

乌龙江峡兜卡口阻力特性及壅水效应分析

胡朝阳, 王新强, 梁越

(福建省水利水电勘测设计研究院, 福建 福州 350001)

摘要: 峡兜卡口是乌龙江最为重要的控制断面,其阻力特性及其对乌龙江洪水位及行洪能力的影响尚不明确。采用二维数学模型计算了不同洪水方案下乌龙江峡兜卡口水面线、水面比降及流速分布特征,对产生壅水的临界流量、壅水高度及作用范围进行了分析。结果表明:峡兜卡口是乌龙江河道水面比降最大的位置,在峡兜流量超过 $19\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 后是乌龙江河道断面平均流速最大的位置,其阻力特性和壅水效应与流量密切相关;初步认定峡兜卡口发挥壅水作用的临界流量为 $19\,320\text{ m}^3/\text{s}$,在峡兜流量为 $35\,037\text{ m}^3/\text{s}$ ($P=0.5\%$)、 $32\,333\text{ m}^3/\text{s}$ ($P=1\%$)、 $29\,435\text{ m}^3/\text{s}$ ($P=2\%$) 时,峡兜壅水高度分别为 0.13 、 0.10 、 0.07 m ,壅水影响范围可分别至峡兜上游 1.99 、 1.88 、 1.69 km 。

关键词: 河道卡口; 阻力特性; 壅水效应; 数学模型; 峡兜; 乌龙江

中图分类号:TV131.4; TV87

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0154-07

Analysis of resistance characteristics and backwater effect of Xiadou Bottle-neck of the Wulongjiang River

HU Zhaoyang, WANG Xinqiang, LIANG Yue

(Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower, Fuzhou 350001, China)

Abstract: The Xiadou bottle-neck is the most important control section of the Wulongjiang River. Its resistance characteristics and backwater effect on the flood level and flooding capacity of the Wulongjiang River are still unclear. A two-dimensional mathematical model was used to calculate the water surface profile, water surface slope and velocity distribution characteristics of the Wulongjiang River under different flood computational schemes, and the critical flow rate, the height and reach of backwater of Xiadou bottle-neck were analyzed. The results showed that the Xiadou bottle-neck has the maximum slope of water surface of the Wulongjiang River. When the flow rate of the Xiadou bottle-neck exceeds $19320\text{ m}^3/\text{s}$, the maximum average velocity of Wulongjiang River is located in the Xiadou bottle-neck, and its resistance characteristic and backwater effect are closely related to flow. It is preliminarily determined that the critical flow rate of the Xiadou bottle-neck is $19320\text{ m}^3/\text{s}$. When the flow rate of Xiadou is $35037\text{ m}^3/\text{s}$ ($P=0.5\%$), $32333\text{ m}^3/\text{s}$ ($P=1\%$), $29435\text{ m}^3/\text{s}$ ($P=2\%$), the height of the backwater is 0.13 m , 0.10 m , 0.07 m , respectively. And the reach of the backwater located up to 1.99 km , 1.88 km , 1.69 km upstream of Xiadou bottle-neck.

Key words: bottle-neck of river; resistance characteristics; backwater effect; mathematical model; Xiadou; the Wulongjiang River

1 研究背景

天然河道局部突然缩窄形成卡口,由于卡口突变的平面形态和纵剖面形态对水流造成特殊影响而产生壅水作用,因而其增大了来流的阻力,造成水流

不顺,并且改变了河道水流的泥沙运动特征及河床冲淤状况,进而影响河道行洪、通航等条件^[1-8]。开展卡口阻力特性及壅水效应研究对河床演变治理、河道防洪、航道整治等有着重要的实际意义。

闽江下游在淮安头分为南、北两支,北支称北

收稿日期:2019-08-01; 修回日期:2019-09-22

基金项目:福建水利科技项目(闽江下游水动力和河床演变与城市水安全研究)

