

珠江三角洲典型站水位过程变异性的差异熵识别^{*}

刘佑华¹, 陈晓宏², 陈永勤³

- (1. 深圳市环境科学研究所, 广东 深圳 518008;
2. 中山大学地理系, 广东 广州 510275;
3. 香港中文大学地理系, 香港, 沙田)

摘 要: 采用差异信息熵理论, 建立了水位过程变异性识别的差异信息熵方法。以近 10 年来水文特征变异显著的珠江三角洲网河区南华、紫洞站近 40 年逐月长系列水位资料为典型, 进行水位变异性差异信息熵识别, 结果表明, 南华和紫洞站水位过程具有相似的变异特征, 南华站在 1966、1980 及 1992 年发生了异变, 紫洞站在 1967、1980 及 1992 年发生了异变。水位异变与珠江三角洲几次大规模人类活动十分一致。

关键词: 水位; 变异性; 差异信息熵; 识别

中图分类号: P131 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2002) 04-0087-05

20 世纪 60—70 年代, 珠江三角洲网河区通过整理堤系、联围筑闸、河道疏浚等进行了大规模的河道及口门整治, 这些整治工程无疑对提高土地利用、航运及防洪起到了很大作用^[1]。然而, 联围筑闸堵塞或控制了一些河汊, 导致大中洪水归槽, 主干河道泄洪流量增加, 分洪、蓄洪的能力减弱, 三角洲网河水位一度抬升。由于河道动力系统的调整, 至 20 世纪 80 年代初期三角洲网河水位又有所回复。80 年代开始, 三角洲河道大量挖沙, 使得河床不均匀下切。至 1999 年, 三水以下北江主要出水道河床平均下切 2.16 m, 马口以下西江干流河道河床平均下切 1.11 m。至 1998 年, 三水站同水位级的流量增加 50%~100%。但三角洲河口受海平面上升、潮流顶托作用, 拦门沙发育, 水流不畅, 三角洲腹地同时受上下游水流“挤压”而壅水明显, 洪水威胁加大。珠江三角洲水文特性发生了与以往规律不同的显著异变^{①,②}。

以往人们主要关注都市化的雨洪效应和水库控制后的径流量改变, 而对综合人类活动影响导致的整个系统水文特征的异变研究不多。美国河流洪水频率委员会^[2]指出“很少有关于人类活动对洪水量级及其频率影响事件的记录”。而美国 Mississippi 河 1993, 1995, 2001 年洪水, Red 河 1997 年洪水以及 Tar 河 1999 年洪水的重现期都受到人类活动影响而异变。Pinter 等^[3]对 Mississippi 河结合水位变化

趋势进行洪水频率重新计算表明, St Louis 站 1993 年洪峰重现期小于 100 年一遇, 远低于先前的一些计算结果。美国的 Republican 河 1977—1996 年阶段的平均径流深较 1949—1968 年阶段的平均径流深减少了约 40%^[4], 但模拟结果表明, 这一减少不完全是水文气象条件变化的结果, 而主要是由流域内修建水库(塘)、农业灌溉、植被改变以及水土保持等人类活动作用的结果。这些河流流域的水文异变特征与珠江三角洲网河区十分相似, 所不同的是美国这些流域的人类活动影响持续了 100 多 a, 而珠江三角洲则主要集中在近 40 a。

本文针对水文要素时间变异的一般特征, 采用差异信息熵理论, 以珠江三角洲网河区南华、紫洞站 1960—1998 年逐月长系列水位资料为研究典型, 识别其水位过程的变异性时间, 并与珠江三角洲网河区人类活动及水文特征变化的实际情况对比, 分析水位过程的异变与人类活动影响的对应性及识别结果的正确性。

1 序列的差异信息熵及其测度

设某一序列 $X = \{x_j, j \in J\}$, $J = \{1, 2, \dots, s\}$ 为有限集, $X \geq 0$, 当且仅当 X 具有下述内涵时, 称 X 为有限差异信息序列^[5]:

- (1) X 各分量值差异性越大, 序列所含的信息量

* 收稿日期: 2002-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49505005)

作者简介: 刘佑华 (1962-), 男, 高级工程师。

① 中山大学河口所. 珠江三角洲主要水道河床演变研究. 交通部“九五”攻关项目 95-05-01-53, 中期报告, 2000.

② 夏军, 谢平, 徐海亮. 变化环境下顺德河网水文频率分析与防洪对策研究. 研究报告, 1998.

