

# 气候变化下珠江三角洲网河区洪潮耦合高水位的集中期特征及变异规律

唐亦汉<sup>1,2</sup>, 陈晓宏<sup>1,2</sup>, 邓攀攀<sup>1,2</sup>

(1.中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州, 510275;  
2.广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州, 510275)

**摘要:**气候变化环境下三角洲感潮河段洪潮耦合条件改变。除高水位量级外,其集中期特征与变化规律也是体现三角洲洪水情势变异的重要因素。采用圆形分布法计算得到珠江三角洲16站的高水位集中日、集中度、高峰期的起止时间等集中期特征,并分析其多年变化规律。结果发现:(1)是否考虑水位量级对于由圆形分布法计算得到的水位集中性没有显著影响;(2)珠三角入口与口门站点的高水位集中期比网河站长;(3)入口与网河站的集中日相近,口门站集中日最迟;珠三角大部分站点的高水位集中日有延后倾向,而发生时间趋于集中稳定;(4)入口及口门站点的集中日波动性都高于网河区站,且珠三角集中日波动性有随时间推进而减小的趋势。研究结果为三角洲洪水情势变异分析提供了新角度,为珠江三角洲的高水位采样、频率分析及重现期设计值计算提供数据基础,并为区域防洪减灾政策制定提供理论支持。

**关键词:**高水位集中期;圆形分布法;珠江三角洲;洪潮耦合

中图分类号:TV122.2

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)03-0042-06

气候变化加速了地区水循环<sup>[1]</sup>。全球变暖抬高海平面,台风等极端事件的发生频率也随之增加<sup>[2]</sup>。三角洲地区因同时受到上游洪水、下游潮汐等影响因素的共同作用,对气候要素变化极为敏感<sup>[3]</sup>。全世界大型城市群多集中于三角洲地区,高密度的人口、经济进一步加剧了三角洲的洪水风险。研究变化环境条件下三角洲洪水的形成机制及变化规律,对地区经济安全具有重要意义。上洪下潮的耦合条件下,三角洲更易出现极端洪水<sup>[4]</sup>。洪潮耦合得到的极值水位及其出现时间都与潮汐规律、上游洪水等有着密切联系<sup>[5]</sup>。其中,高水位出现的时间本身是一个随机变量,有着自身的变化规律<sup>[6]</sup>。它既是提取高水位样本的重要根据,也是反应环境变化影响的重要指标<sup>[7]</sup>。珠江三角洲经济发达、人口集中,上游洪水特征改变且下游口门区海平面上升显著<sup>[9]</sup>,研究该区的洪水特征变化对珠三角防洪政策

制定有重要意义。针对珠江三角洲高水位特征及变化规律研究,已有研究侧重于水位量级的研究<sup>[11]</sup>,而针对三角洲流域高水位出现时间的研究有限。

本文借鉴了上游流域因水库调度需要所采用的极值集中性分析方法,对三角洲感潮河段高水位出现时间的特征与变化规律进行研究。已有用于分析极值集中性的数理统计方法对数据信息利用不充分<sup>[14]</sup>,过程繁复而所得集中性结果不够直观明确<sup>[16]</sup>。Downs<sup>[18]</sup>在1966年基于矢量统计提出的圆形分布法,因其能简单有效地利用小数据量样本信息,被广泛运用于各类样本时间集中性分析中。该法曾被运用于药品不良反应发生的时间规律及人口出生日期供新思路和新信息,为高水位的合理取样与频率分析提供数据基础,并为珠江三角洲制定合理的防洪政策提供重要的理论依据。

收稿日期:2016-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(91547202,51210013,51479216,51379223,51479217);国家科技支撑计划(2012BAC21B0103);广东省水利科技创新项目(2011-11)

作者简介:唐亦汉(1991-),女,江苏无锡人,博士研究生,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:olivia.tang@qq.com

通讯作者:陈晓宏(1963-),男,湖北公安人,教授,博士,博士生导师,主要从事水文水资源与水环境方面的研究。E-mail:eescxh@mail.sysu.edu.cn