作者简介:胡朝阳(1988-),男,湖北荆州人,硕士,工程师,主要从事河道数值模拟与河床演变研究。

网络的 MIKE21 FM 模型,该模型较为成熟,在流域及城市水安全、水环境、水资源及水生态等方面有成功应用^[15]。模型控制方程为基于 3 向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier – Stokes 方程,具体方程参见文献[16],对该控制方程在空间上采用有限体积法进行离散,在时间上采用显性欧拉法进行离散。

3.1.2 模型参数 模型计算河段上迄闽江下游干流竹岐水文站断面(下文简称竹岐站),下至白岩潭断面。二维计算网格采用非结构三角形网格形式以适应计算区域复杂的河道边界条件,在峡兜卡口附近通过局部加密网格刻画已建 3 座桥梁桥墩,暂不考虑在建和规划桥梁,模型网格节点数 32 731 个,网格单元数 62 197 个,网格最小边长约 1 m,模型计算范围和网格见图 4。模型边界条件包括干流竹岐站进口流量边界、大樟溪支流进口流量边界、模型下游出口水位边界,岸边界为非滑移边界,给定其流速为零。

3.2 模型验证

采用实测水文资料进行模型的验证。洪水验证资料为闽江下游 2010 年 6 月 16 日 3:00 – 6 月 20 日 16:00 洪水期间(洪峰流量 29 300 m³/s)北港文山里、解放大桥水文站及乌龙江峡南水文站实测水位资料,潮位及流速验证采用 2015 年 3 月 7 日 12:00 – 3 月 8 日 14:00 侯官、解放大桥、白岩潭 3 个断面实测水文资料,验证时河道地形采用相应或相近年份实测资料,模型水位、流速验证成果如图 5、6 所示。2010 年洪水北港实测洪峰分流比为 20.23%,计算的北港洪

峰分流比为 20.47%,从验证成果来看,模型能够较为准确地反映模拟范围水流运动情况。

3.3 计算方案

模型上边界为竹岐站水文站不同洪水流量以及相应大樟溪流量,下边界为白岩潭站同频率潮位。模型计算方案如表 1 所示。表 1 中乌龙江流量为数学模型计算的其进口断面分流量,峡兜卡口流量为乌龙江进口断面分流量与大樟溪入汇流量之和。

表 1 洪水计算方案

竹岐站 流量/ (m ³ · s ⁻¹)	大樟溪 流量/ (m ³ · s ⁻¹)	乌龙江 流量/ (m ³ · s ⁻¹)	峡兜 流量/ (m ³ · s ⁻¹)	白岩潭 潮位/ m
10000	500	8278	8778	5.19
13000	600	10753	11353	5.43
15000	650	12411	13061	5.57
16900	650	13974	14624	5.72
22300	900	18420	19320	6.02
25600	1100	21186	22286	6.18
28800	1500	23808	25308	6.31
29400	1500	24305	25805	6.34
30600	1500	25299	26799	6.38
32800	2400	27035	29435	6.48
35600	3000	29333	32333	6.61
38300	3500	31537	35037	6.66

