排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 9 月 Sept. 2017 | 第 35 卷 第 9 期 Vol. 35 No. 9

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0248

滞洪区运行与浦阳江洪水位特性的响应关系


张鸿清

张鸿清[1,2]，戴会超[3]，万五一[2]，包中进[1]
（1.浙江省水利河口研究院，浙江 杭州 310020；2.浙江大学建筑工程学院，浙江 杭州 310058；3.河海大学水利水电学院，江苏 南京 210098）

摘要：以浦阳江为研究背景，通过建立二维水动力模型，分析了浦阳江各频率洪水与高湖不同泄洪总量组合工况下浦阳江流域的洪水位特性. 结果表明，当浦阳江遭遇 10 a 一遇洪水增至 20 a 一遇，再增至 50 a 一遇时，东、西江各典型位置点洪水位的平均降低值由 0.62 m 增至 0.70 m 再减小为 0.59 m，即高湖泄洪对浦阳江东、西江洪水位影响的敏感性呈先增强后减弱的规律. 在浦阳江相同频率洪水工况下，流域各位置洪水位改变量均随高湖泄洪总量增大而增大. 而高湖相同泄洪总量工况下，浦阳江遭遇 10 a 一遇洪水增至 20 a 一遇再增至 50 a 一遇时，流域各区域洪水位改变量呈先增后减的变化趋势. 东、西江以及东、西江下游交汇口－出口河段的洪水位改变量自上而下均呈逐渐减小变化，而上游入口－东西江上游交汇口以及枫桥江河段则反之. 研究结论可为优化高湖滞洪区运行提供指导.

关键词：浦阳江；滞洪区；泄洪总量；洪水位；水动力模型
中图分类号：TV61；S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)09-0767-07

张鸿清，戴会超，万五一，等. 滞洪区运行与浦阳江洪水位特性的响应关系[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(9)：767-773.

ZHANG Hongqing，DAI Huichao，WAN Wuyi，et al. Relationship between flood level response characteristics in Puyang River and operation of its flood detention basin [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME)，2017，35(9)：767-773. (in Chinese)

Relationship between flood level response characteristics in Puyang River and operation of its flood detention basin

ZHANG Hongqing[1,2]，*DAI Huichao*[3]，*WAN Wuyi*[2]，*BAO Zhongjin*[1]
(1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary，Hangzhou，Zhejiang 310020，China；2. College of Civil Engineering and Architecture，Zhejiang University，Hangzhou，Zhejiang 310058，China；3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering，Hohai University，Nanjing，Jiangsu 210098，China)

Abstract：Flood level characteristics of Puyang River were explored under combined conditions of various flood frequencies in Puyang River and different flood discharge rates for Gaohu flood detention basin based on a 2D hydrodynamic model of Puyang River. The results show that when Puyang River suffers from once flooding in ten years，in twenty years and fifty years the mean flood level at a typical observation point of the east and west branch rivers is reduced by 0.62 m，0.70 m and 0.59 m，respectively. This suggests that the flood level of two branch rivers are the most sensitive to the discharge rate for Gaohu flood detention basin in the condition of once flooding in twenty years. At the same flood fre-

收稿日期：2016-10-19；**修回日期**：2017-02-08；**网络出版时间**：2017-09-12
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170912.1117.014.html
基金项目：浙江省科技计划项目(2015F50012)
作者简介：张鸿清(1985—)，男，福建龙岩人，高级工程师，博士后(zhanghangqing8@126.com)，主要从事环境水力学及水工水力学研究.
戴会超(1965—)，男，河北保定人，教授，博士生导师(dai_huichao@263.net)，主要从事水利水电工程运行和调控研究.

quency, the water level change at various observation points on the rivers increase with increasing total flood discharge rate at Gaohu. At the same flood discharge rate at Gaohu, the water level change at various observation points on the rivers is the maximum at a flood frequency of once in twenty years in Puyang River. The flood level change reduces gradually from upstream to downstream along two branch rivers, and from their downstream merging point to the discharge reach, the level change, however, increases from their upstream inlet to dividing point and along Fengqiao River reach. The results provide a guidance for optimizing operation and management of Gaohu flood detention basin.

