

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.007

长江流域洪水汛情分布与水位-流量特征关系分析

董程, 冯民权

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为更好为长江流域防洪防汛提供决策依据,本研究收集了2020年6~8月期间长江流域内共28个河流水文站的水位-流量观测数据,结合水文站空间位置,分析长江汛期的洪水汛情空间分布与水位-流量特征关系。研究表明,长江上游在8月期间发生严重的洪水汛情,上游寸滩站超出警戒水位最高可达11 m;整体来看,汉江与长江交汇处及其以下区域是汛情最为严重的区域,长江中下游洪水历时长、流量大、最高水位持续时间长、干支流洪水并发。对2015—2017年部分水文站历史数据进行对比分析发现,汉江与长江交汇处仙桃水文站的汛情与水位-流量之间存在典型关系,汛情与水位-流量特征系数为正相关关系,可以根据该水文站2016年和2020年的特征系数尽早采取不同等级的防汛措施。

关键词: 长江; 洪水汛情; 水位-流量关系; 特征关系; 仙桃站

中图分类号: P333.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)03-0316-07

Analysis of the relationship between flood distribution and water level-discharge characteristics in the Yangtze River

DONG Cheng, FENG Minquan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to provide a decision-making basis for flood control in the Yangtze River, this study collected the water level-discharge observation data of a total of 28 river hydrological stations in the Yangtze River from June to August in 2020. Combined with the spatial location of the hydrological station, the relationship between the spatial distribution of floods and the characteristics of water level-discharge during the flood season of the Yangtze River was analyzed. This study has shown that severe flooding occurred in the upper reaches of the Yangtze River during August, and that the upper reaches of the Cuntan station exceeded the warning level by up to 11 m. The confluence of the Han River and the Yangtze River and the area below it were the most severe areas of flooding. The floods in the middle and lower reaches of the Yangtze River lasted for a long time, the flow was large, the highest water level was high, and the main and tributary floods occurred concurrently. A comparative analysis of the historical data from some hydrological stations from 2015 to 2017 found that there was a typical relationship between the flood situation and the water level-discharge of the Xiantao Hydrological Station at the intersection of the Han River and the Yangtze River. There was a positive correlation between flood situation and water level-discharge characteristic coefficient. The characteristic coefficients of the hydrological station in 2016 and 2020 will be implemented as early as possible for different levels of flood control measures.

Key words: the Yangtze River; flood situation; water level-discharge relationship; feature relationship; Xiantao Station

收稿日期: 2020-09-02; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20200927.1026.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679191)

第一作者: 董程,男,博士生,研究方向为水环境预测与模拟。E-mail:dong2417@vip.163.com

通信作者: 冯民权,男,博士,教授,博导,研究方向为环境模拟与污染物防治。E-mail:mqfeng@xaut.edu.cn

洪水是对人类危害最大的自然灾害之一,暴雨、冰雪融化、溃堤溃坝、海啸与风暴潮等都是诱发洪水的重要自然因素^[1]。暴雨是洪水的重要诱发因素,而降雨量分析也是目前分析、预测洪水汛情的重要方法^[2-4],但是否发生洪水汛情与人类活动^[5]、地势或距水系距离^[6,7]、土地利用方式^[8]以及对水体的截流^[9]有关,且降雨的空间分布难以准确量化^[4]。降雨主要通过地面径流、地下水等形式最终汇集到河流,引起河流水位与流量的变化。Barbetta 等^[10]提出,根据水位-流量关系进行汛情分析与洪水预报,而无需考虑降雨量等自然条件。

目前,关于汛情期间水位-流量关系的研究多针对一个水文站,如董章内等^[11]根据石鼓站的多年水位-流量关系,对洪水涨落率进行了分析;或者结合历史水文资料进行分析,如范国庆等^[12]根据黄河历史水文资料,分析了黄河洪水的时空分布特点;Brázdil 等^[13]对 Morava 河近三百多年来的洪水变化频率进行了分析;还有学者对多条河流内的水位-流量关系进行分析,如 Bormann 等^[14]对德国 78 条河流的水位-流量进行了系统调查,分析了水位-流量关系的趋势,提出气候变化、土地利用变化与水利工程措施都会影响河流水位与流量的变化。但是从整体的角度,对汛情期间全流域内水位-流量关系进