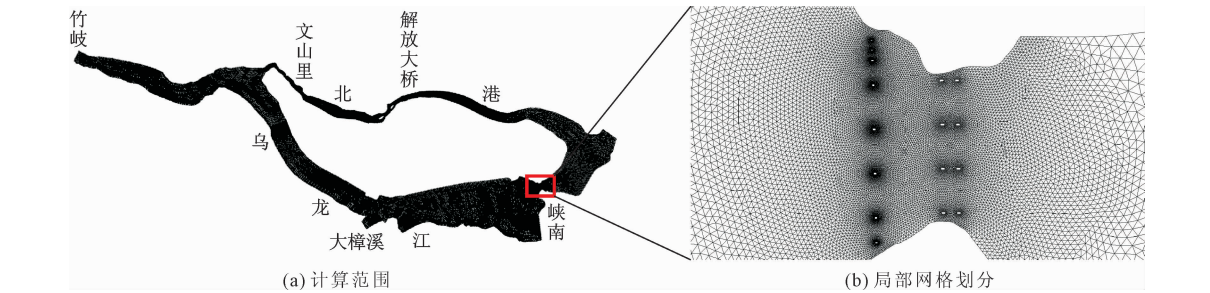


图 4 模型计算范围与网格示意图

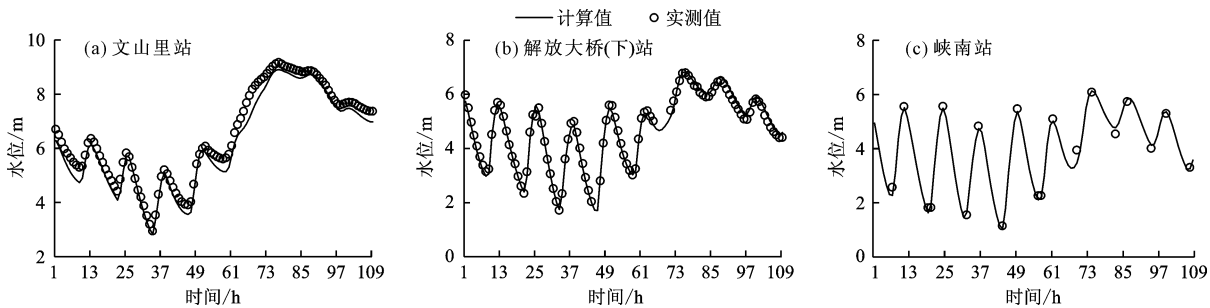


图 5 洪水水位模型验证

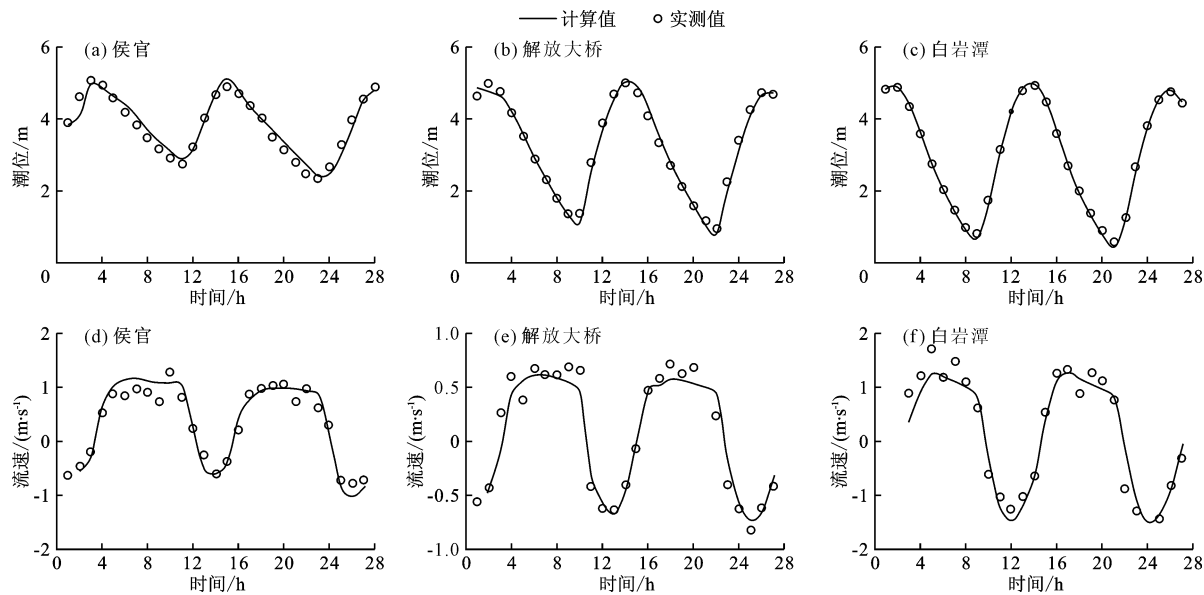


图 6 潮位和潮流流速模型验证

4 峡兜阻力特性与壅水效应分析

4.1 阻力特性分析

卡口阻力会导致河道水流能量损失,并反映到河道流速和沿程水面比降的变化上,可以通过黑龙江河道流速和水面比降变化来分析峡兜卡口阻力特性。竹岐站不同流量下黑龙江河道断面平均流速沿程分布如图 7 所示,图 8 为几个典型断面平均流速与流量的关系曲线。由图 7 可知,黑龙江河道断面平均流速随着流量增加而增大,在竹岐站流量小于 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$,即相应峡兜流量小于 $19\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 时,黑龙江河道断面平均流速最大值位于河道上段橘园洲断面附近,在竹岐流量超过 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$,即峡兜流量大于 $19\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 后,断面平均最大流速位于峡兜卡口断面;从典型断面流速随流量增加而增大的速率来看(图 8),可发现峡兜卡口断面平均流速随流量增加而增大的速率要明显大于河道其他断面,这也表明由于峡兜卡口断面狭窄,其断面面积随流量增加而增大的速率要小于黑龙江河道其他断面,在流量较小时,其阻力效应尚不显著,流速也无明显变化,流量增大后阻力效应开始显现,使得其断面流速迅速增大。

不同流量下黑龙江河道水面比降沿程分布如图 9 所示。由图 9 可知,黑龙江河道沿程水面比降随流量增加而增大,峡兜卡口上下游河道沿程水面比降分布相对均匀,峡兜卡口是黑龙江河道水面比降最大的位置。统计不同流量下黑龙江河道平均水面比降和峡兜卡口局部比降见表 2、图 10,由图 10、表 2 可知,随着流量逐渐增大,峡兜卡口局部比降增加