Key words: Puyang River; flood retarding basin; total flood discharge; flood level; hydrodynamic model

浦阳江是钱塘江[1-3]水系的一条重要支流,它途径金华市、诸暨市及杭州萧山等地,与钱塘江、富春江交汇于三江口. 浦阳江在诸暨城关分成东、西江,并交汇于下游湄池镇附近. 由于浦阳江诸暨以下河道狭窄曲折,加之钱塘江洪潮的顶托,使得该流域曾洪水泛滥成灾[4-6]. 在历史上,浦阳江洪水持续时间一般为3 d左右[7-8]. 浦阳江治理一贯坚持“上蓄、中分、下泄”的原则,但在2011年洪水中,暴露出“上蓄不够、中分难分、下泄不畅”的新问题. 枫桥江是浦阳江的重要二级支流,与浦阳江的东江交汇于草江口附近,其上游水库在浦阳江防洪治理中具有重要作用. 位于浦阳江分汊河道东江(双潭江位置)的高湖蓄滞洪区是流域洪水“中分”的唯一大型防洪工程,它对保障浙赣铁路、诸暨城区及下游农田、人民的生命财产安全等方面起到巨大作用[9]. 当高湖闸坝运行后,浦阳江沿程水动力将发生明显变化,除影响分洪闸所在东江及双潭江外,还可能涉及诸暨城关、西江段、枫桥江,甚至湄池以下河段,覆盖范围非常广泛,需对其开展深入论证. 与此同时,高湖滞洪区50 a来均未启用,滞洪区调度缺乏经验,洪水管理缺乏依据. 所以探讨高湖滞洪区运行与浦阳江洪水位特性的响应关系,能够为滞洪区的调度提供经验,为洪水管理提供依据.

目前,国内利用数学模型计算钱塘江流域洪水方面的研究工作已有一系列成果[10-12]. 文中以浦阳江为研究对象,通过建立浦阳江二维水动力模型,分析浦阳江不同频率洪水和高湖不同泄洪总量组合工况对浦阳江洪水位的影响,进而为优化高湖滞洪区运行提供指导.

1 数学模型建立及验证

1.1 模型建立

利用DHI研制的mike 21水动力模块[13-14],构建了浦阳江诸暨以下河道二维水动力模型,模型范围及计算网格分别见图1,2,模型地形采用2008年4月实测地形. 数学模型的入口边界设在浦阳江上游的浣沙桥和枫桥江[15]的骆家桥,出口边界设在高湖分洪口和浦阳江下游的三江口. 其中,浦阳江浣沙桥和枫桥江骆家桥为流量入口边界,高湖分洪口为流量出口边界,三江口为水位边界. 浣沙桥和骆家桥分别采用诸暨水文站和枫桥水文站流量资料,高湖分洪口的出口流量边界根据泄洪总量确定,三江口的出口水位边界采用距离浦阳江与钱塘江交汇口2.5 km的闻家堰水文站水位资料.

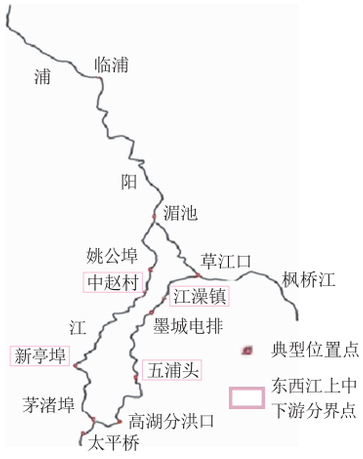


图1 模型范围

Fig. 1 Computational domain

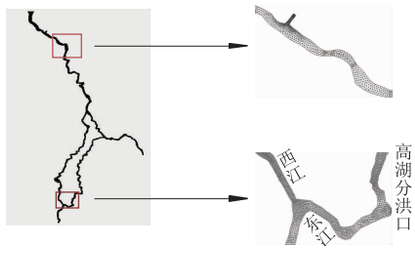


图2 计算网格

Fig. 2 Grid generated in computational domain

1.2 边界条件

考虑浦阳江流域历年洪水周期约为3 d,所以确

定数值计算周期为 3 d. 在浦阳江 10 a 一遇(P = 10%),20 a 一遇(P = 5%)以及 50 a 一遇(P = 2%)洪水工况下,诸暨站对应的洪水流量分别为1 477,1 920,2 512 m^3/s,而骆家桥站对应的洪水流量分别为 100,115,135 m^3/s;浦阳江各洪水频率工况下,出口的水位边界均取闻家堰水文站多年日平均水位 4.15 m;结合高湖滞洪区分级分区规划改造工程要求,高湖分洪口边界给定 3 种恒定出口流量,分别为 19.29,57.87,96.45 m^3/s,也即高湖 3 d 的泄洪总量 W_{3d} 分别为 0.5×10^7,1.5×10^7,2.5×10^7 m^3.