行分析的研究较少,考虑到自然界是一个统一的整体,这方面的研究更加不可忽视。

水文观测站是提供河流水位-流量变化的重要数据源,本研究收集了长江流域内 2020 年 6~8 月多个水文站的观测数据,根据各水文站的警戒水位线对水位做标准化处理。从水位-流量关系入手,对水位-流量等水文数据进行回归分析,在此基础上提取了每个水文站的水位-流量特征系数,并对部分典型水文站的历史水文资料进行对比分析。将特征系数与各水文站的水位变化、空间位置进行耦合,探明特征系数与洪水汛情之间的潜在关系,以便更好地为防洪防汛提供决策依据。

1 数据来源与处理方法

本研究所用数据来源于长江水文网(<http://www.cjh.com.cn/index.html>)和国家科技基础条件平台国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),收集了长江流域内 2020 年 6~8 月期间的所有水文站与 2015—2017 年 6~8 月期间部分水文站的水位-流量观测数据,将该部分数据导入 Excel 与 SPSS 软件进行统计分析。由于部分水文站本身存在数据缺失等问题,本研究最终选择 28 个水文站的水位-流量资料进行长江汛情分析,其具体位置及所在河流如图 1 所示。

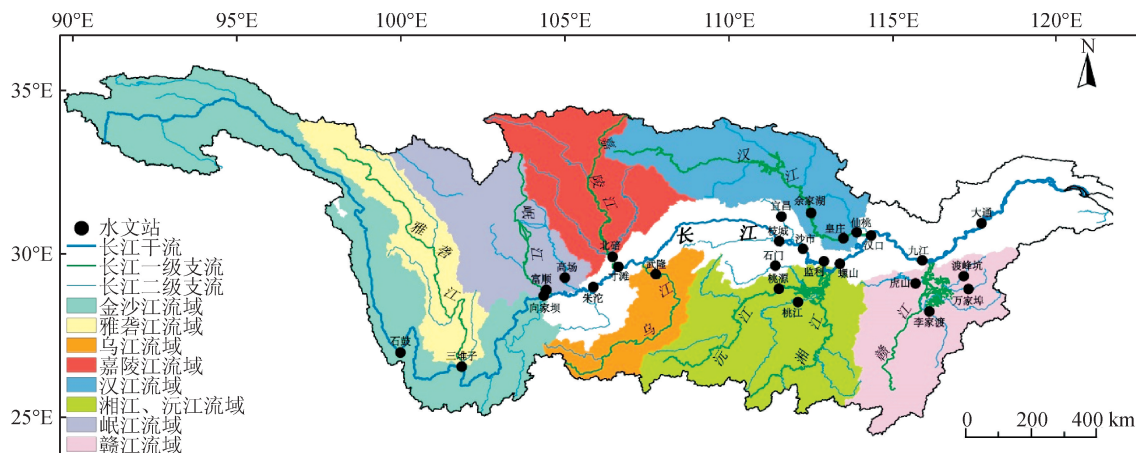


图 1 长江及其各支流流域分布与各水文站分布

Fig. 1 Distribution of tributaries and hydrological stations in the Yangtze River

本研究在确定各水文站位置的基础上,分别查询获取了各水文站的警戒水位线,并根据警戒水位线对各站每日水位线统一做标准化处理,将得到的水位变化结果与流量进行耦合,将水文站水位超过警戒水位线视为发生洪水汛情。水位-流量关系一般可分为稳定型与非稳定型^[15],稳定型水位-流量关系通常表现为一条单一直线,而非稳定型水位-流量关系因受地貌起伏、洪水汛情、降雨、凌汛等多因素综合影响,表现为复杂的曲线。对 6~8 月期间长江

中下游各水文站的水位结果进行统计分析发现,水位与流量变化存在相关性,水位或流量随彼此的变化而变化,因此可将水位-流量关系视为一元线性回归。采用最小二乘法将水位-流量之间的非线性关系进行线性处理,建立水位-流量的线性回归方程,将回归方程斜率作为衡量水位-流量的特征系数。

本文使用 SPSS 统计分析软件进行数据分析,最终得到不同水文站水位-流量关系的回归结果,如表 1 所示。根据判定系数 R^2 的结果,除向家坝、监

利、桃江、仙桃的判定系数 R^2 在 60%~80% 之间,其余各水文站的判定系数 R^2 均在 90% 左右,长江上游各水文站的判定系数最高。根据显著性检验标准,对各水