速度要显著高于河道平均水面比降增长速度。

表 2 竹岐站不同流量下黑龙江河道平均水面比降和峡兜卡口局部比降

竹岐站 流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	峡兜流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	平均水面 比降/ ‰	峡兜局部 比降/ ‰
10000	8778	0.02	0.06
13000	11353	0.04	0.10
15000	13061	0.04	0.13
16900	14624	0.05	0.20
22300	19320	0.07	0.37
25600	22286	0.09	0.49
28800	25308	0.10	0.63
29400	25805	0.11	0.65
30600	26799	0.11	0.70
32800	29435	0.12	0.82
35600	32333	0.14	1.00
38300	35037	0.15	1.19

4.2 壅水效应分析

4.2.1 壅水临界流量 竹岐站不同流量下黑龙江河道水面线分布如图 11 所示。由图 11 可知,在峡兜卡口流量小于 $19\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 、相应竹岐流量小于 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 时,峡兜卡口上下游水面线过渡较为平顺,在峡兜流量超过 $19\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 、相应竹岐站流量超过 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 后,峡兜卡口上游开始出现较明显的局部水位抬升现象。综合上文黑龙江河道断面平均流速和水面比降变化特征,初步认为峡兜卡口流量为 $19\,320\text{ m}^3/\text{s}$ 、即竹岐站流量为 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 时,峡兜卡口开始发挥壅水作用。

