

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.001

# 基于线性矩法的珠江三角洲区域洪水频率分析

杨 涛<sup>1,2</sup> 陈 喜<sup>1</sup> 杨红卫<sup>3</sup> 谢海文<sup>4</sup>

( 1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;

2.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072 ;

3.南京市水利规划设计院有限责任公司 江苏 南京 210006 ;4.江苏省水文水资源勘测局南京分局 江苏 南京 210008 )

摘要 :采用线性矩法及珠江三角洲 19 个水位站近 50 a 的年最高实测洪水位 ,在水文站点一致性分析及水文相似区鉴别的基础上 ,进行区域洪水频率计算及空间特征分析 .结果表明 :整个珠江三角洲可划分为 3 个水文相似区 ,其形成动力机制各不相同 ,3 个水文相似区和非相似区的最佳分布函数各自不同 ,整个区域的洪水频率分布自上游( 内河地区 )到下游( 沿海地区 )逐渐减小 ,证明外海地区比上中游等其他地区面临更大的洪涝灾害威胁 .

关键词 :线性矩法 ;区域洪水频率 ;水文相似区 ;空间特征 ;珠江三角洲

中图分类号 :P333.2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980( 2009 )06-0615-05

近年来 ,区域频率分析方法在国际学术界洪水和枯水等频率分析方面得到了较多应用<sup>[1-3]</sup> ,该方法主要利用有实测资料地区的水文信息提高整个研究区域水文特征值的预测精度和可靠性 .Hosking 等<sup>[2]</sup>于 1993 年建议采用线性矩法进行区域洪水频率分析 ,后来许多学者相继将该方法应用于洪水和枯水频率分析问题中 ,得到了诸多有价值的研究成果<sup>[4-11]</sup> .本文借助国际水文界广泛应用的线性矩法分析珠江三角洲的区域洪水频率及其空间分布特征 ,以提高洪水频率分析的预测精度 .

## 1 线性矩法基本理论

线性矩来源于 Greenwood 等提出的概率权重矩( PWM ) .对于随机变量  $X$  ,第  $r$  阶概率权重矩定义如下<sup>[1-2]</sup> :

$$\beta_r = \int_0^1 x(F)F^r dF \quad (r = 1, 2, 3, \dots) \tag{1}$$

式中 : $F(x)$ ——随机变量  $X$  的分布函数 ; $x$ ——概率为  $F$  时的反函数值 .随机变量  $X$  的第  $r+1$  阶线性矩定义为

$$\lambda_{r+1} = \int_0^1 x(F)P_r^*(F)dF = \sum_{k=0}^r \frac{(-1)^{r-k}(r+K)!}{(k!)(r-K)!} \beta_k \quad (r = 1, 2, 3, \dots) \tag{2}$$

从式(2)可以看出 ,随机变量  $X$  的线性矩是概率权重矩的线性组合 .

一般在实际应用中 ,需利用有限的样本数来计算样本线性矩 .假设随机变量  $X$  有  $n$  个样本 ,按从小到大排序 ,即  $x_1/n \leq x_2/n \leq \dots \leq x_n/n$  , $x_i/n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )为在  $n$  个值中第  $i$  小的值 .与随机变量  $X$  的线性矩类似 ,前  $r+1$  阶样本线性矩定义为<sup>[2]</sup>

$$l_{r+1} = \sum_{k=0}^r \frac{(-1)^{r-k}(r+k)!}{(k!)(r-k)!} b_k \quad (r = 1, 2, 3, \dots) \tag{3}$$

其中

$$b_k = n^{-1} \sum_{i=k+1}^n \frac{(i-1)(i-2)\dots(r-k)}{(n-1)(n-2)\dots(n-k)} x_{i:n} \quad (k = 0, 1, \dots, n-1) \tag{4}$$

式中  $b_k$  为概率权重矩  $\beta_k$  的无偏估计值 .

