

思贤滘洪水分流比变化及对设计洪水影响研究

李文华, 周秋红

中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2022年9月19日; 录用日期: 2022年10月21日; 发布日期: 2022年10月28日

摘要

基于马口、三水水文站长系列实测洪水资料, 利用Mann-Kendall趋势检验和Pettitt突变检验等方法, 对珠江三角洲顶部节点思贤滘洪水分流比以及马口、三水、思贤滘洪水系列一致性进行研究。研究表明: 思贤滘节点洪水分流比在20世纪90年代以前较为稳定, 1992年以后, 分流比发生了显著变化, 三水洪水分流比显著增加, 近年基本稳定在较高水平; 三水站洪水序列亦在20世纪90年代初期发生显著突变。通过分段建立相关关系的方法对马口、三水站洪水序列进行还原, 还原后序列无明显趋势性和突变, 提出对马口、三水站设计洪水成果按现状分流比进行调整的修订建议。

关键词

分流比, 思贤滘, 设计洪水

Study on the Change of Flood Diversion Ratio in Sixianjiao Channel and Its Influence on Design Flood

Wenhua Li, QiuHong Zhou

China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Sep. 19th, 2022; accepted: Oct. 21st, 2022; published: Oct. 28th, 2022

Abstract

Based on the flood data of the Makou and Sanshui hydrological stations, the flood diversion ratio and the consistency of flood series in the Makou, Sanshui and Sixianjiao at the top node of the Pearl River Delta

作者简介: 李文华(1988-), 女, 湖南永州人, 硕士, 工程师, 主要从事水利规划设计工作。Email: wenhua-lee@qq.com

are studied by Mann-Kendall trend test and Pettitt mutation test. The results show that: The flood diversion ratio of Sixianjiao Channel was relatively stable before 1990s, but after 1992, the diversion ratio changed significantly, and the flood diversion ratio of Sanshui increased significantly, and it was basically stable at a high level in recent years. The flood sequence of Sanshui station also changed significantly in the early 1990 s. The flood sequence of Makou and Sanshui stations is reconstructed by the method of building correlation relationship in sections. There was no obvious trend and mutation in the sequence after reconstructed. Based on this, the revision suggestions are put forward to adjust the design flood results of Majou and Sanshui stations according to the current diversion ratio.

Keywords

Diversion Ratio, Sixianjiao Channel, Design Flood

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

思贤滘位于广东省佛山市三水区，是沟通西江和北江的重要通道，是珠江三角洲网河区的顶点，位置示意图见图 1。西江东流至西滘口，北江南流至北滘口，两江在思贤滘沟通，经思贤滘调节后分为三角洲内西江及北江两大泄洪区域，并通过下游各水道分流后，经八大水道出海，形成“三江汇流，八口出海”的格局。受西北江三角洲无序采砂影响，20 世纪 90 年代以来思贤滘水文情势发生了较大变化[1]，以往对思贤滘过滘流量的分析表明，1992 年之前枯水期思贤滘主要以北江流向西江的水流为主，汛期在西江发洪时则以西江水流过北江为主，1993 年以来不仅汛期以西江过北江水流为主，枯水期也出现了西江过北江水流[2]。思贤滘过滘流量的变化导致西、北江分流比发生变化，北江的分流比在 20 世纪 70 年代以来显著增大，1972 年为 11.7%，80 年代增大为 14.2%，90 年代增大为 16.7%~23.0% [3]。北江洪水期分流比则由 1989 年的 15.2%增大到 1996 年的 26.8%，1996 年~2007 年整体略有减小，2008 年~2013 年在该段平均分流比上下略有波动[1]。以往对思贤滘分流比的研究多注重对年、汛期、枯期分流比的变化进行分析，对分流比变化引起的设计洪水成果变化研究较为欠缺。思贤滘是西北江三角洲河网一级分叉点，本文研究思贤滘节点洪水分流比变化，分析其对设计洪水的影响，为西北江三角洲泄洪情势分析、洪水出路安排等提供参考。