文站计算值进行显著性检验,结果显示,所有水文站的检验值均小于显著性水平下的统计量临界值,这表明所有水文站水位-流量关系具有很好的合理性。

表 1 2020 年长江流域各水文站水位-流量回归方程参数表

Tab.1 Parameter table of water level-discharge regression equation to each hydrological station in the Yangtze River Basin in 2020

流域位置	河流	水文站	截距	斜率(特征系数)	R^2
上游	干流	石鼓	-4.046	0.001 04	0.973
		三堆子	-11.797	0.000 83	0.999
		向家坝	-10.380	0.000 73	0.795
		朱沱	-11.885	0.000 37	0.995
		寸滩	-19.687	0.000 43	0.964
	岷江	富顺	-6.217	0.001 24	0.967
		高场	-8.878	0.000 44	0.980
	嘉陵江	北碚	-19.045	0.000 73	0.942
	乌江	武隆	-20.281	0.001 85	0.962
	中游	干流	枝城	-10.894	0.000 22
沙市			-10.210	0.000 27	0.856
监利			-6.981	0.000 24	0.649
螺山			-12.395	0.000 26	0.939
汉口			-13.071	0.000 25	0.945
九江		九江	-10.158	0.000 19	0.907
		沮漳河	宜昌	-13.373	0.000 29
沅江		石门	-7.230	0.000 91	0.927
		桃源	-8.969	0.000 60	0.940
湘江		桃江	-6.112	0.001 31	0.779
汉江	仙桃	-6.717	0.002 42	0.763	
	皇庄	-8.411	0.001 09	0.882	
	余家湖	-5.248	0.000 94	0.955	
下游	干流	大通	-8.557	0.000 13	0.956
		万家埠	-6.388	0.002 47	0.818
	赣江	李家渡	-8.492	0.001 42	0.829
		虎山	-5.610	0.001 52	0.862
		渡峰坑	-4.923	0.001 27	0.981

2 结果分析与讨论

2.1 长江流域主要汛情分析

图 2 为长江上游各水文站的水位-流量拟合关系示意图。由图 2 可以看出,长江上游各水文站均存在超警戒水位记录,但是整体超警戒水位时间较短。对各水文站水位-流量的回归方程进行分析,发现各站的水位-流量特征系数均较小,武隆站水位-流量特征系数最大,为 0.001 85(见表 1);但是结合图 2(b)发现,富顺站仅有五次超警戒水位记录,且主要集中在 7 月。该时期内长江上游超警戒水位最

高且持续时间最长的为石鼓站,持续时间长达 26 天,最高水位超警戒水位 1.52 m。超警戒水位最高且流量最大的为寸滩站,寸滩站在 2020 年 8 月 14 日至 21 日期间连续超警戒水位 8 天,在 8 月 20 日超警戒水位最高达到 11 m,为该地罕见特大洪水。其次为朱沱、北碚、富顺,三站的超警戒水位均在 3~5 天,最高超出警戒水位线 5 m。