1.3　模型验证

采用 2011 年 6 月 13—21 日洪水期各边界实测资料(高湖分洪口流量为 0 m^3/s)对数学模型进行洪水位验证. 洪水期间诸暨站实测洪峰流量为 1 050 m^3/s,浦阳江沿程站点临浦、湄池、高湖坝址、新亭埠以及诸暨的验证成果分别见图 3,图中 H 为洪水位. 由图可知,最高洪水位误差均控制在 4 cm 以内,且计算和实测洪水位过程变化规律基本一致,表明模型率定[16]参数基本合理,可用于浦阳江洪水位分析和研究.

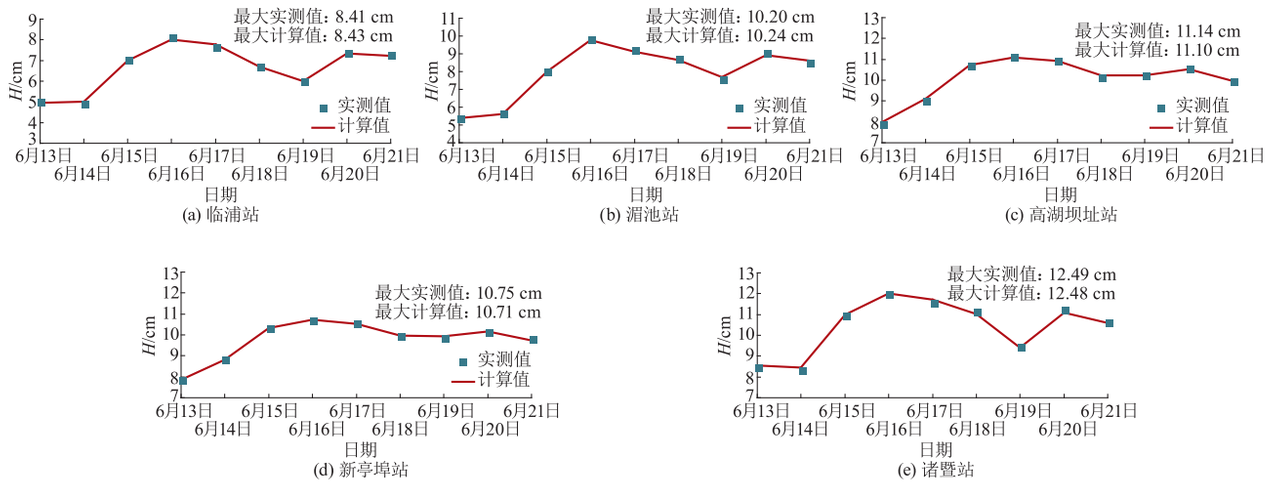


图 3　2011 年 6 月中旬洪水期各站洪水位过程线

Fig. 3　Flood process line at hydrological stations in mid-June 2011

2　计算结果及分析

2.1　高湖泄洪对典型位置洪水位影响的敏感性

在研究区域内选取太平桥、茅渚埠、新亭埠、姚公埠、高湖分洪口、五浦头、墨城电排、草江口、湄池、临浦等 10 个典型位置(见图 1),探讨高湖泄洪对各典型位置洪水位影响的敏感性,计算结果见表 1—3,表中 W_{3d},H_s 分别为高湖泄洪总量及其平均增加 10 000 m^3 对应的洪水位降低量.

由表 1—3 可知:① 在浦阳江遭遇各频率洪水工况下,高湖泄洪对分洪口的洪水位影响敏感性均最强. ② 当浦阳江洪水从 20 a 一遇增至 50 a 一遇时,下游临浦的洪水位变化幅度最大,即高湖泄洪对降低临浦洪水位的效果大幅度减小. ③ 当浦阳江遭遇 10 a 一遇洪水增至 20 a 一遇再增至 50 a 一遇时,在高湖泄洪总量平均增加 10 000 m^3 情况下,东、西江各典型位置点洪水位的平均降低值由 0.62 增至 0.70 再减小为 0.59 m,即高湖泄洪对浦阳江东、西江洪水位影响的敏感性呈先增强后减弱的规律. 其原因可能是浦阳江诸暨以下河道的横断面大致呈梯形,浦阳江遭遇 50 a 一遇洪水时河道洪水位较高,在高湖相同泄洪总量工况下各典型位置洪水位的下降幅度均较浦阳江遭遇 20 a 一遇洪水时有所减小.