样本线性矩系数定义为

$$t = l_2/l_1 \quad t_r = l_r/l_2 \quad (r = 3, 4, \dots) \tag{5}$$

2 研究区概况

珠江三角洲是西江、北江和东江下游的冲积平原,也是全世界河网密度最大最复杂的河口三角洲之一,河网密度 0.68 ~ 1.07 km/km<sup>2</sup>,大小河流纵横交错,相互贯通<sup>[10]</sup>。剧烈的人类活动和自然变化,包括河道变迁、口门淤积及全球气候变暖导致的海平面上升等,使珠江三角洲地区的经济发展与洪涝灾害风险的矛盾愈加尖锐,因此,研究珠江三角洲洪水极值的区域洪水频率对制定区域社会与经济的可持续发展战略具有很重要的现实意义。本文收集并整理了珠三角地区 19 个水文测站(1958 ~ 2004 年)年最高实测洪水位资料,采用以线性矩法(L-moments)为基础的区域频率分析来研究该区域洪水极值在复杂环境下的频率特征。

3 区域洪水频率分析

区域频率分析一般包括以下 3 个主要步骤:各个站点的一致性检验、水文相似区分析及区域分布函数的选择、区域频率计算<sup>[2,4-5]</sup>。

3.1 一致性检验

如果某个区域有  $N$  个站点,令  $u_i = (t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)})^T$  为第  $i$  个站点的线性矩系数矩阵。区域线性矩系数的算术平均值为  $\bar{u} = \sum_{i=1}^N u_i / N$ ,则第  $i$  个站点的一致性检验系数定义为

$$D_i = \frac{1}{3} (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \tag{6}$$

其中 
$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T$$

根据 Hosking 等<sup>[2]</sup>研究结果,15 站以上  $D_i$  的阈值小于 3 可认为通过一致性检验。对比检验结果, $D_i$  全部小于 3,因此,珠江三角洲 19 个测站全部通过水文一致性检验。

3.2 水文相似区分析及区域分布函数的选择

假定研究区域有  $N$  个站点,第  $i$  个站点的样本长度为  $n_i$ ,则以样本长度为权重的区域平均线性矩系数分别为<sup>[2]</sup>

$$t^{(R)} = \sum_{i=1}^N n_i t^{(i)} / \sum_{i=1}^N n_i \quad t_3^{(R)} = \sum_{i=1}^N n_i t_3^{(i)} / \sum_{i=1}^N n_i \quad t_4^{(R)} = \sum_{i=1}^N n_i t_4^{(i)} / \sum_{i=1}^N n_i \tag{7}$$

以样本长度为权重的样本线性矩系数  $t$  的均方差为

$$V_1 = \left[ \sum_{i=1}^N n_i (t^{(i)} - t^{(R)})^2 / \sum_{i=1}^N n_i \right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

为了判别由这些站点所组成的区域是否为水文相似区,采用 Monte-Carlo 统计试验方法得到模拟值  $V$  序列。假设模拟区也有  $N$  个站点,每个站点都符合 Kappa 分布,且与实际站点具有同样的样本长度,由式(7)和式(8)计算生成样本模拟值  $V$ 。重复模拟  $N_{sim}$  次得到  $N_{sim}$  个模拟值  $V$ 。根据  $N_{sim}$  个样本计算  $V$  的均值  $\mu_V$  和均方差  $\sigma_V$ 。则水文相似区检验系数  $H$  为

$$H_1 = \frac{V_1 - \mu_V}{\sigma_V} \quad H_2 = \frac{V_2 - \mu_V}{\sigma_V} \quad H_3 = \frac{V_3 - \mu_V}{\sigma_V} \tag{9}$$

Hosking 等<sup>[2]</sup>经研究认为,如果  $H < 1$  (满足  $H_1, H_2, H_3$  中 2 个或 3 个小于 1,下同),则可以将该区域看成为水文相似区;如果  $1 \leq H \leq 2$ ,则可能为非相似区;如果  $H \geq 2$ ,则一般为非相似区。一般情况下, $N_{sim} = 500$  次就可以得到较好的精度,分析结果见表 1。