## 1 研究区与数据来源

珠江三角洲位于广东省中南部珠江下游,集水面积为 26 820 km<sup>2</sup>(见图 1)。该流域属亚热带季风气候,雨量充沛。该流域受锋面、热带气旋等天气系统的影响,每年 6~8 月易形成暴雨洪水。由西、北江水道互相贯通,在马口与三水汇入网河区形成西北江三角洲。该区主要水道近百条,总长约 1 600 km。网河区径流经由虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门及崖门等八大口门入海。珠三角出海口根据潮流特征与风暴潮发生特性,可分为伶仃洋、磨刀门外海区及黄茅海三个片区<sup>[22]</sup>。

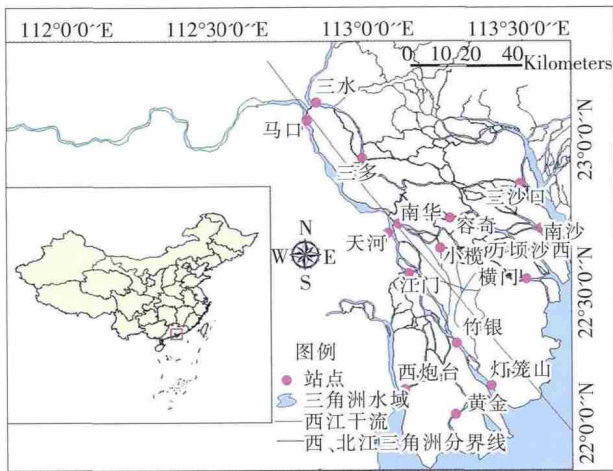


图 1 研究区与站点位置示意图

Fig.1 The location of the study area and hydrometry stations

采用马口等 16 个站点 1958~2011 年的年最大值实测高水位的量级及其对应时间信息进行珠江三角洲的高水位季度性特征及变异研究。数据来自于珠江水利委员会水文局,部分摘录于中华人民共和国水文年鉴,符合三性审查。

## 2 研究方法

圆形分布法是将具有周期性变化的资料,通过三角函数变换,使原始数据转化为线性资料的一种统计学方法<sup>[6]</sup>。该方法基本原理是当数据资料有集中分布的倾向时,假设计算期内总天数为  $T$ ,根据第个洪水样本的发生时间,计算其角度值  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = D_i \frac{2\pi}{T}, 0 \leq \alpha_i \leq 2\pi \quad (1)$$

继而通过以下方程式(公式 2~3)将高水位事件发生时间引入二维坐标值  $(x_i, y_i)$ , 从而实现可以将资料

转化为三角函数,通过圆形分布来体现,从而得出资料的集中分布期。

$$(x_i, y_i) = \begin{cases} (\cos \alpha_i, \sin \alpha_i) \cdots (\text{不计量级}) \\ (q_i \cos \alpha_i, q_i \sin \alpha_i) \cdots (\text{计量级}) \end{cases} \quad (2)$$

$$(X, Y) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \cdots (\text{不计量级}) \\ \left( \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{\sum_{i=1}^N q_i}, \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N q_i} \right) \cdots (\text{计量级}) \end{cases} \quad (3)$$

$$D = a - \frac{T}{2\pi} \quad (4)$$

$$D_f = \frac{a-s}{2\pi} \quad (5)$$

$$D_l = \frac{a+s}{2\pi} \quad (6)$$

式中:  $N$  为样本容量;  $q_i$  为水位量级;  $D$  为计算期内集中期对应集中日;  $D_f$ 、 $D_l$  分别为高峰期的起止日期。

同时,可以通过以下公式(公式 7~8)计算得到高水位事件发生的集中度  $r$  和标准差  $s$ 。其中,集中度  $r$  是圆形分布法中描述  $a_i$  集中趋势的一种统计指标,用于表征集中期内样本集中程度。当  $r > 0.55$  时,表示事件集中在某一时期,反之,当  $r < 0.35$  时,事件在时间上的分布不集中。

$$r = \begin{cases} \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{N}} & \text{不考虑量级} \\ \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{\sum_{i=1}^N q_i}} & \text{考虑量级} \end{cases} \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (7)$$

$$s = \sqrt{-2 \ln r} \quad (8)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 样本量级对高水位集中期的影响

