

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20111125. 1636. 009

非一致性水文频率分析的研究进展

梁忠民, 胡义明, 王 军

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 水文频率分析计算需满足独立随机同分布假设, 其中同分布是指水文样本在过去、现在和未来均服从同一总体分布, 即样本应具有一致性。然而, 由于气候变化及人类活动的影响, 使得一致性的假设受到挑战, 因此变化环境下传统频率计算方法获得的设计结果, 其可靠性受到质疑。为此, 探索适应非一致性极值系列的频率分析方法已显得非常重要。总结介绍国内外关于非一致性水文频率分析的一些代表性研究成果, 主要集中在以下两方面: 一是基于还原/还现途径; 二是基于非一致性极值系列直接进行水文频率分析途径。最后对进一步值得研究的问题进行了展望。

关键词: 非一致性; 水文频率分析; 还原/还现; 混合分布模型; 时变矩模型; 条件概率模型

中图分类号: P333; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)06-0864-08

水文频率分析在水利工程规划建设中具有重要作用。现行的水文频率分析方法的一个基本前提是水文系列满足一致性假设, 即水文极值的概率分布或统计规律在过去、现在和未来保持不变。但随着全球气候变化及人类活动影响的加剧, 特别是大规模社会经济活动的持续增强, 高密度水利工程群、城市群和大范围水土保持措施的建设, 形成了复杂的人类活动影响链, 改变了流域下垫面的产汇流规律和天然洪水的时空分配过程。洪水及径流生成和孕育环境的变化, 使得用于水文频率分析计算的极值系列失去了一致性, 采用传统频率计算方法得到的设计结果的可靠性受到质疑^[1-2], 将此设计成果应用于实际工程, 无疑将增加工程水文设计的风险。与传统的水文频率分析方法相比, 非一致性水文系列的频率分析则是一项新兴的研究课题。中外学者在这方面都做了很多有益的探索及研究, 主要集中在以下两个方面: 一是基于还原/还现途径; 二是基于非平稳极值系列的直接水文频率分析途径。本文对一些典型的研究成果进行评述, 并对值得深入研究的内容提出展望。

1 系列的变异性检验

无论是基于还原/还现途径、还是直接基于非一致性系列途径来进行水文频率分析, 首先都需要对水文系列的变异性进行检验, 即水文系列是否发生变异或是否满足一致性的前提。

水文系列是一定时期内气候、自然地理、人类活动等综合作用的产物, 其资料本身就反映了这些因素对它的影响或资料发生变化的程度^[3-4]。水文学中对时间系列的研究, 一般是将其分解成两种成分, 即确定性成分和随机性成分。确定性成分主要是由气候变化和人类活动影响引起的。气候变化过程是缓慢和渐进的, 水文变量因其变化常会表现出一定的趋势性或周期性; 相对于气候变化而言, 人类活动对水文过程的影响在一定时期内则更为显著, 如河道溃决、拦截江河、修筑水库等导致水文变量表现出的突变和跳跃性等。而随机性成分是由不规则的振荡和偶然性因素影响造成的, 其统计特性是相对一致的。

收稿日期: 2011-03-31; 网络出版时间: 2011-11-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20111125.1636.009.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB951102); 国家自然科学基金资助项目(51079039)

作者简介: 梁忠民(1962-), 男, 辽宁凤城人, 教授, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

变异性检验的方法众多,不同方法得到的检验结果通常存在着差异,但总的来说,都是围绕着趋势性、跳跃性和周期性3个方面进行的。雷红富等^[5]对趋势性和跳跃性成分检验方法的性能进行了比较研究;谢平等^[6]在原先提出的综合诊断方法基础上发展了综合诊断系统,综合诊断方法采用赋权方式对多种方法的检验结果进行综合,与单一检验方法相比,其分析结果更可靠,但其分析计算步骤较多,应用起来相对复杂。目前针对趋势和跳跃的诊断方法中,非参数方法应用的较为成功,如Mann-Kendall、Spearman秩次相关检验法和贝叶斯方法。Theresia等^[7]利用Mann-Kendall秩次检验法对德国境内的145个站点的洪水资料的趋势性进行了分析;熊立华等^[8]应用Mann-Kendall和Spearman秩次相关检验法对长江宜昌站年径流的趋势性进行了检验,采用贝叶斯方法对跳跃性进行了研究。诊断周期性成分的方法主要有方差分析法、功率谱分析、最大熵谱分析法和小波分析法。王恩荣等^[9]利用方差分析法、功率谱分析法和最大熵谱分析法对黑龙江省主要江河水文要素的周期进行了分析研究。易淑珍等^[10]运用最大熵谱法和小波分析法研究了广东省降水的周期性问题。