区域分布函数可以用检验系数  $Z^{DIST}$  加以判别:

$$Z^{DIST} = (\tau_4^{DIST} - \bar{t}_4 + \beta_4) / \sigma_4 \tag{10}$$

其中 
$$\beta_4 = \sum_{m=1}^{N_{sim}} (\bar{t}_4^{(m)} - \bar{t}_4) / N_{sim} \quad \sigma_4 = \left\{ (N_{sim} - 1)^{-1} \left[ \sum_{m=1}^{N_{sim}} (\bar{t}_4^{(m)} - \bar{t}_4)^2 - N_{sim} \beta_4^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中： $\tau_4^{\text{DIST}}$ ——由 DIST 分布函数模拟得到的区域平均值； $\bar{t}_4$ ——由实际区域得到的区域平均值； $\bar{t}_4^{(m)}$ ——样本的区域平均 4 阶线性矩系数（假定检验区域分布线型为 4 参数的 Kappa 分布，令区域平均线性矩系数为其分布函数的线性矩，利用 Monte-Carlo 试验方法生成第  $m$  个样本）； $B_4, \sigma_4$ ——从 Kappa 分布模拟得到的  $\bar{t}_4^{(m)}$  的偏差和均方差。一般而言，如果  $|Z^{\text{DIST}}| \leq 1.64^{[3]}$ ，则可以采用该分布作为统一的区域分布函数，如果满足条件的分布函数不止一个，通常取  $|Z^{\text{DIST}}|$  最小的分布函数作为最佳分布。

由表 1 结果可知，水文 1 区位于三角洲上中游，其水位极值主要受上游西江和北江来水联合影响，水文 2 区属于东江三角洲下游，河网众多，水位极值主要受上游来水（东江及流溪河）和内海潮汛影响，水文 3 区紧靠外海，主要受潮汛顶托及海平面变化影响，因此可知，影响上述 3 个水文分区的动力机制各不相同。

表 1 珠江三角洲水文相似区分析和区域洪水频率的最佳分布函数

| 水文分区    | 类 型    | 水文测站             | 水文相似系数 |        |       | 检验<br>系数 $Z^{\text{DIST}}$ | 分布函数 |
|---------|--------|------------------|--------|--------|-------|----------------------------|------|
|         |        |                  | $H_1$  | $H_2$  | $H_3$ |                            |      |
| 上中游 1 区 | 水文相似区  | 三水、马口、三多、南华和江门   | 0.65   | 0.64   | -1.26 | 0.50                       | GEV  |
| 下游 2 区  | 水文相似区  | 黄埔、大盛和泗胜围        | -0.96  | -1.54  | -0.91 | >1.64                      | WAK  |
| 下游 3 区  | 水文相似区  | 灯笼山、横门、黄冲、黄金和西炮台 | -0.68  | -1.69  | -2.06 | -1.11                      | GLO  |
| 整个三角洲   | 非水文相似区 | 三角洲 19 站         | 36.18* | 15.35* | 2.27* | 0.01                       | GLO  |

注：\* 代表未通过水文相似区分析，GLO 代表 Generalized logistic，GEV 代表 Generalized Extreme-value，WAK 代表 Wakeby distribution。

由于影响整个三角洲地区水文特征的主要因素不同，整个三角洲 19 站水文特征不存在统一分布，为非水文相似区（所有  $H_1, H_2, H_3 > 1$ ，未通过水文相似区测试），该区适用的分布函数为 GLO。但该区存在 3 个局部水文相似区（绝大多数  $H_1, H_2, H_3 < 1$ ，通过水文相似区测试）。其中，上中游 1 区适用的分布函数为 GEV，下游 2 区适用的分布函数为 WAK，下游 3 区适用的分布函数为 GLO。