本文定义一个平年的圆周期含有 365d, 闰年则采用 366d。采用圆形分布法计算极值样本集中期时,常见考虑量级与不考虑量级的两种情况。相较于后者的集中度分析,前者的计算不仅考虑了样本在不同时间段出现频率的差异,还计算了样本数值的影响。为了解样本量级对集中期计算的影响,本文以马口、南华及横门站为例,同时计算了考虑水位量级和不考虑水

位量级两种情况下的高水位发生集中时间及离散度,结果如图 2 所示。计算所得各站集中度、集中期、集中日、高峰期起止时间等特征值则如表 1 所示。

以南华站结果为例,不论是否考虑样本量级,南华站的年最高洪潮水位集中期均在 6 月上旬至 8 月上旬之间。年极值水位样本的量级,对当站集中度计

表1 代表站圆形分布法分期结果  
Table1 Sub-season divided by circular distribution method of representative stations

位置	站名	考虑量级	$r$	$s$	$D$	$P$	站点	$r$	$s$	$D$	$P$
入口	马口	是	0.86	0.55	7 月 31 日	6 月 29~9 月 2	三水	0.69	0.87	8 月 8 日	6 月 19~9 月 27
		否	0.85	0.57	8 月 1 日	6 月 29~9 月 3					
网河	南华	是	0.87	0.53	7 月 5 日	6 月 4~8 月 5	容奇	0.90	0.47	7 月 2 日	6 月 5~7 月 29
		否	0.86	0.55	7 月 6 日	6 月 4~8 月 8					
口门	横门	是	0.76	0.74	7 月 30 日	6 月 17~9 月 10	灯笼山	0.74	0.78	8 月 9 日	6 月 22~9 月 17
		否	0.76	0.75	7 月 28 日	6 月 15~9 月 10					

注:“是”表示考虑量级,“否”表示不考虑量级; $P$ 表征高峰期起止时间;双线右侧均为考虑量级的计算结果。

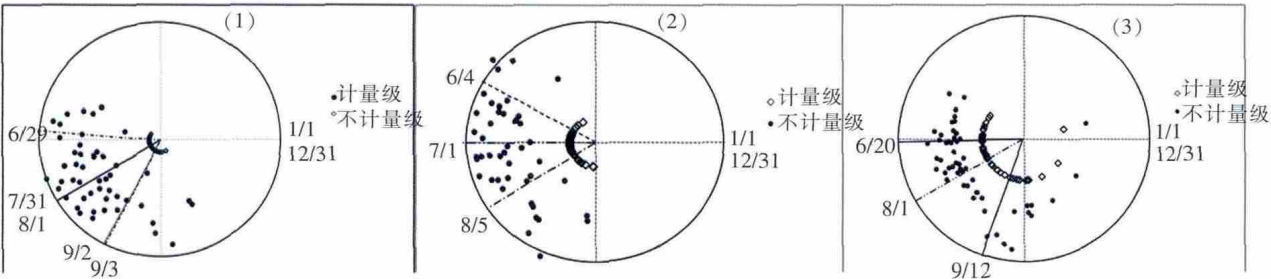


图 2 代表站点圆形分期结果图  
(1)马口;(2)南华;(3)横门  
Fig.2 The distribution and sub-season of flood peak by circular distribution method  
(1) Makou station; (2) Nanhua station; (3) Hengmen station

算结果的影响仅在 3d 以内(见表 1)。如图 2(2)所示,考虑样本量级的集中期内,样本量级(点所在位置与圆心距离)范围集中。就表征样本在集中期内离散程度的  $s$  来看,不考虑样本量级的离散程度比考虑量级的程度更高。结合图表内容不难推论,南华站高水位量级大的发生概率与集中期的集中程度成正比。由此,该站量级对集中期影响较小,二者集中性一致。

此外,横门站在考虑量级情况下的集中期与不考虑量级的结果相距 2d,且离散程度仅相差 0.1(见图 2,表 1)。同时,位于三角洲入口处的马口站在两类计算条件下的结果也基本一致。综上所述,对于珠江三角洲站点的高水位发生集中期来说,是否考虑量级对计算结果影响较小。