总体来看,长江上游在 6~7 月期间汛情较轻,洪水汛情主要集中在 8 月,为突发性洪水,汛情期间干流地区受影响较大。

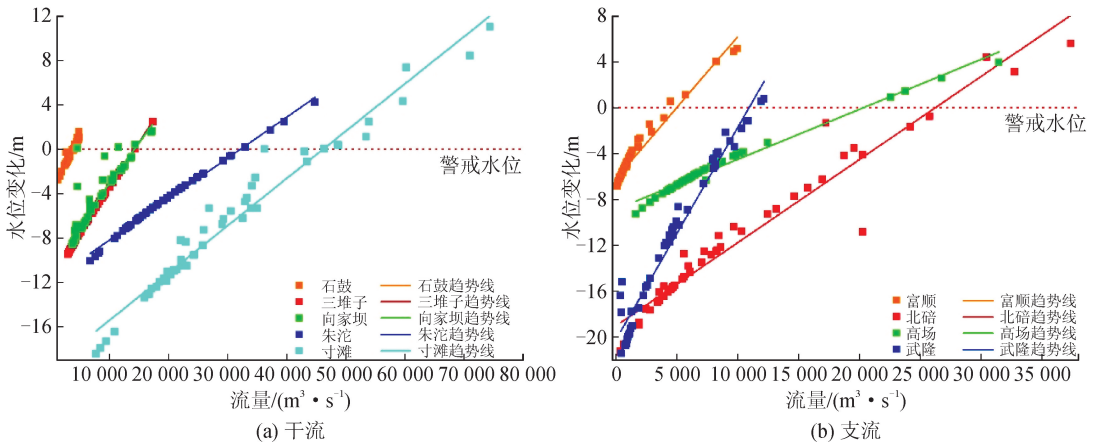


图2 长江上游水文站水位-流量拟合关系

Fig. 2 Water level-discharge fitting relationship of hydrological stations in the upper reaches of the Yangtze River

图3为长江中游各水文站水位-流量拟合关系示意图。由图3可以看出,该时期内除长江中游支流的桃江、余家湖、皇庄等站的水位无超警戒水位记录,其他水文站均曾不同程度地超过当地的警戒水位。值得注意的是,未超警戒水位的水文站主要位于汉江中上游、沅江和湘江流域。

根据水位-流量回归方程,仙桃站的特征系数最大,为0.002 42(见表1);同时结合图3(b),发现该站超警戒水位较高,仙桃站超警戒水位13次,最高水位时超警戒线2.07 m,说明该地区洪水汛情更具突发性与持久性。仙桃位于汉江与长江的交汇处,受河流汇合影响,上游水流大量汇入导致该地水位与流量剧增,进而引发了洪水。

长江干流处的监利、螺山、汉口与九江四地均存在明显的洪水汛情(见图3(a)),四站超警戒水位次数均大于20次,超过同期其他水文站的超警次数;与其他超警戒水位下的特征系数相比,四站的水位-流量特征系数较小,表明四地的汛情形势呈逐渐增强趋势,这有利于当地做好充足的防洪准备。四站超警戒水位由高到低分别为监利、螺山、汉口、九江,在空间上存在上下游关系。除此以外,石门、沙市、宜昌三站仅有1~3天存在超警戒水位记录,其所在区域的洪水汛情较轻。长江中游汛情严重的区域主要集中在汉江与长江交汇处、长江主河道,特别是长江监利至九江段汛情尤为严重,巨量洪水汇入长江下游会给下游汛情防控带来严峻挑战。

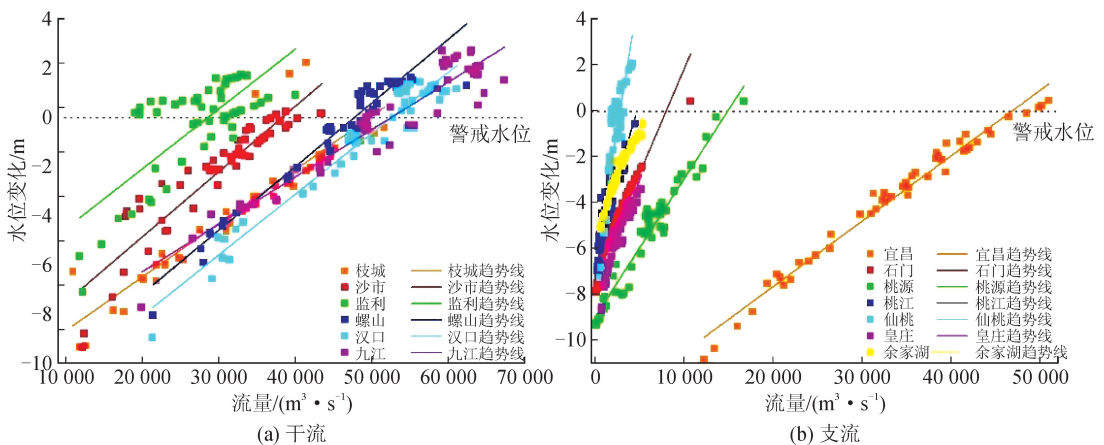


图3 长江中游水文站水位-流量拟合关系

Fig. 3 Water level-discharge fitting relationship of hydrological stations in the middle reaches of the Yangtze River

图4为长江下游各水文站水位-流量拟合关系示意图。由图4(b)可以看出,长江下游支流流域内只有李家渡水文站水位保持在警戒水位以下。在初期其水位呈缓慢上升趋势,虽然在7月期间其水位曾迅速抬高,但是始终没有超警戒水位记录。