就越大;

(2) X 各分量无差异性, 序列所含信息量为零。

需要说明的是, 该定义中的信息是指现实信息; 条件中所谓的差异性内涵, 是指对任何 x_i 和 x_j , 只要 $|x_i - x_j| > 0, i, j = 1, 2, \dots, s, i \neq j$, 就存在信息。长度为 s 的差异信息序列记为 $X(s)$ 。设 $S(Rn)$ 是非空开凸集, $H \in S, H = (h_1, h_2, \dots, h_s)^T$ 为非负且归一化的数列, 即 $H \geq 0, \sum h_i = 1, i = 1, 2, \dots, s$, 称函数

$$F(H) = - \sum h_i \log_2 h_i \tag{1}$$

为泛熵函数, 其中, $\sum h_i = 1$ 称为归一化条件。取以 2 为底的对数时, 泛熵的单位为比特(bit)。经过转换为以自然对数表达的泛熵为:

$$F(H) = -K \sum h_i \ln h_i \tag{2}$$

式中, $K = 1/\ln 2 = 1.4427$ 。

泛熵函数的归一化 $\sum h_i = 1$ 是一个重要条件。对于长度为 $s(s \neq 0)$ 的非归一化的有限差异信息序列 $X = \{x_j, j \in J\}$, 总可以找到某个适当的信息结构算子 f , 使得 $y_i = f\{x_j | x_j, j = 1, 2, \dots, s\}$ 为归一化序列, 其中的一类映射关系可选为^[5]:

$$y_j = f(x_j) = \frac{1/(1+x_j)}{\sum 1/(1+x_j)} \tag{3}$$

则称

$$I(X) = -K \sum y_j \ln y_j, j \in J, K = 1/\ln 2 \tag{4}$$

为差异序列 X 的信息熵。信息熵是对信息量大小的一种量度。任何使差异信息序列趋于均等(无差异)的变动都会使差异信息熵增加, 反之亦然。最大信息熵 $I_m(X)$ 对应于无差异的极端信息。因此从逻辑上讲, 序列 X 的差异信息测度 $I_d(X)$ 应该是最大信息熵 $I_m(X)$ 与信息熵 $I(X)$ 之差:

$$I_d(X) = I_m(X) - I(X) \tag{5}$$

同时给出差异信息相对测度 $I_a(X)$:

$$I_a(X) = \frac{I_d(X)}{I_{d,\max}(X)} \times 100\% \tag{6}$$

其中, $I_{d,\max}(X) = I_m(X) - I_{\min}(X)$, $I_{\min}(X)$ 为 $I(X)$ 序列中的最小值。

本文由研究典型站(南华、紫洞站)的各年逐月水位过程构造差异信息序列 X , 从而计算差异信息序列的 $I_a(X)$ 及其累加值, $I_a(X)$ 累加序列过程中时间梯度(斜率)变化对应的时间即为 X 序列中可能发生变异的时间。

2 实例研究

本文取珠江三角洲典型站紫洞(三角洲上部控

制站之一)、南华(三角洲中部控制站之一) 1960—1998 年逐月水位序列资料, 由前述差异信息熵方法识别其水位过程的变异点。

2.1 水位差异序列构成

记典型水位站的年水位序列为 $Z = \{z_j, j \in J\} \in A_s, J = \{1, 2, \dots, 12\}$, A_s 为长度为 12 的年所有各年逐月水位过程构成的年水位序列集。以 A_s 中所有序列的水位均值作为基准, 计算各个水位序列 Z 相对均值的差异值, 由此构成各年的水位差异序列。通过计算各个差异序列的信息熵, 识别序列的变异性。差异序列 $X = \{x_j, j \in J\}$ 各元素按下式计算:

$$X_i = \frac{z_j - \bar{z}}{z_{\max} - z_{\min}} \tag{7}$$

其中, $z_{\max}, z_{\min}$ 分别是 A_s 中所有序列样本的平均值、最大值和最小值。

2.2 水位差异熵及其累积过程

由上述方法计算出典型站各年水位序列对应的 $I_a(X)$ 值, 根据多年水位过程序列集则可求得逐年的 $I_a(X)$ 序列。需要指出的是, 在长系列水位过程中, 仅出现某一个时段(如某一年)的水位变化并不能断定整个水位序列发生了异变。如某一年由于特大暴雨造成该年洪峰水位大大高于其它年份, 而随后各年又恢复水位变化的一般趋势(即整个水位序列并未发生趋势性偏移), 则该年仅是水位变化的一个跳点, 而不是水位序列的变异点。

因此, 单个差异信息熵值仅反映了某个年份水位特征相对水位序列总体均值的变化程度, 尚不能反映水位序列总体是否发生了变异。为此, 本文通过对水位差异信息熵序列进行逐时序累积, 并识别该累积过程的时间梯度(过程线的斜率)变点 C_k, C_k 即为水位序列总体的变异点。