3.2 代表站点集中期特征

因考虑量级对集中期结果影响不大,此后的站点结果均按照考虑量级的条件计算。为了解入口区、网河区及口门处不同区位的站点集中期特征,研究选取了

皆位于珠江三角洲的主干河道上 6 个站点进行研究。其中入口区、网河区及口门区的站点各 2 个(见表 1)。

三水与马口站的集中期分别为 7 月 31 日和 8 月 8 日,均在 7 月末 8 月初。南华站年极值出现的时间主要集中在 6 月 4 日~8 月 5 日之间,而集中日则为 7 月 5 日。南华站年高水位的集中日则与容奇站相近,均发生在 7 月初。横门站与灯笼山站的高水位年极值发生在 7 月末 8 月初。相对网河区的站点晚一个月,但与口门站点相近。同时,入口两站与口门两站的集中期持续时间近 3 个月(从 6 月中旬~9 月中旬),而网河区两站持续时间则仅有 2 个月。可见,入口及口门四个站点的高水位集中日发生比网河区两站的晚,且集中期时间更长。

从站点集中日的离散度上来看,南华、容奇站的离散程度最小,而口门站的离散度最大。入口两站的集中期离散度差异较大,位于西江三角洲的马口,离散度与网河区的两站相近,而三水的离散度则远高于



其他所有站点。三水站近30年因河道挖沙,受到西江流量影响增强<sup>[23]</sup>。相较于马口,三水水位受到的影响因素复杂,因此当站离散度对应更高。口门区不论集中时间还是集中的离散系数,同时受到西太平洋低气压、东亚夏季风及印度洋季风环流影响<sup>[24]</sup>。加之洋面的年周期波动,洋面低压造成珠三角河口区高潮位的时间持续较长,且时间、数值波动较大。

### 3.3 珠三角高水位集中期空间差异及变化规律

为进一步探究三角洲极值发生时间的空间规律,本次研究统一计算了16个站点三段高水位样本序列。第一段为全样本序列(以下简称“全序列”),由1958~2011年样本统计所得。第二段统计序列由1958~1987年的样本构成,以下简称“前序列”。第三段统计序列则由1982~2011年的样本构成,以下简称“后序列”。计算结果以7月31日作为基准(后称“标准日”),各站的高水位集中日先于该日标记为负,晚于该日标记为正。

在三类序列所得的集中日计算结果中,所有口门站的集中日都较标准日延迟9d以上。其中,横门高水位集中日时间最早。位于珠江口伶仃洋片区的万顷沙西、南沙及三沙口站,高水位集中日与黄金、西炮台的集中日时间相近。因三角洲在西北东南向上发育,灯笼山站受上游径流下泄出海的影响较其东北面口门站更大<sup>[25]</sup>,其高水位集中日较其他站10d以上。同时,黄金与西炮台来水为江门所在水道下游分支,上游沿口门下泄水量远小于灯笼山<sup>[27]</sup>。因此,此两站高水位集中日较灯笼山晚。就随年份变化的情况来看,所有口门的前序列的集中日均比后序列的发生更早。在海平面上升作用下,风暴潮出现频次增强,潮流上溯河口作用增加<sup>[9]</sup>,口门站高水位集中日在向后推移。其中,万顷沙西、南沙及三沙口后移时间递增。灯笼山后移20d。除横门外,其他口门站仅后移10d左右。在三类序列的离散程度上,横门与灯笼山的前序列均大于后序列,其余口门站点则相反。综上所述,口门站的集中日发生时间、变化规律及离散程度的差异与珠三角近海片区划分规律一致<sup>[22]</sup>。

就站点集中日及变化趋势来看,竹银站因网河密度高,水位受多口门下泄潮汐影响增强<sup>[28]</sup>,集中日则比标准日延迟16d。而南华和容奇站则在横门影响下,集中日较标准日提前20d以上,为珠三角最早。除竹银、南华和容奇外,入口站与网河区站点全序列的集中日皆在标准日后10d以内,站点后序列集中日总体较前序列滞后。在集中日波动性上,南华、容奇在网河区站