2. 洪水分流比变化分析

思贤滘为沟通西江和北江的重要水道，全长 1.2 km，地形呈两端低、中间高形态，思贤滘西江下游 4.5 km 处设有马口水文站，北江下游 1 km 处设有三水水文站，以往的研究或工作中常用马口站与三水站洪水流量叠加作为思贤滘断面洪水流量过程，本次延续该方法进行数据处理，得到思贤滘断面 1960 年~2018 年洪水流量过程。将思贤滘断面洪峰时刻三水站流量占思贤滘洪峰流量比例作为三水洪水分流比(即北江洪水分流比)，点绘历年及 5 年滑动平均洪水分流比过程图，如图 2 所示。由图 2 可见，除特枯水年 1963 年以外，20 世纪 90 年代以前三水洪水分流比变幅不大，5 年滑动平均在 19.6%~22.6%之间，1992 年以后，分流比明显增大，5 年滑动平均增加到 25%左右。

为进一步评估三水洪水分流比的变化趋势，采用 Mann-Kendall 非参数检验法对三水洪水分流比序列进行分析。Mann-Kendall 检测法作为一种非参数统计方法，具有无需事先对检测数据的分布进行假定且结果定量程度较高的特点，被广泛应用于水文及气象数据系列的趋势性诊断研究[4]，具体原理可以表示如下：