表 1　浦阳江遭遇 10 a 一遇洪水时高湖不同泄洪总量工况下典型位置洪水位

Tab. 1　Flood level at typical locations of Puyang River at different total flood discharge rates at Gaohu for once flood in ten years　　m

典型位置	H				H_s
	$W_{3d}=0$ m^3	0.5×10^7 m^3	1.5×10^7 m^3	2.5×10^7 m^3	
太平桥	11.40	11.37	11.30	11.23	0.68
茅渚埠	11.26	11.23	11.16	11.09	0.68
新亭埠	10.99	10.96	10.89	10.82	0.68
姚公埠	10.10	10.08	10.02	9.97	0.52
高湖分洪口	11.31	11.27	11.19	11.10	0.84
五浦头	10.84	10.81	10.74	10.67	0.68
墨城电排	10.53	10.50	10.44	10.37	0.64
草江口	10.19	10.17	10.11	10.05	0.56
湄池	10.05	10.03	9.97	9.91	0.56
临浦	8.56	8.55	8.51	8.46	0.40
平均值					0.62

表2 浦阳江遭遇20 a一遇洪水时高湖不同泄洪总量工况下典型位置洪水位

Tab. 2 Flood level at typical locations of Puyang River at different total flood discharge rates at Gaohu for once flood in twenty years m

典型位置	H				H_s
	$W_{3d}=0$ m³	0.5×10^7 m³	1.5×10^7 m³	2.5×10^7 m³	
太平桥	12.28	12.25	12.17	12.09	0.76
茅渚埠	12.13	12.10	12.02	11.94	0.76
新亭埠	11.83	11.80	11.73	11.65	0.72
姚公埠	10.73	10.70	10.65	10.58	0.60
高湖分洪口	12.19	12.15	12.06	11.97	0.88
五浦头	11.65	11.61	11.54	11.45	0.80
墨城电排	11.25	11.22	11.16	11.08	0.68
草江口	10.86	10.83	10.77	10.70	0.64
湄池	10.68	10.65	10.60	10.53	0.60
临浦	9.09	9.07	9.03	8.95	0.56
平均值					0.70

表3 浦阳江遭遇50 a一遇洪水时高湖不同泄洪总量工况下典型位置洪水位

Tab. 3 Flood level at typical locations of Puyang River at different total flood discharge rates at Gaohu for once flood in fifty years m

典型位置	H				H_s
	$W_{3d}=0$ m³	0.5×10^7 m³	1.5×10^7 m³	2.5×10^7 m³	
太平桥	12.76	12.73	12.66	12.59	0.68
茅渚埠	12.61	12.58	12.51	12.44	0.68
新亭埠	12.27	12.24	12.17	12.10	0.68
姚公埠	11.03	11.01	10.96	10.91	0.48
高湖分洪口	12.68	12.64	12.56	12.48	0.80
五浦头	12.07	12.04	11.97	11.90	0.68
墨城电排	11.63	11.60	11.54	11.48	0.60
草江口	11.19	11.16	11.11	11.06	0.52
湄池	10.97	10.95	10.91	10.85	0.48
临浦	9.25	9.23	9.22	9.18	0.28
平均值					0.59

2.2 高湖泄洪对浦阳江各区域洪水位改变量分布特性的影响

以东、西江上游交汇口,西江的新亭埠村和中赵村,东江的五浦头村和江藻镇,以及东、西江下游交汇口作为分界点(分界点如图1所示),将研究对象划分为上游入口－东、西江上游交汇口,西江上游,西江中游,西江下游,东江上游,东江中游,东江下游,枫桥江,以及东、西江下游交汇口－下游出口等9个区段. 表4为浦阳江不同频率洪水与高湖不同泄洪总量组合工况下9个区域洪水位改变量 ΔH 的范围.