中最低。入口及网河区波动性相近,其中三水站波动性最大。就集中日波动性随时间的变化情况来看,除西炮台、黄金、万顷沙西、南沙及三沙口等口门站外,珠三角大部分站点的集中日波动性都随时间推进而减小。

## 4 结论与展望

(1)圆形分布法能够有效直观地判断站点水位资料的集中特性,间接体现出是否具有季节特性,通过该法计算所得的集中期结果合理、稳定。同时,水位量级对水位集中特性的计算影响较小,可忽略不计。

(2)珠江三角洲入口及口门站点的高水位集中期比网河区站时间更长。在集中日上,入口站与网河区站相近。高网河密度加强潮汐影响,竹银站集中日迟于其他网河区站16d。南华和容奇在横门水位影响下,集中日为珠三角最早。珠江三角洲大部分站点的集中日随时间变化延后,且发生时间趋于集中稳定。河口海平面上升影响下,高潮上溯,对三角洲感潮河段水位影响加强。

(3)珠江三角洲所有口门站1958~2011,1958~1987及1982~2011年三条序列的集中日都迟于入口站与网河区站。根据集中日时间及其随时间向后推移的变化程度,口门站可化分为近伶仃洋、近磨刀门与近黄茅海三类。

(4)三水近30年因河道挖沙,离散度为珠三角最高。网河区南华、容奇站的离散程度最小。入口及口门站点的波动性程度相近,高于网河区站。珠三角大部分站点的集中日波动性都随时间推进而减小。

文章揭示了珠江三角洲站点的高水位集中期特征及其变化规律,并分析了造成该现象的可能原因。对于河道变化、海平面上升等要素变化具体改变站点集中期特征的方式,尚有待进一步分析说明。此外,本文结果与结论仅仅为基于在站点特征期合理采样提供了理论基础。基于本文结论,珠江三角洲的水文情势变异特征,以及基于站点集中期特征重新采样,构建水位极值序列进行频率计算并设计重现期水位,还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006,25(6):1031-1040. (WANG Ying, CAO Mingkui, TAO Bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global

