量越大则上游最大壅水水深越大,上下游水深差也越大。3 种洪水量级情况下,原始河道上游最大水深分别为 2.177、2.778、3.618 m,束窄段拓宽至工况 3 时,上游最大水深分别为 1.866、2.367、3.175 m。随着束窄程度的增大、洪水量级的增加,束窄段下游最大流速逐渐增大,3 种洪水量级情况下,原始河道下游最大流速分别为 6.248、7.441、8.910 m/s,束窄段拓宽至工况 3 时,下游最大流速分别为 4.463、5.346、7.450 m/s。束窄程度小于 50% 时,洪量越大则上下游流速差越小;束窄程度大于 50% 时,洪量越大则上下游流速差越大,且洪量越大,束窄程度越大则流速差变化范围越大,如 Q_3 洪水束窄段上下游流速差从原始河道的 4.691 m/s 减小为工况 3 的 0.765 m/s。

4 讨论

本研究为探究河道束窄对洪水过程特征的影响,将二维全水动力模型 GAST 作为洪水演进的模拟工具,首先设置了理想河道进行模拟,再选取灞河上游某段典型束窄河道作为研究实例,得出了河道束窄段上下游水深、流速等水力要素的变化规律。从模型率定后的模拟结果来看,河道束窄段对河道行洪有阻碍作用,且束窄程度越大,则上游水位壅高值也越大,与

韩剑桥等^[8]通过平面二维水流数学模型模拟研究揭示的卡口河段对河道行洪影响规律基本一致;流速与断面水深变化相反,束窄段上游流速小,而在下游束窄断面附近出现流速最大值,该规律与闫旭峰等^[1]研究宽窄相间河段输水能力变化所得出的结论一致。此外,本研究发现河道束窄程度越大、洪水量级越大,上述水深与流速变化规律越明显。

根据河道束窄段对上下游水深及流速的影响规律,对束窄段及其上游河道应当重点关注束窄引起的水位壅高,解决洪水淹没问题;对束窄段下游应关注因河段流速突增而可能造成的河道冲刷问题。拓宽束窄段河道可以有效减小上游壅水程度,降低上下游水深差和流速差,因而应结合实际需求制定河道束窄段的疏浚方案。

5 结论

(1)理想河道只改变过水断面形状时,不同形状断面对洪水演进影响程度大小的排序为 V 形 > U 形 > 梯形 > 矩形,束窄段上游水位明显壅高,束窄段下游水位变化较小,4 种形状断面上下游水深变幅分别为 2.023、0.775、0.171、0 m。断面形状相同仅改变束窄程度时,束窄程度越大对水深和流速的影响越大。束窄处上游水深变幅及上下游水深差变幅大小排序为梯形 > V 形 > U 形 > 矩形,下游河道从无束窄至束窄 70% 相应的上下游水深差变幅分别为 1.368、1.275、0.833、0.750 m,上游水深变幅分别为 2.343、1.908、1.449、1.147 m;随束窄程度的改变,上下游流速差变幅大小排序为梯形 > 矩形 > U 形 > V 形,分别为 3.459、2.948、1.733、1.085 m/s。

(2)所选灞河束窄河段为 U 形断面,其水深和流速变化趋势与理想河道相同,束窄河道上游水位壅高,下游水深明显减小且流速更大。束窄段拓宽后,对上游水深影响较大,在“8·19”洪水下,拓宽后束窄程度为 55.6%、46.7%、37.8% 3 种工况时,

相应上游最大水深分别减小了 0.669、0.985 和 1.066 m,束窄断面水深分别减小了 0.258、0.422 和 0.471 m。束窄段拓宽后上下游流速差也会减小,原始河道及 3 种工况的上下游最大流速差分别为 4.529、3.827、2.937、1.979 m/s。

(3)河道束窄段在同一束窄程度下,洪水量级越大,则河道水位越高、流速越大,上游最大壅水水深与上下游水深差也越大;拓宽束窄段河道后,洪水量级越大,则束窄段上游最大水深变化幅度越大,束窄段下游最大流速也随之而增大,但上下游流速差在束窄程度较小时随洪水量级增加而减小,在束窄程度较大时随洪水量级增加而增大。

参考文献:

- [1] 闫旭峰,姚致东,徐辉,等.山区宽窄相间河段输水能力变化规律[J].工程科学与技术,2022,54(6):43-50.
- [2] 张利国,程金香,骆文广,等.山区河流河床形态对推移质输沙率影响的试验研究[J].水利水运工程学报,2021(6):60-67.
- [3] 张利国,傅旭东,郭大卫,等.山区卵砾石河流的阻力[J].水利学报,2013,44(6):680-686.
- [4] FERRO V, PECORARO R. Incomplete self-similarity and flow velocity in gravel bed channels[J]. Water Resources Research, 2000, 36(9): 2761-2769.
- [5] 张小峰,陈珺,谈广鸣,等.修建辛安渡大桥对河道防洪影响的数值模拟[J].武汉大学学报(工学版),2007,40(6):11-15.
- [6] 谭英,胡宇丰,黄国如.广州南沙凤凰一桥建设对河道防洪影响分析[J].水电能源科学,2011,29(11):47-50.
- [7] 马进荣,李宗骏.铁路跨河桥梁工程防洪评价常见问题探讨[J].水利水运工程学报,2015(6):76-81.
- [8] 韩剑桥,段文中.卡口段河段桥梁建设对河道行洪的影响——以渭河咸阳段为例[J].水土保持研究,2017,24(6):388-391.
- [9] 姚高岭,瓮宛,李胜兵,等.伊洛河黑石关卡口河段的防洪影响及处理[J].河南水利与南水北调,2014(8):23-24.
- [10] 胡朝阳,王新强,梁越.乌龙江峡兜卡口阻力特性及壅水效应分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):154-160.
- [11] 邓明文,董玉文,胡江,等.卡口河道河床演变规律初探——以澜沧江曼厅河段为例[J].重庆交通学院学报,2004,23(1):100-102+105.
- [12] 施雅风,张强,姜彤,等.长江中游武汉-九江河段河道卡口及其阻洪可能效应探讨[J].地球科学进展,2004,19(4):500-505.
- [13] 曹保前.蓝田县灞河“2021·8·19”暴雨洪水分析[J].陕西水利,2022(11):77-78+83.
- [14] 孙治平,赵志宏,刘子金,等.基于 MIKE21 的跨河桥梁壅水数值模拟分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(6):129-136.
- [15] 耿勇胜,洪中华,童小华,等.高分三号顺轨影像快速匹配并行计算方法[J].地理与地理信息科学,2022,38(4):29-33.
- [16] 李廷,郭永刚. ENVI 遥感影像制作解译及分析——以林芝县为例[J].西藏科技,2020(1):34-36+40.
- [17] 刘天雪,王瑛,陈笑娟,等. DEM 分辨率对山洪淹没模拟影响[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):156-163.
- [18] 李俊晓,李朝奎,殷智慧.基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J].测绘通报,2013(9):87-90+97.
- [19] 罗天翔,谷秀英,王海红.浑河沈阳站 1995 年溃堤洪水的水文比拟还原法[J].水文,2003,23(6):31-34.
- [20] SIMONS F, BUSSE T, HOU Jingming, et al. A model for overland flow and associated processes within the Hydroinformatics Modelling System[J]. Journal of Hydroinformatics, 2014, 16(2): 375-391.
- [21] 侯精明,李桂伊,李国栋,等.高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J].水力发电学报,2018,37(2):96-107.
- [22] 房克照,尹晶,孙家文,等.基于二维浅水方程的滑坡体兴波数值模型[J].水科学进展,2017,28(1):96-105.
- [23] HOU Jingming, LIANG Qihua, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains[J]. Computers & Fluids, 2013, 82: 132-147.
- [24] 莫铁祥,李国栋,杨振东,等.基于 TVD 框架的 Godunov 格式水锤求解模型[J].水动力学研究与进展 A 辑,2022,37(3):326-334.
- [25] WANG Run, HOU Jingming, LI Zhanbin, et al. A GPU based numerical model evaluating sponge effects on flood for sponge city construction in China[C]// E-proceedings of the 37th IAHR World Congress. Kuala Lumpur: IAHR & USAINS Holding Sdn Bhd, 2017.
- [26] 侯精明,张兆安,马利平,等.基于 GPU 加速技术的非结构流域雨洪数值模型[J].水科学进展,2021,32(4):567-576.
- [27] 玛哈沙提·哈孜哈力,努尔夏西·曼斯尔.天然河道的糙率确定方法分析[J].能源与节能,2017(4):94-95.