(1) 南华站各年逐月最高水位。根据南华站的各年逐月最高水位资料(1960—1998 年)的差异信息熵计算结果, 所得的 $I_a(X)$ 序列及其对应的 $I_a(X)$ 累加序列变化过程分别如图 1, 2 所示。

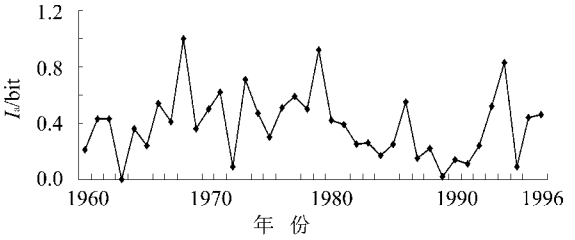


图 1 南华站逐月最高水位 I_a 变化曲线

Fig. 1 Process of I_a for the monthly highest levels of Nanhua Gauge

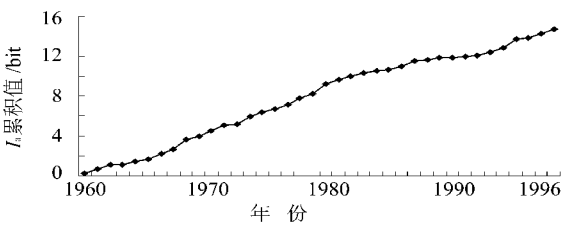


图 2 南华站逐月最高水位 I_a 累积值变化曲线
Fig 2 Accumulated process of I_a for the monthly highest levels of Nanhua Gauge

从图 2 中可以看出，南华站水位变化过程基本呈现 4 个特征不同的阶段：1960—1966 年、1967—1980 年、1981—1991 年以及 1992—1998 年。

(2) 紫洞站的各年逐月最高水位。根据紫洞站的各年逐月最高水位资料（1958—1998 年）的差异信息熵计算结果，所得的 $I_a(X)$ 序列及其对应的 $I_a(X)$ 累加序列变化过程分别如图 3、4 所示。从图 4 中可以看出，紫洞站水位变化过程与南华站十分接近，也基本呈现 4 个特征不同的阶段：1958—1967 年、1968—1979 年、1980—1991 年以及 1992—1998 年。

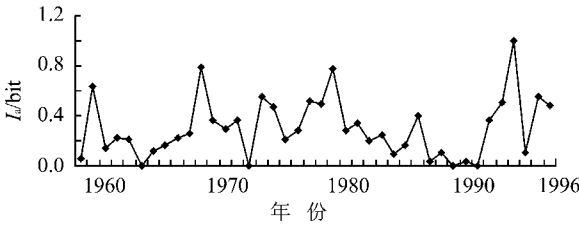


图 3 紫洞站逐月最高水位 I_a 变化曲线
Fig 3 Process of I_a for the monthly highest levels of Zidong Gauge

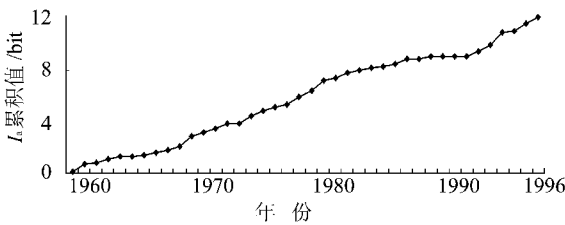


图 4 紫洞站逐月最高水位 I_a 累积值变化曲线
Fig 4 Accumulated process of I_a for the monthly highest levels of Zidong Gauge

2.3 水位过程变异点识别与分析

根据南华、紫洞站多年逐月最高水位差异序列信息熵及其累积过程结论，结合珠江三角洲网河区各个时期水情和大规模人类活动影响，可识别出南华站 1960 年以来水位过程分别在 1966、1980 及