- warming [J]. Geographic Research, 2006,25(6):1031–1040. (in Chinese))
- [2] NEUMANN JE, EMANUE KA, RAVELA S, et al. Risks of coastal storm surge and the effect of sea level rise in the Red River delta, Vietnam [J]. Sustainability, 2015,7(6):6553–6572.
- [3] BRECHT H, DASGUPTA S, LAPLANTE B, et al. Sea-Level rise and storm surges high stakes for a small number of developing countries [J]. Journal of Environment Development. 2012,21(1):120–138.
- [4] 刘曾美,覃光华,陈子葵,等. 感潮河段水位与上游洪水和河口潮位的关联性研究[J]. 水利学报, 2013,44(11):1278–1285. (LIU Zengmei, QIN Guanghua, CHEN Zisen, et al. Study on the correlation of the water level of the tidal river with upstream flood and estuary tide level [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(11):1278–1285. (in Chinese))
- [5] 孔令婷. 感潮河段分期设计潮汐要素计算方法的研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (KONG Lingting. Study on Elements of Flood Season in Tidal River [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [6] 陈璐,郭生练,闫宝伟,等. 一种新的分期设计洪水计算方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010,43(1):21–26. (CHEN Lu, GUO Shenglian, YAN Baowei, et al. A new method for identification of flood seasons using directional statistics [J]. Journal of Wuhan University (Engineering), 2010,43(1):21–26. (in Chinese))
- [7] ALLAMANO P, LAIO F, CLAPS P. Effects of seasonality on the distribution of hydrological extremes [J]. Hydrol Earth Syst, 2011,8: 4789–4811.
- [8] 诸裕良,周允谦,许陈澄. 珠江三角洲洪水重现期变化研究[J]. 科学技术与工程, 2013,13(33):1671–1815. (CHU Yuliang, ZHOU Yunqian, XU Chencheng. Research on changes of flood level return period in Pearl River [J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(33):1671–1815.(in Chinese))
- [9] 葛全胜,方修琦,张雪芹,等. 20 世纪下半叶中国地理环境的巨大变化—关于全球环境变化区域研究的思考 [J]. 地理研究, 2005,24(3): 345–358. (GE Quansheng, FANG Xiuqi, ZHANG Xueqin, et al. Remarkable environmental changes in China during the past 50 years: a case study on regional research of global mental change [J]. Geographical Research, 2005,24(3):345–358. (in Chinese))
- [10] 何蕾,李国胜,李阔,等. 1959 年来珠江三角洲地区的海平面变化与趋势[J]. 地理研究, 2014,33(5):988–1000. (HE Lei, LI Guosheng, LI Kuo, et al. Changes and trends of sea level in the Pearl River delta in the last 50 years [J]. Geographical Research, 2014,33(5): 988–1000. (in Chinese))
- [11] 刘佑华,陈晓宏,陈永勤. 珠江三角洲典型站水位过程变异性的差异熵识别 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2002,41 (4):87–91. (LI Youhua, CHEN Xiaohong, CHEN Yongqin. Recongnition on change of stage process at typical gauge of the Pearl River Delta using different entropy theory [J]. Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science), 2002,41(4):87–91. (in Chinese))
- [12] 孔兰,陈晓宏,张强,等. 海平面上升对珠江口水位影响的分析[J]. 生态环境学报, 2010,19(2):390–393. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, ZHANG Qiang, et al. Impacts of rising sea level on water level changes along the Pearl River estuary, China [J]. Ecology and Environment Sciences, 2010,19(2):390–393. (in Chinese))
- [13] ZHANG Wei, YAN Yi-xin, ZHENG Jin-hai, et al. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River delta region[J]. China Global and Planetary Change, 2009,69(1–2): 35–47.
- [14] 史良如,陈继东. 利用水文气象和统计规律对海河流域中南部水库汛期控制运用的研究[J]. 水文, 1996,16(6):52–56. (SHI Liangru, CHEN Jidong. Study on flood control using hydro-meteorology and statistical laws at south-central Haihe River basin, China [J]. Journal of China Hydrology, 1996,16(6):52–56. (in Chinese))
- [15] 麻荣永. 百色水库洪水规律分析及其分期设计洪水推求[J]. 红水河, 1992,1(2):14–17. (MA Rongyong. Study on flood patterns and seasonal design flood estimation at Baise reservior, China [J]. Hong Shui River, 1992,1(2):14–17. (in Chinese))
- [16] 陈守煜. 从研究汛期描述水文系统模糊集分析的方法论[J]. 水科学进展, 1995,6(2):133–138. (CHEN Shouyu. Methodology of fuzzy sets analysis to hydro-logic system from research on flood period description [J]. Advances in Water Science, 1995,6(2):133–138. (in Chinese))
- [17] 侯玉,吴伯贤,郑国权. 分形理论用于洪水分期的初步探讨[J]. 水科学进展, 1999,10(2):140–143. (HOU Yu, WU Boxian, ZHENG Guoquan. Preliminary study on the seasonal periods classification of floods by using fractal theory [J]. Advances in Water Science, 1999,10(2): 140–143. (in Chinese))
- [18] DOWNS TD. Some relationships amongs the von mises distributions of different dimensions [J]. Biometrika, 1966(53):269–272.
- [19] 郭祖超. 昼时性或季节性流行病学资料的统计学分析[J]. 第四军医大学学报, 1980,(1):39–45. (GUO Zuchao. Statistical analysis on day time and seasonal epidemiological data [J]. Journal of the Fourth Military Medical University, 1980,(1):39–45. (in Chinese))
- [20] 郭祖超. 医用数理统计方法[M]. 北京:人民卫生出版社, 1988:122–140. (GUO Zuchao. Medical Mathematical Statistics [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1988:122–140. (in Chinese))
- [21] 方彬,郭生练,郭富强,等. 汛期分期的圆形分布法研究[J]. 水文, 2007,27(5):7–11. (FANG Bin, GUO Shenglian, GUO Fuqiang, et al. Identification od flood seasonality by circular distribution method [J]. Journal of China Hydrology, 2007,27(5):7–11. (in Chinese))
- [22] WU Xiaoming, DENG Jiaquan, CHENG Rongli, et al. A super-large tidal physical model for the Pearl River Estuary [A]. Proceedings of International Conference on Estuaries and Coasts[C]. Hangzhou, 2003:9–11.
- [23] LUO X.L, ZENG E.Y, Ji R.Y. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River delta, China [J]. Journal of Hydrology, 2007,(343):230–239.
- [24] FISCHER T, GEMMER M, LIU L, SU B. Change-points in