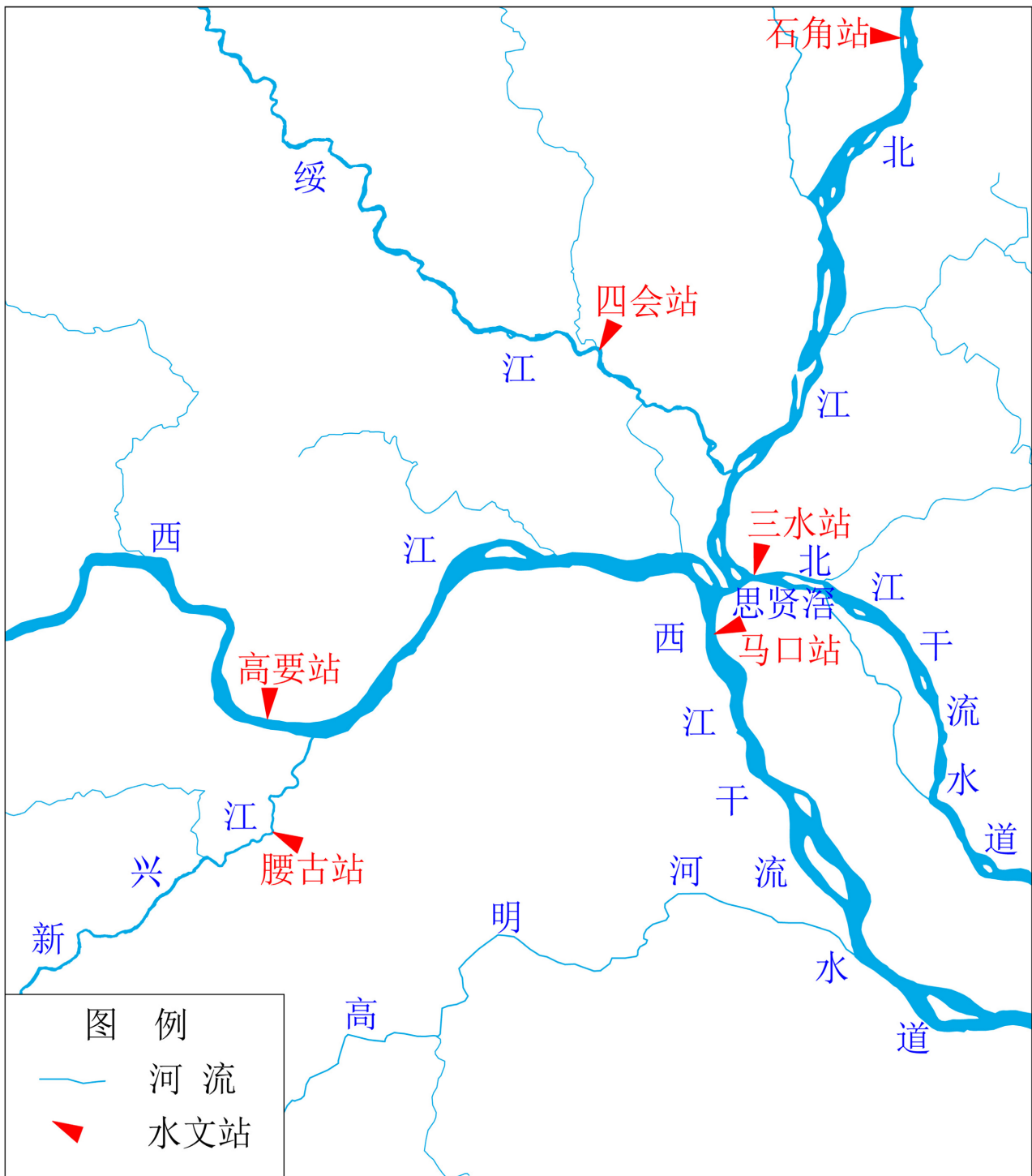


Figure 1. The sketch diagram of Sixianjiao Channel location
 图 1. 思贤滘位置示意图

假定存在一组平稳时间序列 $\{x_i\} (i=1,2,\dots,n)$ ，则可定义统计量 S ，如公式(1)所示：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{1}$$

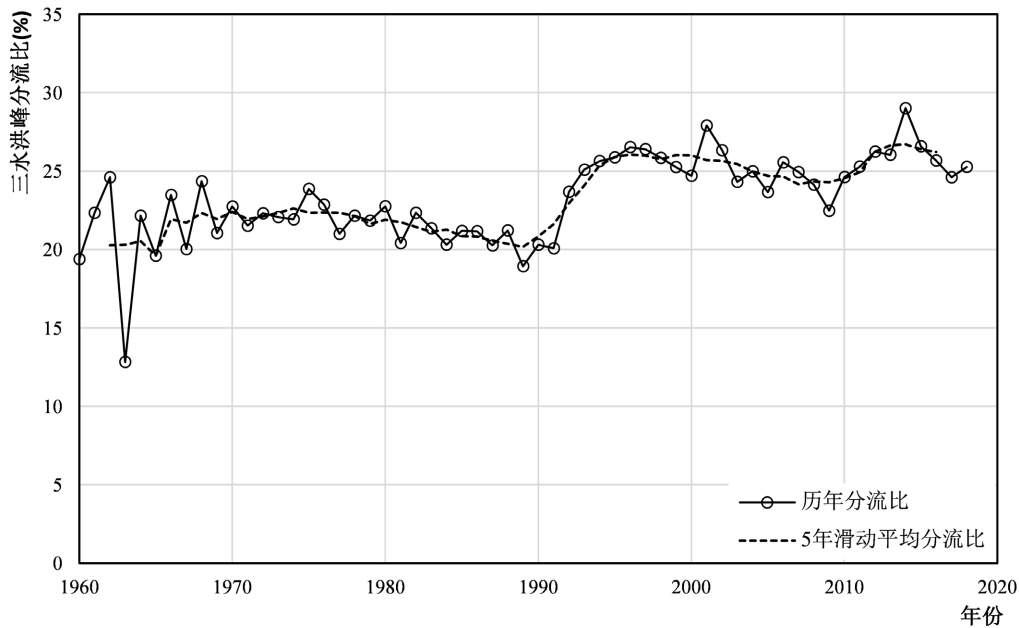


Figure 2. Variation process diagram of Sanshui diversion ratio of flood peak at Sixianjiao Section
图 2. 思贤滄断面洪峰三水分流比变化过程图

式中：
$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases}$$
， x_i 和 x_j 分别为平稳序列中第 i, j 个值。

记存在统计量 Z 如式(2)所示，

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\text{var}(S)$ 为 S 方差， $Z > 0$ ，序列为上升趋势， $Z < 0$ ，序列为下降趋势；若 $Z \in [-Z_{1-\alpha/2}, Z_{1-\alpha/2}]$ ，则表明该数据系列变化趋势并不显著，反之，则存在显著变化趋势。