3.3 区域频率计算与空间特征分析

对于各水文分区，分别采用表 1 所示的最佳分布函数进行估算并汇总，最终得到整个珠江三角洲地区的区域洪水频率，见表 2。

表 2 珠江三角洲区域洪水频率分析结果  
Table 2 Frequencies of flood levels in PRD region

| 水文站 | 不同洪水频率下的计算水位/m |            |            |            |            |           |           |           |             |              |
|-----|----------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|--------------|
|     | $P = 90\%$     | $P = 80\%$ | $P = 50\%$ | $P = 20\%$ | $P = 10\%$ | $P = 5\%$ | $P = 2\%$ | $P = 1\%$ | $P = 0.1\%$ | $P = 0.01\%$ |
| 大 盛 | 1.65           | 1.76       | 1.90       | 2.11       | 2.26       | 2.39      | 2.55      | 2.66      | 2.96        | 3.19         |
| 灯笼山 | 1.39           | 1.45       | 1.60       | 1.81       | 1.97       | 2.14      | 2.42      | 2.67      | 3.88        | 6.01         |
| 横 门 | 1.56           | 1.63       | 1.80       | 2.03       | 2.21       | 2.41      | 2.72      | 3.00      | 4.36        | 6.75         |
| 黄 冲 | 1.49           | 1.56       | 1.72       | 1.94       | 2.11       | 2.31      | 2.60      | 2.87      | 4.18        | 6.47         |
| 黄 金 | 1.37           | 1.43       | 1.58       | 1.78       | 1.94       | 2.11      | 2.39      | 2.63      | 3.83        | 5.93         |
| 黄 埔 | 1.68           | 1.80       | 1.93       | 2.15       | 2.30       | 2.43      | 2.60      | 2.71      | 3.02        | 3.25         |
| 江 门 | 2.40           | 2.76       | 3.47       | 4.19       | 4.56       | 4.86      | 5.15      | 5.33      | 5.73        | 5.94         |
| 老鸦港 | 1.70           | 1.83       | 2.08       | 2.38       | 2.57       | 2.78      | 3.06      | 3.29      | 4.21        | 5.41         |
| 马 口 | 4.89           | 5.61       | 7.05       | 8.53       | 9.28       | 9.88      | 10.48     | 10.85     | 11.66       | 12.08        |
| 南 华 | 2.93           | 3.36       | 4.22       | 5.11       | 5.56       | 5.91      | 6.28      | 6.49      | 6.98        | 7.23         |
| 南 沙 | 1.53           | 1.65       | 1.87       | 2.14       | 2.32       | 2.50      | 2.76      | 2.97      | 3.79        | 4.88         |
| 容 奇 | 2.17           | 2.34       | 2.66       | 3.04       | 3.30       | 3.55      | 3.91      | 4.21      | 5.38        | 6.93         |
| 三 多 | 3.36           | 3.86       | 4.85       | 5.86       | 6.38       | 6.79      | 7.21      | 7.46      | 8.01        | 8.31         |
| 三沙口 | 1.45           | 1.56       | 1.78       | 2.03       | 2.20       | 2.37      | 2.61      | 2.81      | 3.59        | 4.63         |
| 三 水 | 5.02           | 5.76       | 7.24       | 8.76       | 9.54       | 10.15     | 10.77     | 11.15     | 11.98       | 12.42        |
| 石 嘴 | 1.48           | 1.59       | 1.81       | 2.07       | 2.25       | 2.42      | 2.67      | 2.87      | 3.67        | 4.72         |
| 泗胜围 | 1.60           | 1.71       | 1.84       | 2.04       | 2.19       | 2.31      | 2.47      | 2.58      | 2.87        | 3.09         |
| 西炮台 | 1.49           | 1.56       | 1.72       | 1.95       | 2.12       | 2.31      | 2.61      | 2.88      | 4.18        | 6.48         |
| 竹 银 | 1.53           | 1.64       | 1.87       | 2.13       | 2.31       | 2.49      | 2.75      | 2.96      | 3.78        | 4.86         |

表 2 表明，各级洪水频率下整个珠江三角洲的水位空间分布自上游（内河地区）到下游（沿海地区）逐渐减小。不同洪水频率增量下水位增量见表 3，表 3 中， $P = 5\% \sim 1\%$  的水位增量均不如  $P = 1\% \sim 0.01\%$  的水位增量显著，后者（高重现期）远远大于前者（低重现期）。另外，从水文相似区角度看，靠近外海的下游 3 区（包

括5站)水位增量最快,位于东江下游2区(包括3站)最慢,而上中游1区(包括5站)居于二者之间.