1992 年前后发生了变异；紫洞站 1958 年以来水位过程分别在 1967，1980 及 1992 年前后发生了变异。

20 世纪 60—70 年代，珠江三角洲大规模联围筑闸，从 2 万多个围合并成 400 多个围；水闸共闸堵汊河 16 处，减少泄流水面宽度 1 600 m 以上。联围筑闸空前地改变了网河天然形态，重建了网河动力系统。它加强了外堤的防洪能力，但由于堵塞或控制了一些河汊，使得分洪、蓄洪的能力减弱。同时，导致大中洪水归槽，主干河道泄洪流量增加，洪水水位一度上升。联围以后，北江下游各站的水位与 1953 年对比，逐年抬高，一般在 1959—1962 年之间，壅高值达最大。如西江下游江新联围工程前后的 60 年代和 70 年代，在三角洲入口控制站马口流量 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ （丰水期）和口门三灶站潮位 1.5 m 的边界条件下，工程附近的北街、迭石和竹银站 70 年代水位较 60 年代分别壅高 0.17，0.15 和 0.12 m。西江出口的白藤堵海工程初期（1958—1962 年）完全封堵泥湾门出海口，形成 30 km^2 的白藤湖蓄滞水区，延长径流出海流路 16 km，到 1968 年前后，河床基本成形，导致附近各口门潮差明显减小：低潮水位抬升 0.1~0.3 m（白蕉段抬升达 0.60~0.98 m），高潮水位降低 0.2 m 左右；后期（1970—1975 年）兴建河湖分家工程，泥湾门径潮流不经白藤湖而直接进出鸡啼门，径潮流进退顺畅，使潮差回复。同时，70 年代以前还进行了大规模的航道整治，如 1958—1965 年东平水道的第一次整治（水深加大 0.9 m）、1951—1966 年陈村水道整治（单向航道变为双向）、1971 年以前的广州航道整治（1956—1971 年仅黄埔出海航道疏浚达 $1\,177\text{ 万 m}^3$ ）等等。60 年代的这些人类活动影响（实际上不仅仅这些因素，限于篇幅，将另文专门分析）直接导致了 1967 年前后珠江三角洲水位过程的异变。70 年代，珠江三角洲网河区人类活动相对较弱，70 年代以前完成的各种水利工程的影响相继稳定下来。特别是大规模联围筑闸后，洪水归槽，强干弱支，主干河道流速加大、动力调整明显。60 年代中期至 70 年代中期，三角洲北江水系和西江主干水系河床平均冲刷强度分别为 $0.011\sim0.057\text{ m/a}$ 和 $0.023\sim0.036\text{ m/a}$ ，不过该强度低于联围筑闸前的网河淤积强度。河床的这种动力调整使得网河水位上升幅度回落，水位有所回复，但水位绝对值仍高于 60 年代以前。70 年代的这一变化使得珠江三角洲网河水位过程经过联围筑闸影响后通过河道动力调整而在 1980 年前后再产生异变。

随着 1979 年改革开放，珠江三角洲各种建设大规模展开，自 80 年代起建筑用沙激增。河道大

规模采沙兴盛。据保守推算, 1985 年以来, 西、北江三角洲网河区年均采沙 $5\,000 \times 10^4 \sim 6\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 近 15 a 采沙总量约 $7.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 加之 90 年代连续 4 场大洪水冲刷, 三角洲上部河床剧烈下切, 汇流速度大大加快, 三水以下至顺德水道, 主要河道河床多冲(浚)深 $6 \sim 8 \text{ m}$; 而河口由于海平面上升, 潮流顶托阻水; 同时, 口门围垦速度进一步加快, 50—80 年代年均围垦 553 hm^2 , 而 80 年代初至 1997 年年均围垦 1940 hm^2 ; 口门淤积、延伸加剧。受上下游水流“挤压”, 珠江三角洲腹地水位抬升。以近 30 年顺德历次洪峰水位频率与三水、马口洪峰水位频率相比较, 在 90 年代以前, 两者大致相当; 但 90 年代以来, 两者极不对应。如 1994 年 6 月西、北江出现 50 年一遇洪水, 三角洲网河腹地的顺德、番禺水位大多超过 200 年重现期, 而口门南沙、万顷沙西高高潮位不超过 5 年一遇, 可见频率极不一致。加上 80 年代以来三角洲高密度的桥梁、码头建设、河滩占用等导致河道壅水。珠江三角洲网河区 90 年代以来水文特征发生了显著异变, 变异点位于 1991 年前后。

人类活动对网河水文特征的影响具有明显的滞时和历时效应, 如 70 年代以前的联围筑闸、航道整治等工程产生的水文特征异变主要表现在 70 年代的数年间, 且影响幅度大、历时较长; 70 年代的河道系统动力调整的结果主要反映在 80 年代, 该过程相对平缓, 使水位有所回复(但水位绝对值仍高于 60 年代以前); 80 年代初、中期开始的大规模航道整治、围垦和河道采沙的后果则主要反映在 90 年代, 类似于联围筑闸、航道整治、围垦和采沙对网河水文特征的改变都是急骤型的, 特别是采沙导致河床剧烈下切产生的影响及时而幅度大。图 2 和图 4 良好地展示了这些规律: 70 和 90 年代的 $I_a(X)$ 累加序列梯度较大, 而 80 年代的 $I_a(X)$ 累加序列过程平缓。南华、紫洞站各自的 3 个水位过程变异点与珠江三角洲网河区各个阶段人类活动影响具有良好的对应性, 这 3 个变异点也是 3 个阶段人类活动影响的水文效应的反映。