- climate extremes in the Zhujiang River basin, south China, 1961 - 2007 [J]. *Climatic Change*, 2012,110(3):783-799.
- [25]陈晓宏,张蕾,时钟. 珠江三角洲网河区水位特征空间变异性研究[J]. *水利学报*, 2004,(10):36-42. (CHEN Xiaohong, ZHANG Lei, SHI Zhong. Study on spatial variability of water levels in river net of Pearl River delta [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(10): 36-42. (in Chinese))
- [26]MAO Qingwen, SHI Ping, YIN Kedong, et al. Tides and tidal currents in the Pearl River estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2004,(24):1797 - 1808.
- [27]中山大学水资源与环境研究中心. 水文情势变化规律与演变趋势及非一致性水文频率分析研究报告 1.4[R]. 2015.11. (Water Resource and Environment Research Center, Sun Yat-sen University. Report of hydrological regime variation and evolution trends and nonuniformity in flood frequency analysis 1.4 [R]. 2015.11. (in Chinese))
- [28]TANG Yihan, XI Shufeng, CHEN Xiaohong, et al. Quantification of multiple climate change and human activity impact factors on flood regimes in the Pearl River delta of China [J]. *Advances in Meteorology*, 2016(2016):1-11.

## High Water Level Seasonality under Influence of Changing Climate Driven Flood-tide Coupling Mechanism: A Case Study of Pearl River Delta

TANG Yihan<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1,2</sup>, DENG Panpan<sup>1,2</sup>

(1. *Water Resources and Environment Research Center of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;*

2. *Water Safety Control Engineering Technology Research Center in Guangdong of Southern China, Guangzhou 510275, China)*

**Abstract:** In deltas, the flood-tide coupling mechanism in tidal rivers changes under the impact of the climate change. Apart from the magnitude of high water level, the timing and its seasonality are also important factors that can reflect the varied flood regime. This research has adopted a directional statistics methodology, and generated the characteristics of high water level seasonality, i.e., the concentration time, ratio, period as well as the their changing patterns over the decades. The Pearl River Delta has been set as the study area, and the recording high water level along with the timing of 16 hydrological stations have been studied. The results show that: (1) there is no significant difference in the seasonality calculated by the circular distribution method with the magnitude of water level is considered; (2) the high water level concentration period of both outlet and income stations are longer than that of the river net; (3) the concentration date of outlet stations are similar to river net, and previous to that of income stations; the delay in the concentration time becomes stable around the whole Pearl River Delta; (4) the fluctuation of concentration date is stronger in the outlet and income stations than the river network, but the fluctuation becomes slight during the last four decades. The study provides a new perspective in analyzing delta flood variation, and a theoretical base for the sampling and frequency analysis of the high water level. It can serve as a theoretical support for making the regional flood protection policies.

**Key words:** high water level seasonality; directional statistics; Pearl River Delta; flood-tide coupling

(上接第 52 页)

## Water Storage Strategy for Yalong River Downstream Cascade Reservoirs Based on Total Quantity Control of Flood Control Capacity

ZHU Chengtao

(*Yalong River Hydropower Development Company, Ltd, Chengdu 610051, China*)

**Abstract:** According to the Yalong River cascade reservoirs flood control capacity requirements in the Flood Prevention Schemes for the Yangtze River, this paper analyzed the impact of the reserved flood control capacity of the cascade reservoirs on the water storage and power generation. According to the characteristics of the Yalong River hydropower development, this paper put forward the solution of total quantity control of flood control capacity, established maximizing energy storage period model based on total quantity control of flood control capacity, analyzed the cascade reservoirs optimal storage schemes for 9 different inflow conditions, and offered the overall optimization strategy of cascade reservoir water storage.

**Key words:** flood control capacity; total amount control; Yalong River; water storage strategy