表3 不同水文分区在不同频率变化下的水位增量

| 水文分区      | 水位增量/m           |                  |                    |                       |
|-----------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------|
|           | $P=5\% \sim 2\%$ | $P=2\% \sim 1\%$ | $P=1\% \sim 0.1\%$ | $P=0.1\% \sim 0.01\%$ |
| 下游3区(5站)  | 0.16             | 0.11             | 0.30               | 0.23                  |
| 下游2区(3站)  | 0.28             | 0.25             | 1.21               | 2.13                  |
| 上中游1区(5站) | 0.31             | 0.28             | 1.36               | 2.39                  |

4 结 论

(a)整个珠江三角洲可划分为3个水文相似区(1个位于上中游,2个位于下游),其形成动力机制各不相同;(b)对于水文相似区和非相似区,分别采用各自最佳的分布函数进行估算并汇总,最终得到整个珠江三角洲地区的区域洪水频率可以保证较高的分析精度;(c)不同洪水重现期分析结果表明整个区域的洪水频率分布自上游(内河地区)到下游(沿海地区)逐渐减小;(d)外海5站的洪水位增速最快,其次是上中游5站,增速最慢的是东江下游3站,证明外海地区面临的洪涝灾害威胁比上中游等其他地区更大.该结果可为制定珠江三角洲区域防洪规划提供重要科学依据.

参考文献:

[1] HOSKING J R M ,WALLIS J R. Some statistics useful in regional frequency analysis[J]. Water Resources Research ,1993 ,29( 2 ) :271-281.

[2] HOSKING J R M ,WALLIS J R. Regional frequency analysis-an approach based on L-moments[M]. New York :Cambridge University Press ,1997 :12217.

[3] HOSKING J R M. Fortran routines for use with the method of L-moments ,Version 31031 Research repor[R]. New York :IBM Research Division ,1996.

[4] 陈永勤 ,黄国如. 基于线性矩法的东江流域区域枯水频率分析[J]. 应用基础与工程科学学报 ,2005 ,13( 4 ) :409-416.( CHEN Yong-qin ,WANG Guo-ru. Regional low flow frequency calculation with L-moments method at Dongjiang basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering ,2005 ,13( 4 ) :409-416.( in Chinese ))

[5] 陈元芳 ,王庆荣 ,沙志贵 ,等. 线性矩法在长江中下游区域水文频率计算中的应用[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2002 ,31( 2 ) :207-211.( CHEN Yuan-fang ,WANG Qin-rong ,SHA Zhi-gui ,et al. Application of L-moment based regional flood frequency analysis method to middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2002 ,31( 2 ) :207-211.( in Chinese ))

[6] 熊立华 ,郭生练 ,王才君. 国外区域洪水频率分析方法研究进展[J]. 水科学进展 ,2004 ,15( 2 ) :261-267.( XIONG Li-hua ,GUO Sheng-lian ,WANG Cai-jun. Advance in regional flood frequency analysis from abroad[J]. Advances in Water Science ,2004 ,15( 2 ) :261-267.( in Chinese ))

[7] 熊立华 ,郭生练. L-矩在区域洪水频率分析中的应用[J]. 水力发电 ,2003 ,29( 3 ) :6-8.( XIONG Li-hua ,GUO Sheng-lian. Application of L-moments in the regional flood frequency analysis[J]. Water Power ,2003 ,29( 3 ) :6-8.( in Chinese ))

[8] 陈晓宏 ,陈永勤. 珠江三角洲网河区水文与地貌特征变异及其成因[J]. 地理学报 ,2002 ,57( 4 ) :429-436.( CHEN Xiao-hong ,CHEN Yong-qin. Hydrological change and its causes in the river network of the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica ,2002 ,57( 4 ) :429-436.( in Chinese ))