采用 Mann-Kendall 检验法对三水洪水分流比序列进行趋势性分析， $Z_{1-\alpha/2}$ 取值为 1.64，即对应置信度为 90% 的显著性检验，检验结果如表 1。检验结果表明，三水洪水分流比序列对应 M-K 统计量大于 0，呈现上升趋势，并且通过了置信度为 90% 的显著性检验，表明上升趋势显著。

Table 1. Trend test results of Sanshui flood diversion ratio series

表 1. 三水洪水分流比序列趋势性检验结果

测站	M-K 统计量	显著性
三水	6.69	显著

为进一步分析分流比变化对洪水系列一致性的影响，采用 Pettitt 检验法对马口、三水、思贤滄洪峰序列突变性进行分析。Pettitt 检测法是一种诊断数据序列突变点的非参数统计方法，该方法可以对水文气象要素序列进

行突变分析获得突变点, 量化突变点在统计意义上的显著水平[5]。该方法采用 Mann-Whitney 统计量来检测平稳系列 $\{x_i\}$ 内某一突变点 t 前后两组系列是否存在显著差异, 原理如下:

记存在统计量 $U_{t,n}$ 如式(3)所示:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_t - x_i) \quad (3)$$

根据统计量可计算:

$$K_t = \max |U_t| (1 < t \leq n) \quad (4)$$

$$P = 2 \exp \left\{ -6K_t^2 / (n^3 + n^2) \right\} \quad (5)$$

式中: x_t 与 x_i 分别为第 t 个与第 i 个样本, sgn 函数与 Mann-Kendall 法中一致, 本次研究假定当 $P \leq 0.1$, t 点为该数据系列内的显著突变点。

采用 Pettitt 检验法对马口、三水、思贤滄洪峰序列的突变特性进行分析, 基于 90% 置信度的显著性检验结果确定了各站年平均流量序列的可能突变点, 具体如表 2 所示。由检验结果可以看出, 各测站/断面洪峰序列可能的突变点集中在 20 世纪 90 年代初期, 三水洪峰序列通过了 90% 置信度的显著性检验, 有明显突变。

Table 2. Mutation test results of flood peak sequences in the Makou, Sanshui and Sixianjiao

表 2. 马口、三水、思贤滄洪峰序列突变性检验结果

测站/断面	可能突变点	统计量/P	显著性
马口	1993	634/0.48	不显著
三水	1991	1398/0.002	显著
思贤滄	1993	845/0.16	不显著

3. 分流比变化成因及趋势分析

前述分析表明, 思贤滄断面洪水分流比在 20 世纪 90 年代以来发生了较大变化, 三水洪水分流比呈现显著上升趋势, 受分流比变化影响, 三水站洪峰序列在 20 世纪 90 年代初期发生明显突变。鉴于思贤滄水道两端低、中间高的纵向形态, 水道无闸控制, 其过滄流量受西、北江河道演变影响。点绘历年马口、三水站测流断面 5 m (珠基, 下同) 以下过水面积变化图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 马口站 5 m 以下过水面积在 1994 年以前变化不大, 1997 年~2003 年间略有增加, 2004 年~2006 年增幅明显, 其后有所回落直至基本稳定; 三水站 5 m 以下过水面积在 1992 年以前变化不大, 1994 年~2006 年间持续增加, 其后基本稳定。统计不同年代过水面积变化情况 (见表 3), 结合三水洪水分流比 (见图 2) 分析, 1992 年以前分流比变化不大, 期间马口、三水站 5 m 以下过水面积基本稳定, 1993 年~2003 年三水站 5 m 以下过水面积均值较 1965 年~1992 年增加 40.7%, 同时期马口站过水面积变幅较小, 受两江断面不均匀下切影响, 三水洪水分流比显著增大; 2004 年~2010 年期间西江马口站过水面积增幅大于北江三水站, 期间三水洪水分流比略有回落; 其后分流比趋于稳定。