对于水文系列变异性的探测主要集中在均值上,而对方差或变系数的变异性分析研究较少。事实上,气候变化和下垫面条件的改变影响的是整个水文系统,而非只是均值,对变系数或方差也可能产生较大影响。所以,除继续深入研究水文系列均值的变异检测外,还应加强对方差或变系数的变异性诊断分析。

2 基于还原/还现途径的水文频率分析

基于还原/还现途径来考虑非一致性水文系列的频率计算是目前国内较为常用的方法,也是研究的集中点。其基于这样一种假定,即认为变异点之前的状态是天然的或是近似于天然状态,而变异点之后的状态受到气候/人类活动的显著影响。“还原”就是将变异点之后的系列修正到变异点之前的状态,而“还现”则是将变异点之前天然状态下的系列修正到变异点之后的状态。基于还原/还现途径的方法主要包括:变异点前后系列与某一参数的关系分析法、时间系列的分解与合成方法以及水文模型方法3种。

2.1 变异点前后系列与同一参数的关系分析法

在年径流还原/还现计算中,常用降雨作为参数建立起降雨径流关系进行分析。降雨径流关系分析法主要是根据控制断面以上流域的面雨量资料与断面径流资料,建立系列变异前后不同时期的降雨径流关系,再由估算年份的降雨量计算径流量;依实际需要,可实现水文系列向某一时期的修正^[11]。

首先需要对水文系列的变异性进行检验,确定变异点位置 τ ,则变异点前后两系列可表示为 x_1, x_2, \dots, x_τ 和 $x_{\tau+1}, x_{\tau+2}, \dots, x_n$ 。假设变异点前后径流系列与其对应时期降雨系列的相关关系分别为 $X_{前}=f_1(p)$ 和 $X_{后}=f_2(p)$,则降雨 p 在不同时期产生的径流量差值可表示为 $\Delta x=f_1(p)-f_2(p)$,以此差值作径流修正值,即可实现径流系列向某一时期的修正。

陆中央^[12]通过建立横山岭水库以上流域不同年代的年降雨量和年径流量相关图,实现了水库年径流系列向现状条件下的修正。韩瑞光^[13]选取海河流域若干代表站,通过建立不同时期代表站控制流域面平均年降雨量与年径流量之间的关系,对年径流系进行了一致性修正,并应用分布式水文模型研究了不同下垫面条件下的径流量及其变化趋势。

降雨径流关系法可以实现非一致性水文极值系列向现状或历史上某一时期的一致性修正,但无法反映时间系列未来的变化情况,且如何合理地分析出不同时期水文系列的分界点也是应用此方法的关键。

2.2 时间系列的分解与合成方法

该方法假设非一致性水文极值系列由相对一致的随机性成分和非一致的确定性成分两部分组成,即水文极值系列的随机性规律反映一致性变化成分,而确定性规律反映非一致性变化成分。采用成因分析法与统计分析法对水文极值系列的变异性进行识别及检验,依检验结果对确定性成分进行拟合,建立确定性成分与时间的函数关系,用原系列值减去其对应的确定性成分,进而得到随机性成分,即实现了系列的还原^[3-4]。确定性成分主要是考虑了趋势性成分和跳跃性成分,而很少考虑周期性成分。谢平等^[14]应用此方法对潮白河

的年径流系列进行了研究,采用时间系列的分解和合成方法,得到潮白河过去、现在和未来年径流的频率分布,分析了北京市的水资源安全问题。胡义明^[15]等以金沙江流域某站点洪峰流量资料为例,采用滑动秩和检验法和有序聚类分析法分析了洪峰系列的跳跃性,并进行系列的一致性修正及水文频率分析,结果表明,基于未修正系列和修正系列进行频率分析得到的设计成果存在差异,且随设计标准的降低,差异性表现的更为显著。

此方法除了可以实现系列的一致性修正之外,还具有一定意义上的预测功能,即通过确定性成分的拟合函数,对未来某一时间(年份)的确定性成分进行预测,依时间系列的分解与合成理论,将确定性的预测值和随机性成分进行合成,可以得到过去、现在和未来不同时期水文极值系列的频率分布,进而分析水文极值事件的发生概率或一定标准下的设计值。但在预测期较长情况下,现有的确定性成分预测方法似乎很难令人信服且存在着较大的外延风险。