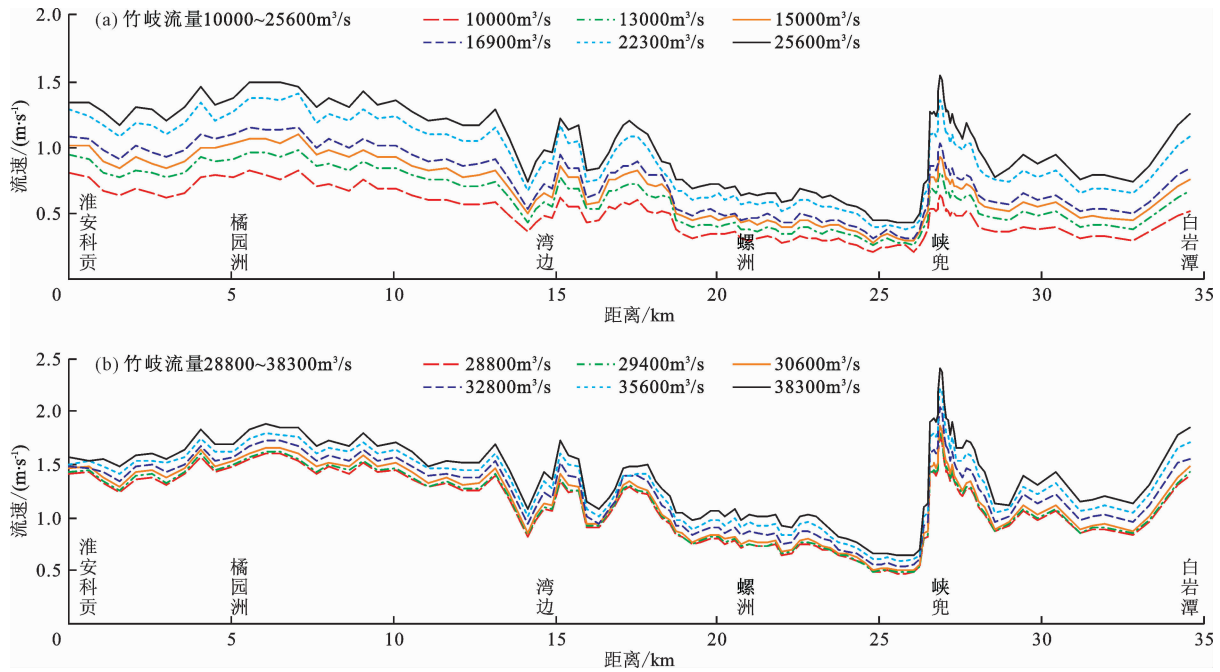


图7 竹岐站不同流量下乌龙江河道断面平均流速沿程分布

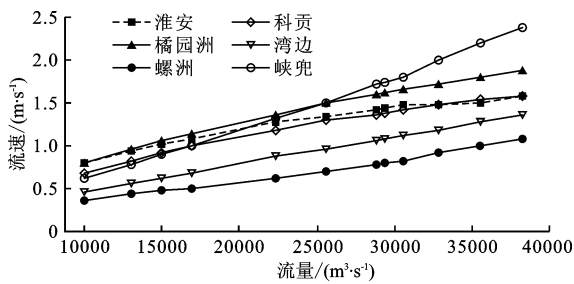


图8 乌龙江典型断面平均流速与流量关系曲线

计算参考长江科学院关于长江铜锣峡壅水计算方法^[17],具体为:首先假定峡兜卡口在没有壅水效应时,其不同工况下的水面比降与峡兜卡口壅水作用存在下乌龙江全河段同流量下的水面比降一致,据此推算峡兜卡口无壅水效应下的水面线,其与有壅水效应下的水面线之差即为峡兜卡口的壅水高度值。壅水范围为峡兜卡口以上至壅水高度减小为0的距离。据此计算得到的峡兜卡口壅水高度与范围见表3。