河道形态变化是思贤滄分流比发生变化的主要影响因素。据相关调查研究[6], 1984 年~2003 年整个珠江三角洲采砂总量达 13.36 亿 m^3 , 而珠江三角洲的年淤积量为 800 万~1000 万 m^3 。结合不同年代来沙量分析, 20 世纪 90 年代以前西江下游(高要站)年输沙量 7330 万 t, 其后至 2005 年的大型水库建设期年输沙量逐渐减小, 2005 年以后随着流域大型水库基本建设完成, 西江下游年输沙量已减少为 1730 万 t, 约为建库前的 23.6%; 北江以 1999 年飞来峡水利枢纽建成为分界点, 1999 年以前北江下游(石角站)年输沙量 601 万 t, 1999 年以后减少为 412 万 t, 不到 1999 年以前的 7 成。受水利工程拦蓄影响, 西、北江来沙量均不同程度减少以及珠江三角洲河道 2008

年开始全线禁止采砂的影响，马口、三水站自 2010 年以来大断面基本稳定。西江航运干线最后一个梯级长洲水利枢纽，北江下游飞来峡、清远水利枢纽均已建成运行，未来上游来沙量不会发生大的改变。《珠江流域重要河段河道采砂管理规划(2021~2025 年)》[7]已于 2021 年 7 月获水利部批复，将作为珠江流域河道采砂管理的重要依据。该规划将珠江三角洲河网区全部区域划分为禁采河段，在现状来水来沙条件下西、北江水道下游河道断面不会发生大的变化，思贤滘分流比在较长的一段时间内会维持基本稳定。

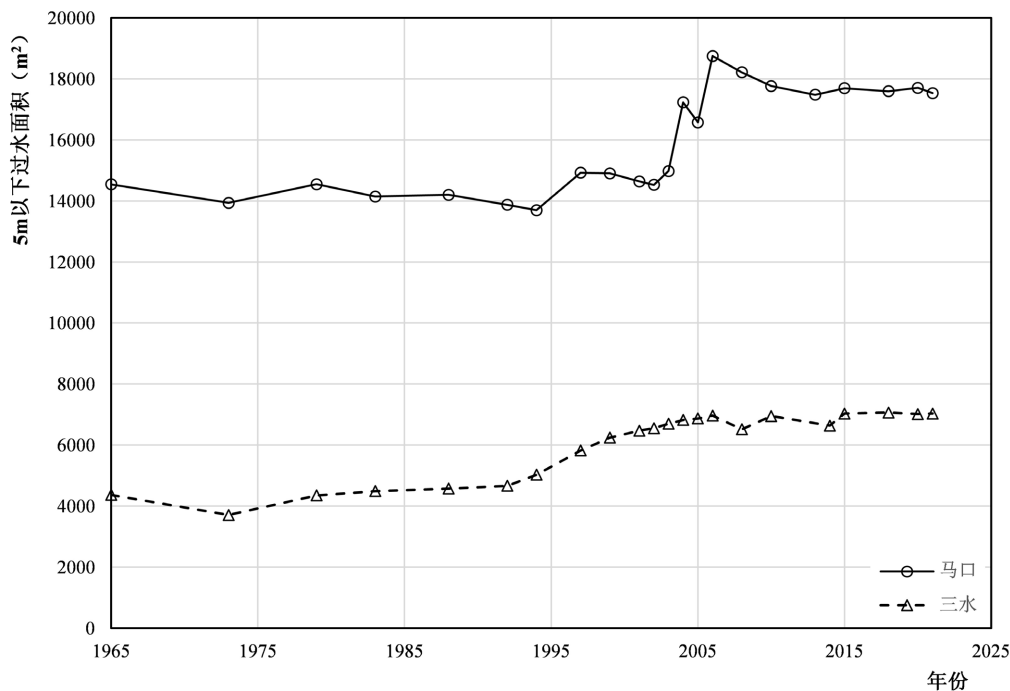


Figure 3. Variation of discharge area under 5 m in Makou and Sanshui stations
图 3. 马口、三水站 5 m 以下过水面积变化图

Table 3. Variation of discharge area under 5 m in Makou and Sanshui stations in different years
表 3. 马口、三水站 5 m 以下过水面积不同年代变化情况表

年代	马口		三水	
	5 m 以下过水面积(m²)	增幅(%)	5 m 以下过水面积(m²)	增幅(%)
1965~1992	14,209		4361	
1993~2003	14,614	2.8	6137	40.7
2004~2010	17,708	21.2	6826	11.2
2011~2021	17,604	-0.6	6957	1.9