根据水位-流量回归方程的分析结果(见表1),长江支流万家埠水文站的水位-流量特征系数最高,为0.002 47,但仅超警戒水位1次。虎山、渡峰坑两处水文站的水位-流量特征系数在0.001 4左右,超警戒水位天数较少(虎山与渡峰坑站均为3次)。长

江干流的大通站超警戒天数为 25 天,是长江下游超警戒水位时间最长的地区,但其水位-流量特征系数最小,结合大通站在长江的位置可知,若不考虑降雨的影响,大通站水位-流量的变化主要是接纳了长江上游与支流的大量水流引起的。大通站最高水位超警戒水位线 1.82 m,且超警戒水位线 1 m 以上的天数为 18 天,具有明显的持续性洪水特征。从长江下游各水文站的空间位置来看,除大通站外,其他四处水文站均位于赣江流域,而大通站位于长江主河道位置。长江中游与长江各支流水体不断向下游汇

聚,江、湖流量分配变化导致长江中游出现新的防洪形势,加剧了长江下游主河道的行洪压力。

总体来看,长江中下游地区是洪水汛情较为严重的区域,如图 5 所示,特别是汉江与长江交汇处至大通之间的区域是洪水最为严重的区域,此次长江中下游洪水历时长、特征水位高、流量大、最高水位持续时间长、干支流洪水并发,洪水汛情造成的损失十分惨重。虽然长江经过了大规模的治理,但是仍需要科学调度沿岸蓄滞洪区,才能更好地进行流域洪水管理。

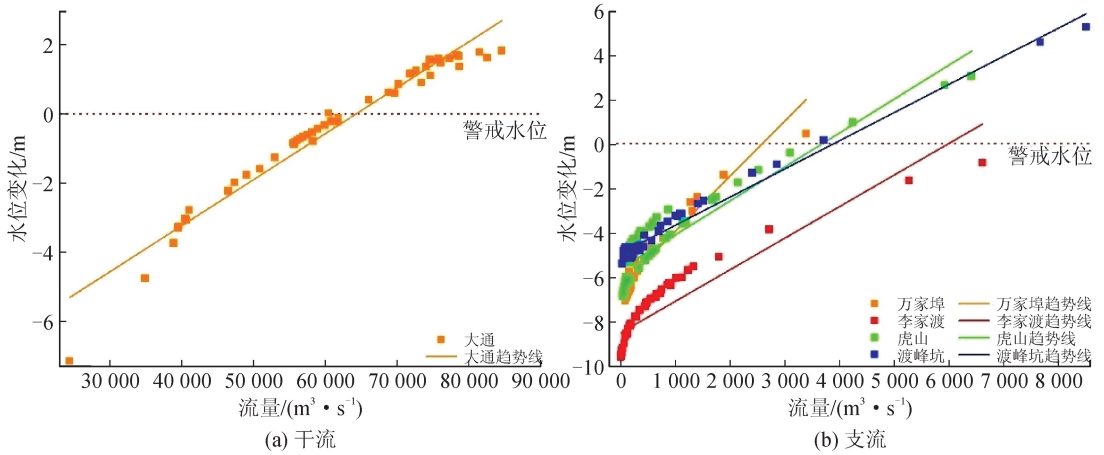


图 4 长江下游水文站水位-流量拟合关系

Fig. 4 Water level-discharge fitting relationship of hydrological stations in the lower reaches of the Yangtze River