由表4可知,当浦阳江不同洪水频率与高湖不同泄洪总量组合工况下,东、西江6个区域洪水位改变量均取改变量范围的中间值,然后将高湖相同泄洪总量工况下东、西江6个区域洪水位改变量的中间值加权平均,可以得到高湖泄洪总量为 0.5×10^7, 1.5×10^7, 2.5×10^7 m³ 时,东、西江洪水位改变量均值分别约为3.0,10.0,16.5 cm. 同理,将高湖相同泄洪总量工况下东江3个区域和西江3个区域洪水位改变量的中间值分别加权平均[17]后,可以得出高湖泄洪总量为 0.5×10^7, 1.5×10^7, 2.5×10^7 m³ 时,东江洪水位改变量均值较西江要分别高出约0.5,1.2,1.8 cm. 根据整个流域洪水位改变量,高湖泄洪对不同区域洪水位改变量的影响程度由大到小排序,按研究区域均为东江上游,上游入口－东西江上游交汇口,西江上游,东江中游,西江中游,东江下游,枫桥江,西江下游,东西江下游交汇口－下游出口.

表4 浦阳江不同洪水频率与高湖不同泄洪总量组合工况下9个区域洪水位改变量范围

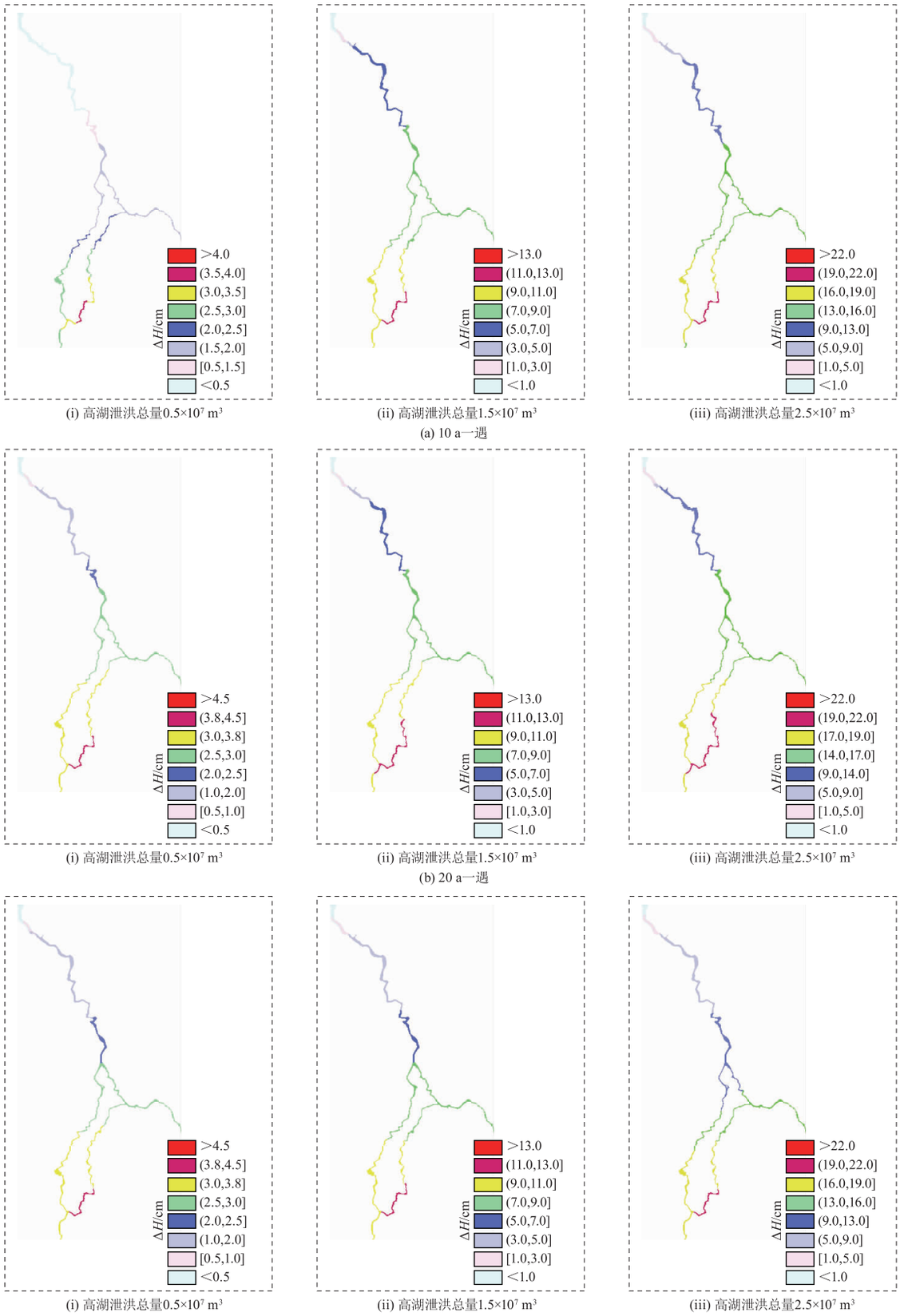
Tab. 4 Flood level variation range in nine regions under combined conditions of different total flood discharge rates at Gaohu and flood frequencies in Puyang River cm