4. 马口、三水洪水系列还现

根据前述分析，思贤滘年最大洪峰时三水站分流比均在 20 世纪 90 年代初期发生显著变化，其后三水分流比维持在一个较高的水平，马口、三水、思贤滘洪峰序列在 1991 年~1993 年之间发生突变，其中三水站洪峰序列突变明显。以 1993 年为分界点，分析马口、三水站与思贤滘断面年最大洪峰的相关关系，如图 4~图 5 所示。由图 4~图 5 知，以 1993 年为分界点分两段建立的马口、三水站与思贤滘断面年最大洪峰相关关系较好，相关系数 R^2 均在 0.97 以上，1993 年以后的两条关系线斜率之和为 1，截距之和大于 0，符合实际。

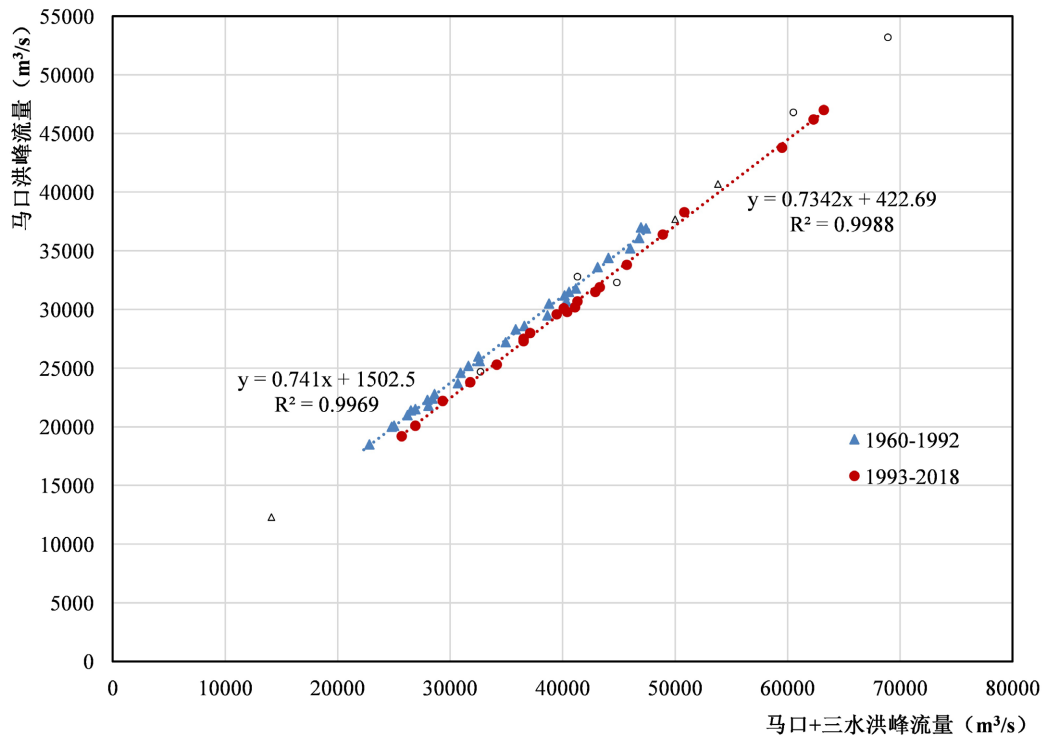


Figure 4. Correlation diagram of flood peak discharge of Makou Station and Sixianjiao Section