[9] 黄振平 ,林小丽 ,侯云青 ,等. P-Ⅲ型分布参数的矩估计与设计洪水的计算频率[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2005 ,33( 1 ) :49-51.( HUANG Zhen-ping ,LIN Xiao-li ,HOU Yun-qing ,et al. Moment estimation for parameters of Pearson Type-Ⅲ distribution and calculated frequency of design flood[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2005 ,33( 1 ) :49-51.( in Chinese ))

[10] 陈元芳 ,沙志贵 ,顾圣华 ,等. 可考虑历史洪水对数正态分布线性矩法的研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2003 ,31( 1 ) :80-83.( CHEN Yuan-fang ,SHA Zhi-gui ,GU Sheng-hua ,et al. Study on L-moment estimation method with consideration of historical floods for log-normal distribution[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2003 ,31( 1 ) :80-83.( in Chinese ))

[11] 邓正波. 岭回归在区域洪水频率分析中的应用[J]. 水利水电科技进展 ,2007 ,27( 增刊2 ) :49-51.( DENG Zheng-bo. Application of ridge regression in regional flood frequency analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2007 ,27( S2 ) :49-51.( in Chinese ))

Regional flood frequency analysis in Pearl River Delta  
region based on L-moments approach

YANG Tao<sup>1 2</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, YANG Hong-wei<sup>3</sup>, XIE Hai-wen<sup>4</sup>

( 1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,  
Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science ,  
Wuhan University , Wuhan 430072 , China ;

3. Nanjing Institute of Water Resources Planning and Designing Co. , Ltd. , Nanjing 210006 , China ;

4. Nanjing Branch of Jiangsu Provincial Bureau for Hydrology and Water Resources , Nanjing 210008 , China )

**Abstract** : Using the L-moments approach and the observed highest water levels in the Pearl River Delta ( PRD ) region at 19 hydrological stations over nearly 50 years , regional flood frequency analysis and spatial patterns were conducted and identified based on discordance test of hydrological stations and identification of hydrological homogeneity . The results indicate that the whole PRD region can be divided into three homogeneous regions with different formation mechanisms . The optimal distribution functions for the three homogeneous regions and the non-homogenous regions are found to be not identical . The flood frequency of the whole PRD region gradually decreases from upstream ( inland river regions ) to downstream ( coastal regions ) . This suggests that the coastal regions have a greater chance of flood disasters than the upper and middle reaches .

**Key words** : L-moments approach ; regional flood frequency ; homogeneous hydrological region ; spatial behavior ; Pearl River Delta

《河海大学学报( 哲学社会科学版 ) 》征订启事

( CN32-1521/C , ISSN1671-4970 , 季刊 , 自办发行 )

《河海大学学报( 哲学社会科学版 ) 》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和‘三个代表’重要思想为指导 , 认真贯彻落实科学发展观 , 坚持实事求是的思想路线 , 贯彻‘双百’方针 , 弘扬时代主旋律 , 理论联系实际 , 为社会主义物质文明与精神文明建设服务 .

《河海大学学报( 哲学社会科学版 ) 》为哲学与社会科学类学术期刊 , 主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、经济学、管理学等社会科学方面的学术性文章 , 可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考 . 《河海大学学报( 哲学社会科学版 ) 》为中国学术期刊( 光盘版 ) 入编期刊与中国学术期刊网入编期刊 .

《河海大学学报( 哲学社会科学版 ) 》由河海大学主办 , 每季末出版 , 国内外公开发行 . 2010 年每本定价 10 元 , 每本邮费 1 元 , 全年订费 44 元 , 欢迎广大读者直接向编辑部订阅 .

联系地址 南京市西康路 1 号 《河海大学学报( 哲学社会科学版 ) 》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786376

E-mail : sxb@hhu.edu.cn

网址 : http://kbb.hhu.edu.cn/sxb/index\_sxb.htm