工况	ΔH								
	上游入口－东西江上游交汇口	西江上游	西江中游	西江下游	东江上游	东江中游	东江下游	枫桥江	东西江下游交汇口－下游出口
浦洪 $P=10\%$ ＋高泄 0.5×10^7 m³	2.80～3.50	2.60～2.80	1.90～2.60	1.50～1.90	3.50～4.10	2.20～3.00	1.50～2.20	1.80～2.00	0.30～1.50
浦洪 $P=10\%$ ＋高泄 1.5×10^7 m³	10.00～11.00	9.00～10.50	7.80～9.00	7.40～7.80	10.50～13.50	8.50～10.50	7.40～8.50	7.60～8.20	0.35～7.40
浦洪 $P=10\%$ ＋高泄 2.5×10^7 m³	15.40～19.00	16.00～18.40	13.50～16.00	13.20～13.50	18.40～22.70	14.00～18.40	13.20～14.00	13.30～13.70	0.41～13.20
浦洪 $P=5\%$ ＋高泄 0.5×10^7 m³	3.50～3.80	3.30～3.80	2.90～3.30	2.55～2.90	3.70～4.62	3.20～3.70	2.55～3.20	2.60～2.90	0.33～2.55
浦洪 $P=5\%$ ＋高泄 1.5×10^7 m³	11.00～12.30	10.00～12.30	8.00～10.00	7.40～8.00	12.00～14.10	9.50～12.00	7.40～9.50	7.60～8.90	0.40～7.40
浦洪 $P=5\%$ ＋高泄 2.5×10^7 m³	18.00～20.00	17.50～20.00	15.00～17.50	14.40～15.00	20.00～23.10	16.50～20.00	14.40～16.50	15.00～16.00	0.43～14.40
浦洪 $P=2\%$ ＋高泄 0.5×10^7 m³	3.20～3.80	3.10～3.70	2.70～3.10	2.38～2.70	3.60～4.52	3.00～3.60	2.38～3.00	2.50～2.80	0.31～2.38
浦洪 $P=2\%$ ＋高泄 1.5×10^7 m³	9.80～11.00	9.30～11.00	8.00～9.30	7.20～8.00	10.00～13.54	8.50～10.00	7.20～8.50	7.50～8.10	0.37～7.20
浦洪 $P=2\%$ ＋高泄 2.5×10^7 m³	17.50～19.00	17.00～19.00	14.20～17.00	13.90～14.20	18.00～22.80	15.00～18.00	13.90～15.00	14.10～14.50	0.41～13.90

图4分别为浦阳江遭遇10 a,20 a,50 a一遇洪水工况下,高湖不同泄洪总量工况较不泄洪时流域洪水位改变量 ΔH 的平面分布(单位:cm).

由图4可知,在浦阳江各频率洪水与高湖不同泄洪总量组合工况下,浦阳江各区域洪水位改变量平面分布呈以下特征:① 流域洪水位改变量最大和最小分别为东江的高湖分洪口和下游出口;② 在浦阳江相同洪水工况下,流域各位置的洪水位改变量均随高湖泄洪总量增大而增大. 而高湖相同泄洪总量工况下,浦阳江洪水由10 a一遇增至20 a再增至50 a时,流域各位置洪水位改变量呈先增后减变化趋势. 其原因与前述高湖泄洪对浦阳江东西江洪水位影响的敏感性规律的成因一致;③ 东江、西江以及东、西江下游交汇口－出口河段的洪水水位改变

量自上而下均呈逐渐减小变化，而上游入口－东、　西江上游交汇口以及枫桥江河段则反之.