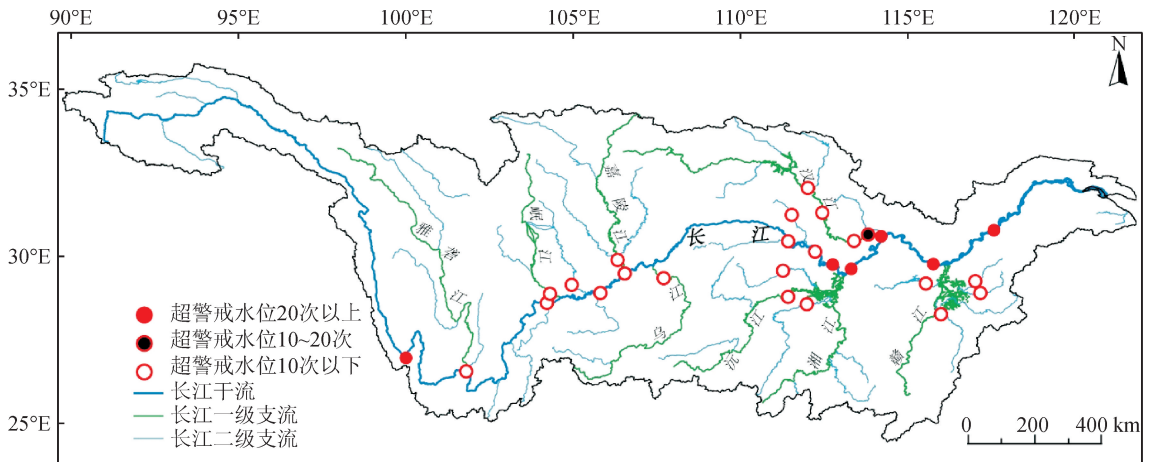


图 5 长江 6~7 月期间水文站超警戒水位次数分布图

Fig. 5 Distribution map for the number of over-warning water levels at hydrological stations in the Yangtze River during June and July

2.2 部分水文站洪水汛情对比分析

本研究对部分水文站 2020 年与 2015—2017 年的 6~8 月水位-流量关系进行了对比分析,如图 6 所示。桃源站(见图 6(b))由于数据缺失只有 2017 年和 2020 年水位-流量数据,两期数据显示,桃源站水位均超过警戒水位,桃源站 2017 年汛情集中在 7 月初,而 2020 年汛情集中在 6 月中旬;2017 年汛情

持续时间约为 4 天,小于 2020 年的 1 天汛情;2017 年最高水位为 2.79 m,远超 2020 年最高水位;从超警戒水位的高度与频率来看,2017 年的洪水汛情比 2020 年严重;从这两年的水位-流量关系来看,其特征系数均为 0.000 6 左右,但 2017 年略高于 2020 年。皇庄站(见图 6(c))在四年里均处于警戒水位

线以下,在2020年虽有短时间的超警戒水位,但是并未超过警戒水位;通过对其特征系数分析发现,皇庄站在四年时间里水位-流量特征系数均为0.001左右。桃江站(见图6(d))四期数据表明,该站在2015—2016年水位曾超警戒水位,2020年的水位虽未超过,但其最高水位也接近于警戒水位线;2017年洪水汛情最为严重,其最高水位超警戒水位可达4.81 m,约持续5天;2015—2016年期间,仅超警戒水位1~2次,其洪水汛情较轻;对桃江站四年的水位-流量特征关系进行分析,其特征系数均为0.001左右。

仙桃站(图6(a))在2016年与2020年存在超警戒水位,且超警戒水位时间长、频次多、强度大,洪水汛情严重。对其四期内的水位-流量进行回归分析发现,仙桃站的水位-流量特征系数在发生洪水汛情时均大于0.002,而在无汛情时小于0.02。2020年期间,仙桃站出现了两次洪水汛情,第二次汛情的超警戒水位频率与高度均高于第一次,两次汛情相距4天;

2020年汛情期间,仙桃站累计超警戒水位13次,超警戒水位最高可达2.07 m,洪水汛情严重。2016年,长江流域发生了自1998年以来最大的洪水事件,仙桃站特征系数在2016年达到最大,为0.003 57,远高于2020年的特征系数。仙桃水文站位于汉江与长江交汇处,汇集着两条河流的径流量,仙桃水文站的水位-流量特征系数可以反映出长江中下游洪水汛情趋势,其水位-流量特征系数越高,汛情越严重。

综合长江流域内各水文站的水位-流量特征系数结果,发现长江与汉江交界处仙桃站的特征系数最高,汛情严重。万家埠水文站的特征系数虽超过0.002,但是其水位在2020年汛期未超过警戒水位线,汛情较轻;大通站附近洪水汛情严重,但是其特征系数较低。这表明仙桃站的汛情与水位-流量之间存在典型关系,其洪水汛情与水位-流量特征系数为正相关关系,但是该关系的确立还需要更多历史数据来进一步补充完善。