4.2.2 壅水高度及作用范围 峡兜卡口壅水高度

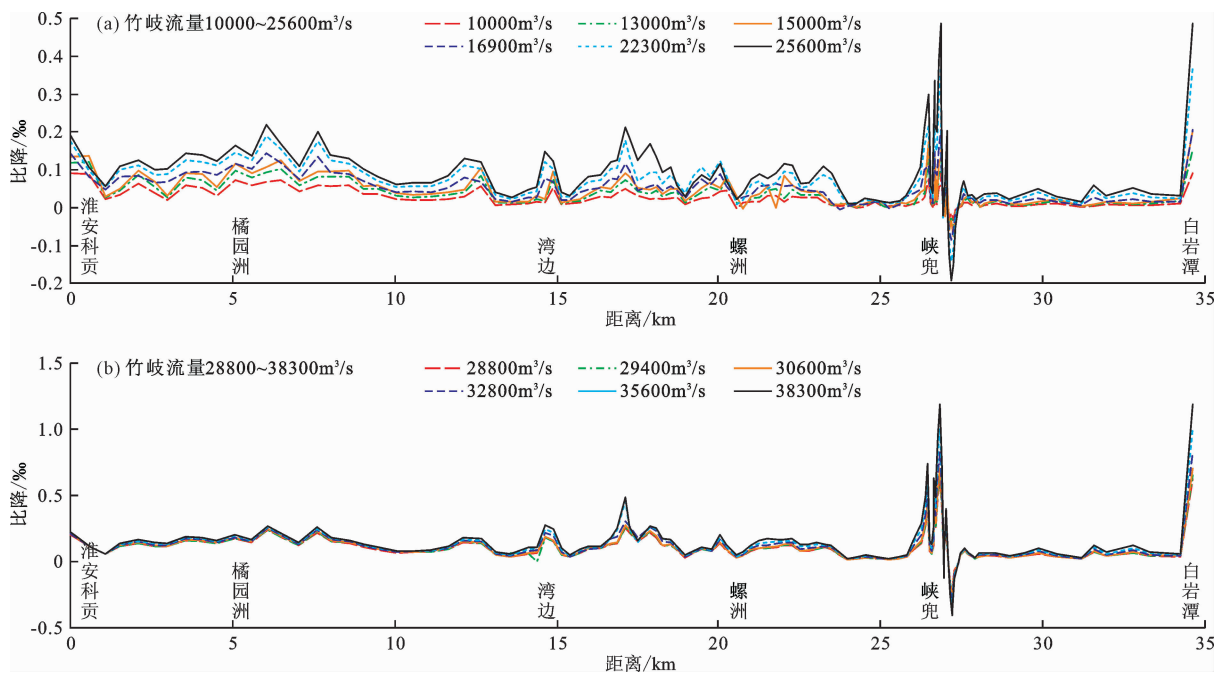


图9 竹岐站不同流量下乌龙江河道水面比降沿程分布

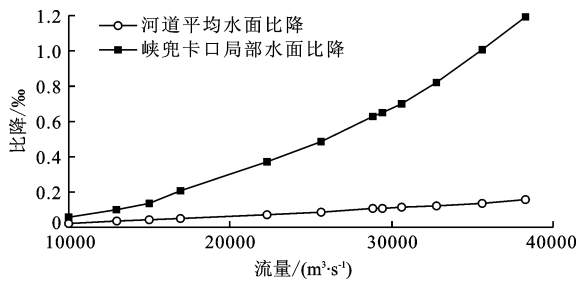


图 10 乌龙江河道平均水面比降和峡兜卡口局部比降与流量关系曲线

从表 3 中可以看出,峡兜卡口壅水高度和范围随流量的增加而增大,在竹岐站流量为 38 300 m³/s (200 年一遇)、35 600 m³/s (100 年一遇)、32 800 m³/s (50 年一遇) 时,峡兜卡口壅水高度分别为 0.13、0.10、0.07 m,壅水影响范围可分别至峡兜卡

口上游 1.99、1.88、1.69 km。

表 3 不同流量下峡兜壅水高度与范围

竹岐站流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	峡兜流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	壅水 高度/m	壅水 范围/km
38300	35037	0.13	1.99
35600	32333	0.10	1.88
32800	29435	0.07	1.69
30600	26799	0.05	1.53
29400	25805	0.05	1.37
28800	25308	0.04	1.37
25600	22286	0.02	1.12
22300	19320	0.01	0.90