(i) 高湖泄洪总量0.5×10⁷ m³　(ii) 高湖泄洪总量1.5×10⁷ m³　(iii) 高湖泄洪总量2.5×10⁷ m³

(a) 10 a一遇

(b) 20 a一遇

(c) 50 a一遇

图 4　浦阳江洪水与高湖不同泄洪总量组合时浦阳江洪水位改变量分布

Fig. 4　Flood level change profile in Puyang River at different total flood discharge rates at Gaohu

3 结 论

通过建立浦阳江诸暨以下河道的二维水动力模型,探讨了浦阳江遭遇不同频率洪水工况下,高湖泄洪对流域典型位置洪水位影响的敏感性以及流域洪水位改变量分布特性的影响,得到以下结论:

1)在浦阳江遭遇各频率洪水工况下,高湖泄水对分洪口的洪水位影响敏感性均最强. 当浦阳江遭遇10 a一遇洪水增至20 a一遇再增至50 a一遇时,高湖泄洪对浦阳江东西江洪水位影响的敏感性呈先增强后减弱的规律.

2)在浦阳江不同频率洪水与高湖不同泄洪总量组合工况下,东江、西江以及东、西江下游交汇口-出口河段的洪水水位改变量自上而下均呈逐渐减小变化趋势,而上游入口-东、西江上游交汇口以及枫桥江河段则反之.

3)在浦阳江相同洪水工况下,流域各位置洪水位改变量均随高湖泄洪总量增大而增大. 而高湖相同泄洪总量工况下,浦阳江洪水由10 a一遇增至20 a再增至50 a一遇,流域各位置洪水位改变量呈先增后减变化趋势.

4)在浦阳江不同频率洪水和高湖不同泄洪总量组合工况下,高湖泄洪对各区域洪水位改变量的影响程度由大到小排序,按研究区域均为东江上游,上游入口-东西江上游交汇口,西江上游,东江中游,西江中游,东江下游,枫桥江,西江下游,东西江下游交汇口-下游出口.

参考文献(References)

[1] XIE Dongfeng, PAN Cunhong. A preliminary study of the turbulence features of the tidal bore in the Qiantang River, China[J]. Journal of hydrodynamics, ser B, 2013, 25(6): 903-911.

[2] PAN Cunhong, DAI Shiqiang, CHEN Senmei. Numerical simulation for 2D shallow water equations by using Godunov-type scheme with unstructured mesh[J]. Journal of hydrodynamics, ser B, 2006,18(4), 475-480.

[3] PAN Cunhong, LIN Bingyao, MAO Xianzhong. Case study: numerical modeling of the tidal bore on the Qiantang river, China[J]. Journal of hydraulic engineering, 2007,133(2): 130-138.

[4] WANG Beixin, LIU Dongxiao, LIU Shuru. Impacts of urbanization on stream habitats and macroinvertebrate communities in the tributaries of Qiantang River, China [J]. Hydrobiologia, 2012, 680(1): 39-51.

[5] SHEN Lidong, LIU Shuai, ZHU Qun, et al. Distribution and diversity of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidising bacteria in the sediments of the Qiantang river[J]. Microbial ecology, 2014,67(2): 341-349.

[6] 李若华,史英标,张舒羽. 钱塘江河口抗咸流量预报模式及其检验[J]. 水利水电科技进展,2016,36(5):75-80.
LI Ruohua, SHI Yingbiao, ZHANG Shuyu. Prediction model of salinity-resisting discharge in Qiantang Estuary anel its validation[J]. Advances in science and technology of water resources, 2016,36(5):75-80. (in Chinese)

[7] 曾剑, 孙志林, 潘存鸿, 等. 钱塘江河口径流长周期特性及其对河床的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010,44(8):1584-1588.
ZENG Jian, SUN Zhilin, PAN Cunhong, et al. Long-periodic feature of runoff and its effect on riverbed in Qiantang estuary[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2010,44(8): 1584-1588. (in Chinese)

[8] 余炯, 曹颖. 钱塘江河口段长周期泥沙冲淤和河床变形[J]. 海洋学研究, 2006,24(2):28-38.
YU Jiong, CAO Ying. Long-term sediment erosion/deposition and deformation of river-bed in the Qiantangjiang River estuary[J]. Journal of marine sciences, 2006,24(2):28-38. (in Chinese)

[9] 周长海,俞建东. 科学利用高湖滞洪水库, 实现人水和谐相处[J]. 水利发展研究, 2004(10):42-45.
ZHOU Changhai, YU Jiandong. Scientific use of flood retarding basin of Gaohu to achieve harmony between man and water[J]. Water resources development research, 2004(10):42-45. (in Chinese)

[10] 黄赛花, 孙志林, 祝丽丽. 潮汐河口动床洪水的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2006,25(5):46-50.
HUANG Saihua, SUN Zhilin, ZHU Lili. Numerical simulation of flood on movable bed of a tidal estuary [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2006, 25(5): 46-50. (in Chinese)

[11] 朱军政,耿兆铨. 钱塘江河口潮流悬沙的二维模型计算[J]. 水力发电学报, 2010,29(3):103-108.
ZHU Junzheng, GENG Zhaoquan. Calculation of the tide and sediment transport in Qiantang estuary by a 2D numerical model[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2010,29(3):103-108. (in Chinese)

[12] 林炳尧, 黄世昌, 毛献忠, 等. 钱塘江河口潮波变化过程[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2002,17(6): 665-675.