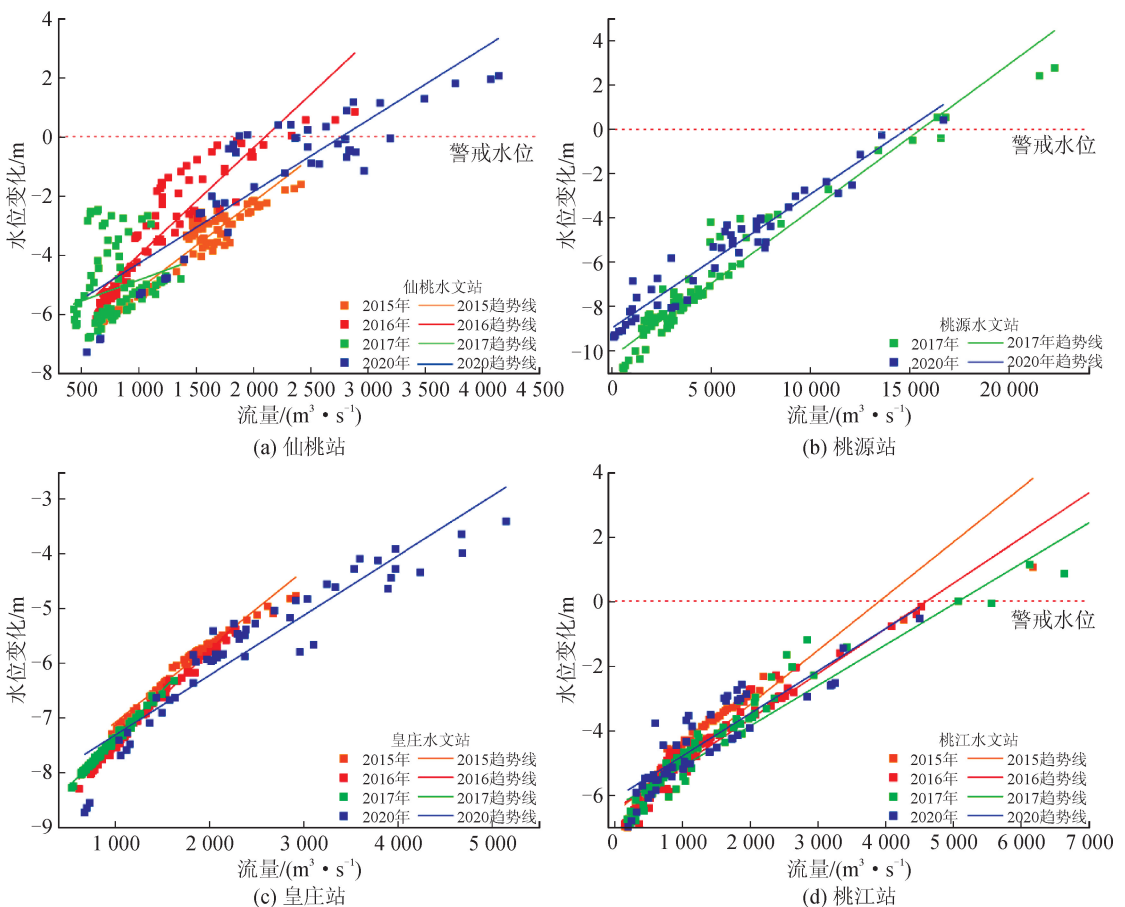


图6 部分水文站近年水位-流量拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between water level-discharge of some hydrological stations in recent years

3 结论

本文收集了长江流域内6~7月期间共28个水文站的水文观测数据,对水位-流量进行回归计算,

分析了每个水文站的水位-流量特征系数,结合各水文站在长江流域内的位置,分析了长江洪水的主要空间分布,并对部分水文站的历史数据进行了对比。

1) 2020年汛期,长江上游洪水汛情主要集中在

在8月,寸滩站洪水汛情最为严重,其超警戒水位最高可达11 m;汉江与长江干流交汇处及其下游区域为汛情最严重的区域,长江中下游各水文站都不同程度地超过了警戒水位线。此次长江中下游洪水历时长、特征水位高、流量大、最高水位持续时间长、干支流洪水并发,洪水汛情造成的损失十分惨重。