图 4. 马口站与思贤涪断面洪峰流量相关关系图

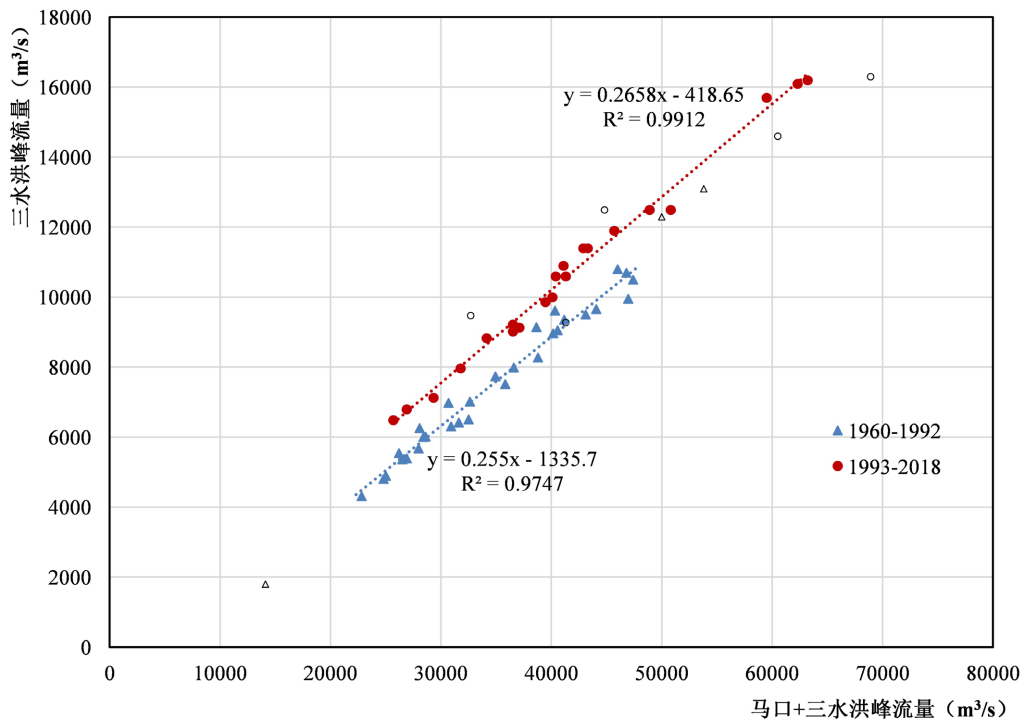


Figure 5. Correlation diagram of flood peak discharge of Sanshui Station and Sixianjiao section

图 5. 三水站与思贤涪断面洪峰流量相关关系图

根据未来维持上游来沙减少、清水下泄的情势，思贤滘分流比还处在缓慢的调整期，但在较长的一段时间内不会发生显著变化，按建立的 1993 年以后马口、三水与思贤滘断面相关关系对两站 1992 年以前洪峰进行还原，对于 1998 年以后的归槽年份洪水按归槽与天然洪水相关关系换算为天然洪水，得到马口、三水区现状分流比条件下的天然洪峰流量序列，还原前后天然洪峰序列对比情况见表 4。这种还原，实际是考虑上游建库等人类活动对天然洪峰序列的影响，可进一步在此基础上对设计洪水作出调整。

Table 4. Comparison of flood peak sequence before and after the return of Makou and Sanshui stations

表 4. 马口、三水区还原前后洪峰序列对比情况表

测站/断面	1900~1992 年均值/(m ³ /s)		占思贤滘比例/%	
	实测	还原后	实测	还原后
马口	28,700	27,400	78.1	74.6
三水	8050	9350	21.9	25.4
思贤滘	36,700			

5. 设计洪水调整建议

马口、三水区设计洪水成果是西北江三角洲泄洪情势分析、洪水出路安排等工作的基础。鉴于 20 世纪 90 年代以来思贤滘分流比发生的显著变化以及西、北江中下游洪水归槽对实测洪水的影响，建议设计洪水分析时以马口、三水区洪水流量过程合成思贤滘断面洪水序列，进行一致性处理后分析得到思贤滘断面设计洪水成果，再按现状基本稳定的分流比或预测的分流比折算得到马口、三水区设计洪水成果，以指导西北江三角洲泄洪情势分析、洪水出路安排等工作。本次研究经分析思贤滘分流比在较长的一段时间内会维持基本稳定，按现状分流比折算得到马口、三水区归槽设计洪水成果，与《珠江流域主要水文设计成果复核报告》[8]成果(以下称“原成果”)比较(见表 5)，三水区 2% 以上频率相差超过 5%，建议结合断面水位流量关系，在适当时间对原成果进行修订比较。

Table 5. Recheck table of design flood results for trunking of Makou and Sanshui stations