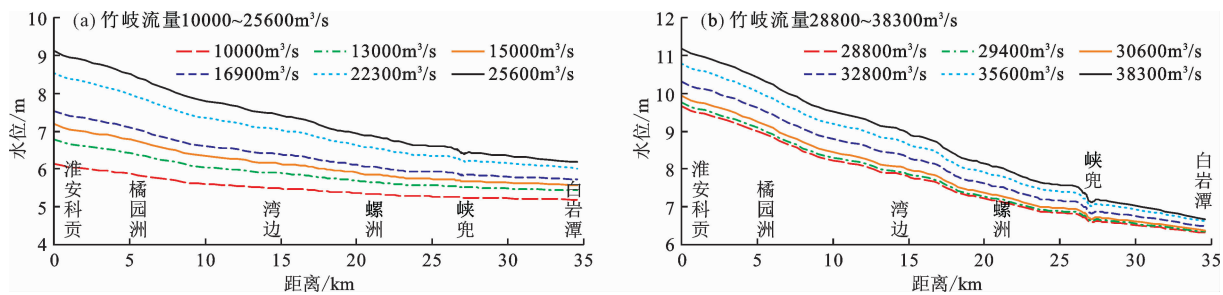


图 11 竹岐站不同流量下乌龙江河道水面线分布

5 结 论

(1) 峡兜卡口河宽与上游河道相差 10 余倍,深泓与上游河床落差超过 20 m,其独特的平面与纵剖面形态特征对乌龙江水流运动造成影响,其阻力特性和壅水效应与流量密切相关。

(2) 峡兜卡口为乌龙江河道水面比降最大的位置,在竹岐站流量超过 22 300 m³/s 后为乌龙江河道断面平均流速最大的位置。随着流量逐渐增大,峡兜卡口断面平均流速随流量增加而增大的速率要明显大于河道其他断面,局部比降增加速度要显著高于河道平均水面比降增长速度。

(3) 初步认为峡兜卡口发挥壅水作用的临界流量为 19 320 m³/s、相应竹岐站流量为 22 300 m³/s (5 年一遇),在竹岐站流量为 38 300 m³/s (200 年一遇)、35 600 m³/s (100 年一遇)、32 800 m³/s (50 年一遇) 时,峡兜壅水高度分别为 0.13、0.10、0.07 m,壅水影响范围可分别至峡兜上游 1.99、1.88、1.69 km。

参考文献:

[1] 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.

[2] 吴华莉,张小峰,金中武.宽窄相间河道水沙运动特性研究进展[J].人民长江,2015,46(8):14—18.

[3] 李义天,葛华,孙昭华.葛洲坝下游局部卡口对宜昌枯水水位影响的初步分析[J].应用基础与工程科学学报,2007,15(4):435—444.

[4] 葛华,李义天,朱玲玲,等.三峡蓄水初期宜昌枯水位稳定机理分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(1):47—53.

[5] 朱玲玲,袁晶,许全喜.铜锣峡卡口对重庆主城区河段洪水水位的影响分析[J].泥沙研究,2013,38(6):53—59.