LIN Bingyao, HUANG Shichang, MAO Xianzhong, et al. Deformation process of tidal waves in Qiantang estuary[J]. Journal of hydrodynamics, ser A, 2002,17(6):665 – 675. (in Chinese)

[13] AACKERMANN P E, PEDERSEN P J D, ENGSIG – KARUP A P, et al. Development of a GPU-accelerated mike 21 solver for water wave dynamics[M]//KELLER R, KRAMER D, WEISS J P. Facing the multicore-challenge III: aspects of new paradigms and technologies in parallel computing. New York, USA: Springer Publishing Company, 2013: 129 – 130.

[14] HOGEDAL M. Ouémé bridge, hydraulic study: flooding risk and stability assessment using MIKE 21[J]. Transactions on ecology and the environment, 1998,19:437 – 446.

[15] 郑雄伟,马海波,张真奇. 支流水库防洪功能定位及防洪库容设置探讨[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4):51 – 54.
ZHENG Xiongwei, MA Haibo, ZHANG Zhenqi. Flood control function and capacity of tributary reservoirs[J]. Advances in science and technology of water resources, 2010,30(4):51 – 54. (in Chinese)

[16] 李昌烽,禹燕飞,赵文斌,等. 黄原胶水溶液管道流动减阻特性的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015,36(1):30 – 35.
LI Changfeng, YU Yanfei, ZHAO Wenbin, et al. Experiment on drag reduction charecteristics of xanthan gum solutiou in pipe flow[J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2015,36(1):30 – 35. (in Chinese)

[17] 黄炜,李雪真,赵嘉,等. 基于朴素贝叶斯算法的流域降水预测方法[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4): 65 – 69,79.
HUANG Wei, LI Xuezhen,ZHAO Jia, et al. A precipitation forecasting method for a river basin based on naive Bayes algorithm[J]. Advances in science and technology of water resources, 2016,36(4):65 – 69,79. (in Chinese)

(责任编辑　张文涛)

(上接第 760 页)

SHI Guangtai, YANG Junhu. Calculation method of slip factor for impeller outlet of centrifugal pump as hydraulic turbine[J]. Transaction of the CSAE,2014,30(13):68 – 77. (in Chinese)

[8] 冯进升,刘厚林,丁剑,等. 单流道离心泵的研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(3): 207 – 215.
FENG Jinsheng, LIU Houlin, DING Jian, et al. Status of study on single channel centrifugal pumps and its developing tendency[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2017, 35(3): 207 – 215. (in Chinese)

[9] 刘厚林,谈明高,袁寿其. 离心泵理论扬程的计算[J]. 农业机械学报,2006,37(12):87 – 90.
LIU Houlin, TAN Minggao, YUAN Shouqi. Research on calculation of theoretical head of centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAM,2006,37(12):87 – 90. (in Chinese)

[10] CUI Baoling, WANG Canfei, ZHU Zuchao, et al. Influence of blade outlet angle on performance of low-specific-speed centrifugal pump[J]. Journal of thermal science,2013,22 (2):117 – 122.

[11] SHIGEMITSU T, FUKUTOMI J. Influence of blade outlet Angle and blade thickness on performance and internal flow conditions of mini centrifugal pump[J]. International journal of fluid machinery and systems,2011,4(3): 317 – 323.

[12] LI Wenguang. Effects of flow rate and viscosity on slip factor of centrifugal pump handing viscous oils[J]. International journal of rotating machinery,2013:317473.

[13] Mohamad M. Experimental investigation of slip factor in centrifugal pump[J]. Experimental thermal and fluid science,2009,33(5):316 – 321.

[14] 张克危. 流体机械原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2000:51 – 52.

[15] 查森. 叶片泵原理及水力设计[M]. 北京:机械工业出版社,1988:21 – 28.

(责任编辑　陈建华)