3 结 语

近 50 年来特别是近 20 年的快速社会经济发展和城市化造成珠江三角洲网河区水文特征发生了重

大变异。本文采用序列变异性的差异信息熵识别方法, 以珠江三角洲网河区典型站南华、紫洞长系列逐月最高水位过程为研究实例, 变异性识别结果表明, 南华站 1960 年以来水位过程分别在 1966, 1980 及 1992 年前后发生了变异; 紫洞站 1958 年以来水位过程分别在 1967, 1980 及 1992 年前后发生了变异。这 3 个变异点将水位变化过程划分为 20 世纪 70, 80 及 90 年代 3 个特征不同的阶段, 分别与 3 个时期人类活动影响的水文特征效应相对应。即:

(1) 20 世纪 70 年代以前, 大规模堤系整理、围垦和联围筑闸, 蓄滞洪容积骤减, 大、中洪水归槽, 导致主要河道水位一度上升, 珠江三角洲网河水文特征在 1967 年前后经历了一次异变。

(2) 20 世纪 70 年代, 大规模堤系整理及联围筑闸基本完成, 70 年代以前的各种水利工程基本稳定, 河道动力系统明显调整, 河道水位又有所回复并稳定, 三角洲网河区水文特征在 1980 年前后再次异变。

(3) 20 世纪 80 年代以来, 快速经济发展和城市化造成下垫面条件巨变, 航道及河口整治、河道采沙、码头桥梁建设及围垦加速等, 导致三角洲上部主要河道河床下切、水位下降、水力坡度和水流流速加大; 而口门拦门沙发育、海平面上升, 潮位顶托; 腹地受到上、下游水体“挤压”而洪水位抬升。网河区 90 年代以来水文特征发生了显著异变, 变异点位于 1991 年前后。

参考文献:

- [1] 陈小红. 珠江三角洲洪水变化及洪水风险与保险[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 117—123.
- [2] Committee on American River Flood Frequencies. Improving American river flood frequency analysis[M]. Washington DC: National Academy Press, 1999.
- [3] PINTER N, TOMAS R, WLOSINSKI J H. Assessing flood hazard on dynamic rivers[J], EOS, 2001, 82(31): 333—339.
- [4] SZILAGYI J. Identifying cause of declining flows in the Republican River[J]. J Water Resources Planning and Management, ASCE, 2001, 127(4): 244—253.
- [5] 夏军. 灰色系统水文学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000: 71—96.

Recognition on Change of Stage Processes at Typical Gauge
of the Pearl River Delta Using Difference Entropy Theory

LIU You hua¹, CHEN Xiao hong², CHEN Yong qin³

- (1. Shenzhen Institute of Environmental Science, Shenzhen 518008, China;
2. Department of Geography, Sun Yat sen(Zhongshan) University, Gangzhou 510275, China;
3. Department of Geography, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, NT, Hong Kong)

Abstract: In the river network of the Pearl River Delta, man induced change of hydrological processes is so great that the previous schemes for hydrological forecasting, flood control and water use are inapplicable. To identify the time of change of the hydrological processes in the past several decades in the Pearl River Delta, a recognition method with difference entropy is developed based on the entropy theory. Using the specific gauge records of monthly stage in recent forty years in the river network of the Pearl River Delta, the split spots of time for the change of stage processes at two specific gauge stations, Nanhua and Zidong, are identified according to the diffraction on the cumulative curve of the difference entropy of stage process. The results show that water level process at Nanhua Station have happened bias changes in 1966, 1980 and 1992 respectively since 1960, while the bias changes of stage process at Zidong Station occurred in 1967, 1980 and 1992 respectively since 1958. The three bias changes spots cut the stage process into 3 periods with different streamflow characteristics which are in accordance with the dramatic human activities in the Pearl River Delta: ① Dykes combination and sluices construction before the 70s cause the rise of water level and the first bias change of stage process in about 1967; ②Dynamic adjustment of river sections due to the concentration of flow during the first period results in the recovery of the rising stage and the second bias change of stage process in about 1980; and ③Large amount of sand dredge in the river, intensive reclamation and dense construction of bridges and docks along the river starting the early 80's give rise to the third bias change of stage process in about 1992.

Key words: stage; change; difference entropy; identification