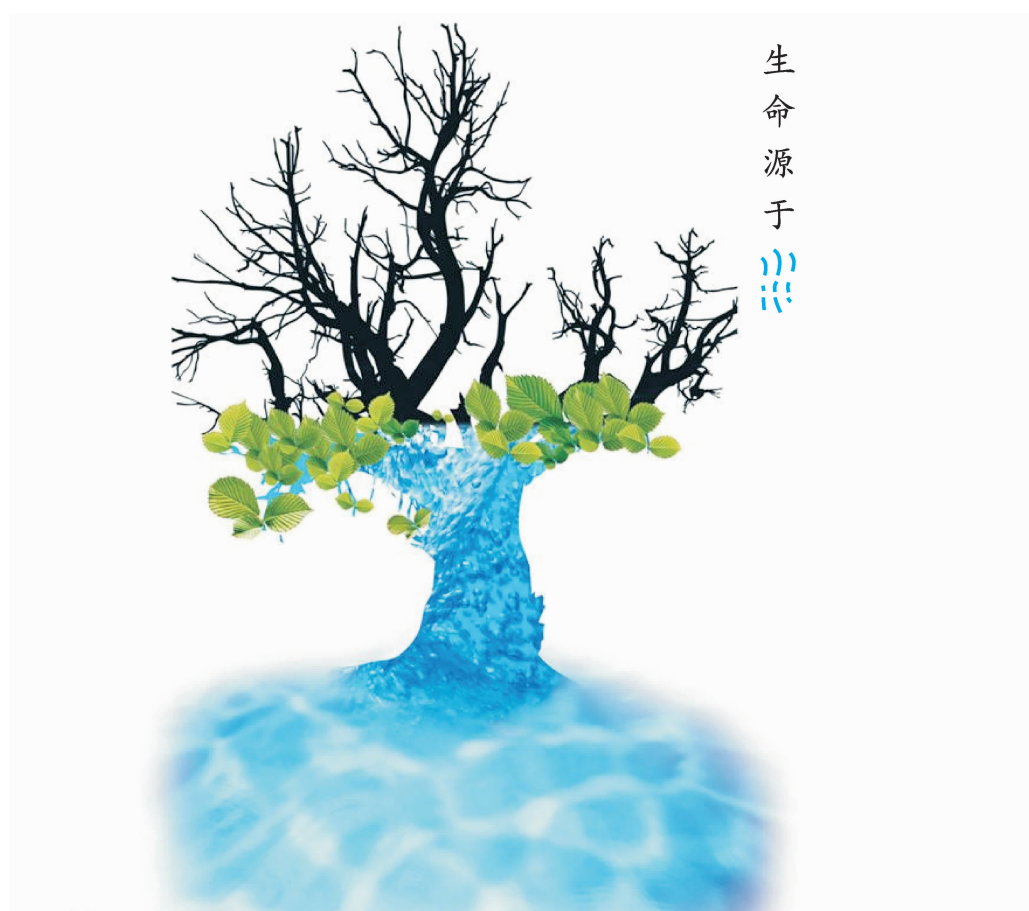
[6] 金中武,卢金友,吴华莉.铜锣峡壅水作用机理研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2014,29(5):552—564.

[7] 韩剑桥,段文中.卡口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.

[8] 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.

[9] 潘东曦.闽江下游南北港近期演变特点和分析[J].水利

- 科技,2017(1):1-8.
- [10] 刘发水. 乌龙江大桥桥群水流和冲刷特性试验研究[J]. 现代交通技术,2017,14(6):27-29.
- [11] 张鹏,石成春,逢勇,等. 闽江下游径流量和北港分流比变化及其对水龄的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):40-45.
- [12] 黄鑫,秦国锐,罗秋实,等. 感潮河段平面二维非恒定水流模型深化研究[J]. 水利水电技术,2015,46(4):130-133+142.
- [13] 肖庆华,岳志远,刘怀汉,等. 长江下游二维浅水非恒定流数值模拟[J]. 水力发电学报,2013,32(5):115-121.
- [14] 戴阳豪. 基于非结构网格的二维水流数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [15] 朱世云,于永强,俞芳琴,等. 基于 MIKE21 FM 模型的洞庭湖区平原城市洪水演进模拟[J]. 水资源与水工程学报[J]. 2018,29(2):132-138.
- [16] 穆聪,李家科,邓朝显,等. MIKE 模型在城市及流域水文-环境模拟中的应用进展[J]. 水资源与水工程学报[J]. 2019,30(2):71-80.
- [17] 长江水利委员会长江科学院. 铜锣峡壅水及嘉陵江入汇对重庆河段影响的试验研究[R]. 武汉:1989.



2020年3月22日是第二十八届“世界水日”,3月22-28日是第三十三届“中国水周”。联合国确定2020年“世界水日”的主题为“Water and Climate Change”(水与气候变化)。我国纪念2020年“世界水日”和“中国水周”活动的主题为“坚持节水优先,建设幸福河湖”。