表 5. 马口、三水区归槽设计洪水成果复核表

测站	项目	各级频率设计值/(m ³ /s)				
		1%	2%	3.33%	5%	10%
马口	原成果	55,400	51,600	48,700	46,400	41,800
	本次研究	53,900	50,200	47,200	44,700	40,400
	相差(%)	-2.7	-2.7	-3.1	-3.7	-3.3
三水	原成果	18,200	16,700	15,400	14,600	12,800
	本次研究	19,000	17,600	16,500	15,600	14,000
	相差(%)	4.4	5.4	7.1	6.8	9.4

6. 结语

思贤滘是西北江三角洲网河区的顶点，思贤滘节点洪水分流比的变化，与西北江三角洲泄洪格局息息相关。思贤滘洪水分流比在 20 世纪 90 年代以前较为稳定，三水洪水分流比 5 年滑动平均在 19.6%~22.6% 之间，受西、北江三角洲无序采砂等导致的河道不均匀下切影响，1992 年以后，分流比发生了显著变化，三水洪水分流比 5 年滑动平均增加到 25% 左右。马口、三水区自 2010 年以来大断面基本稳定，且未来西、北江来水来沙条件不会

发生大的改变, 思贤滘分流比在较长的一段时间内会维持基本稳定。据此, 以 1993 年为分界点, 分析马口、三水站与思贤滘断面年最大洪峰的相关关系, 按 1993 年以后马口、三水与思贤滘断面相关关系对两站 1992 年以前洪峰进行还原, 经趋势性和突变性检验认为还原后序列一致性较好。基于上述分析, 建议马口、三水站设计洪水成果按现状分流比进行调整, 以指导新一轮防洪规划修编中西北江三角洲泄洪情势分析、洪水出路安排等工作。

参考文献

- [1] 王鑫, 黄剑威, 徐辉荣. 思贤滘近期水文情势分析[J]. 广东水利水电, 2005(11): 26-30.
WANG Xin, HUANG Jianwei and XU Huirong. Study of hydrological characteristics in Sixianjiao reach. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2005(11): 26-30. (in Chinese)
- [2] 柳喜军. 思贤滘过滘流量分析研究[J]. 人民珠江, 2008(2): 36-39, 45.
LIU Xijun. Analysis and research on Sixian Jiao over-jiao flow. Pearl River, 2008(2): 36-39, 45. (in Chinese)
- [3] 黄镇国, 张伟强. 珠江三角洲近期水沙分配的变化及其影响与对策[J]. 云南地理环境研究, 2006, 18(2): 21-27.
HUANG Zhenguo, ZHANG Weiqiang. The recent change of distributive ratios of runoff and stream load and its impacts and countermeasures in Zhujiang River Delta. Yunnan Geographic Environmental Research, 2006, 18(2): 21-27. (in Chinese)
- [4] 蓝云龙, 黎曙, 李霞, 等. 1956 年~2020 年黄河源区径流变化规律分析[J]. 陕西水利, 2022(6): 33-39.
LAN Yunlong, LI Shu, LI Xia, *et al.* Analysis on the change law of runoff in the source region of the Yellow River from 1956 to 2020. Shaanxi Water Resources, 2022(6): 33-39. (in Chinese)
- [5] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 652-665.
ZHANG Yinghua, SONG Xianfang. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: Advances and evaluation. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 652-665. (in Chinese)
- [6] 李虎成, 宫鹏杰, 丘佳永, 等. 珠江三角洲典型交汇河段河床演变分析[J]. 广东水利水电, 2018(8): 25-31, 50.
LI Hucheng, GONG Pengjie, QIU Jiayong, *et al.* Analysis of river bed evolution in typical intersection of Pearl River Delta. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2018(8): 25-31, 50. (in Chinese)
- [7] 水利部珠江水利委员会. 珠江流域重要河段河道采砂管理规划(2021~2025 年) [R]. 2021.
Pearl River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources. Management planning of river sand mining in important reaches of the Pearl River basin (2021-2025). 2021. (in Chinese)
- [8] 中水珠江规划勘测设计有限公司. 珠江流域主要水文设计成果复核报告[R]. 2018.
China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd. The revision of the main hydrological design results in the Pearl River basin. 2018. (in Chinese)