2) 通过对水位-流量特征系数的分析发现,仙桃站的汛情与水位-流量之间存在典型关系:仙桃洪水汛情与该站的水位-流量特征系数为正相关关系,特征系数越高,汛情越严重。短期内可通过仙桃站的水位-流量特征系数,更快、更高效地预测汛情,可以根据2016年(0.003 57)和2020年(0.002 55)的特征系数尽早采取不同等级的防汛措施。

本研究是根据有限的资料得出的结论,还需要更多历史数据来进一步验证完善,相关研究仍有待深入。

参考文献:

- [1] LENDERING K T, JONKMAN S N, MATHIJS V L, et al. Defend or raise? Optimising flood risk reduction strategies[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(S1): e12553.
- [2] ATIF R M, SIDDIQUI M H, ALMAZROUI M. Near-real-time spatiotemporal analysis of convection and extreme rainfall leading to a flash flood using MSG-SEVIRI and TRMM data: a case study of a flash flood in Jeddah, Saudi Arabia on the November 25, 2009[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(3): e12611.
- [3] 江锦红, 邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. *水利学报*, 2010, 41(4): 458-463.
JIANG Jinhong, SHAO Liping. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(4): 458-463.
- [4] 闫宝伟, 刘昱, 江慧宁, 等. 考虑降雨空间异质性的动态临界雨量预警指标推求[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 342-348.
YAN Baowei, LIU Yu, JIANG Huining, et al. Study on dynamic critical rainfall warning index considering spatial heterogeneity of rainfall[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(3): 342-348.
- [5] FELONI E, MOUSADIS I, BALTAS E. Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach-the case of Attica region[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(S1): e12563.
- [6] 袁玉, 方国华, 陆承璇, 等. 基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估[J]. *地理学报*, 2020, 75(9): 1921-1933.
YUAN Yu, FANG Guohua, LU Chengxuan, et al. Flood risk assessment under the background of urbanization based on landscape ecology[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1921-1933.
- [7] ZHANG W, WANG W G, ZHENG J H, et al. Reconstruction of stage-discharge relationships and analysis of hydraulic geometry variations: the case study of the Pearl River Delta, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 125: 60-70.
- [8] 吴森, 石朋, 孙勇, 等. 土地利用变化对淮河上游小流域设计洪水的影响研究[J]. *西安理工大学学报*, 2015, 31(3): 366-373.
WU Miao, SHI Peng, SUN Yong, et al. Research on the influence of land use change on the design flood of small basins in the upper reaches of Huaihe River[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(3): 366-373.
- [9] PENG D, XU Z, QIU L, et al. Distributed rainfall-runoff simulation for an unclosed river basin with complex river system: a case study of lower reach of the Wei River, China[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2016, 9(2): 169-177.
- [10] BARBETTA S, MORAMARCO T. Real-time flood forecasting by relating local stage and remote discharge[J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2014, 59(9): 1656-1674.
- [11] 董章内, 王进, 陈细润. 洪水涨落率与绳套型水位流量关系分析[J]. *水资源研究*, 2020, 9(3): 329-334.
DONG Zhangnei, WANG Jin, CHEN Xirun. Analysis of flood fluctuation rate and loop-type relationship between water level and discharge[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2020, 9(3): 329-334.
- [12] 范国庆, 谢文轩, 毛利强. 黄河河源区洪水时空分布特征统计分析[J]. *人民黄河*, 2013, 35(6): 27-28, 31.
FAN Guoqing, XIE Wenxuan, MAO Liqiang. Statistical analysis on the temporal and spatial distribution characteristics of floods in the Yellow River source area[J]. *Yellow River*, 2013, 35(6): 27-28, 31.
- [13] BRÁZDIL R, ŘEZNÍČKOVÁ L, VALÁŠEK H, et al. Fluctuations of floods of the River Morava (Czech Republic) in the 1691-2009 period; interactions of natural and anthropogenic factors[J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2011, 56(3): 468-485.
- [14] BORMANN H, PINTER N, ELFERT S. Hydrological signatures of flood trends on German rivers: flood frequencies, flood heights and specific stages[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404(1-2): 50-66.
- [15] 程银才, 范世香. 基于门限回归的稳定水位流量关系曲线定线方法[J]. *水文*, 2013, 33(4): 22-24.
CHENG Yincai, FAN Shixiang. Determination method of stage discharge relationship curve based on threshold regression[J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(4): 22-24.