2.3 水文模型方法

水文模型方法是通过建立不同时期下垫面条件与水文模型参数之间的定量关系,用模型参数的变化反映下垫面变异;将不同时期的降雨资料与某一时期的水文模型参数结合,从而达到洪水系列还原/还现的目的。王国庆等^[16]以黄河中游三川河流域为例,采用流域水文模型模拟了20世纪70年代后的天然径流过程,定量评估了气候变化/人类活动对流域径流的影响。韩瑞光等^[17]应用河北雨洪模型对阜平站20世纪80年代前后的洪水系列进行了研究,基于80年代以后的模型参数对80年代前的洪水系列进行了一致性修正。

王忠静等^[18]探讨了传统水文还原方法存在的“还原失真”与“还原失效”现象及成因,认为流域下垫面变化将破坏集总式水文模型相关分析对样本一致性的基本假定,使集总式水文模型不能用于还原分析,建议采用分布式水文模型进行水文极值系列的一致性修正。集总式流域水文模型忽略了降雨和下垫面条件的不均匀性,其参数一般是通过模型的模拟与实测之间的某种拟优来确定的,缺乏物理依据,难以保证解的合理性,常会出现“异参同效”现象,进而给一致性修正成果的可靠性带来影响;分布式水文模型能比较客观地反映降雨和下垫面条件空间不均性对产汇流过程的影响,模型参数的确定有一定物理依据。为此,有必要加强分布式水文模型在水文系列一致性修正方面的应用研究,以期获得更为合理的修正成果。

3 基于非一致性极值系列直接进行水文频率分析

目前国外基于非一致性极值系列直接进行水文频率分析方面的研究较多,成果主要集中在如下几个方面:一是基于混合分布的非一致性水文频率分析方法;二是基于时变矩的非一致性水文频率分析方法;三是基于条件概率分布的非一致性水文频率分析方法。现分别叙述如下:

3.1 基于混合分布的非一致性水文频率分析方法

Waylen 和 Woo^[19], Diehl 和 Potter^[20]及 Singh 和 Sinclair^[21]等研究发现,频率分析所选取的极值系列中的个体有时并非来自同一总体,即不是服从于同一分布,混合分布模型是直接基于非同分布的极值样本系列进行频率分析,其假设非同分布的极值样本系列是有若干个子分布混合而成,可表示为

$$F(x) = a_1 F_1(x) + a_2 F_2(x) + \cdots + a_k F_k(x) \quad (1)$$

式中 $F_1(x), F_2(x), \cdots, F_k(x)$ 为 k 个子部分的累积分布函数; a_1, a_2, \cdots, a_k 为各个子分部的权重,且 $a_1 + a_2 + \cdots + a_k = 1$ 。

2002年, Alila 和 Mtiraoui^[22]应用此方法对具有长系列水文气象记录资料的 Gila 流域进行了研究,发现混合分布模型与实际点据的拟合比传统的单分布模型更优;同时指出,由于混合分布中的待估参数较多,为确保模型参数估计的精准,应注意以下两个方面:①详细分析洪水形成机制,合理划分水文极值系列为若干子系列,使其服从相应的子分布;②子分布的增加会增加参数的数量,影响模型参数估计的精确,所以子分布的个数应保持在最低限度上。

对于混合分布模型的参数估计问题,众多学者提出了很多的估计方法,主要有非线性优化算法^[23]、极

大似然算法(ML)^[24]、极大似然的EM算法^[25]和最大熵准则法(POME)^[26]等。非线性优化算法是利用样本系列的前五阶中心矩求解模型参数,对于小样本系列而言,高阶矩会产生较大误差,影响模型参数估计的精度。后3种估计方法对子分布的概率密度函数依赖比较高,其估计精度取决于假设的各子分布函数是否与真实的分布函数相符,且计算过程较为复杂,POME法相对而言比EM法和ML法要容易操作些。成静清等^[27]认为可将混合分布的参数估计问题看成是组合优化问题,采用全局优化算法——模拟退火算法进行参数求解,与前述的几种方法相比,其具有描述简单、使用灵活、运行效率高且受初始条件限制较少等优点,但通过此最优算法率定的参数,其物理意义有待商榷,如某些站点的 C_s/C_v 值只为0.35左右,而有些站点的 C_s/C_v 值能高达6.0,这与中国规范^[28]中建议采用 C_s/C_v 并结合微调进行频率适线的 C_s/C_v 推荐值相差甚大。

3.2 基于时变矩的水文频率分析方法

时变矩是指水文统计分布的参数随时间变化,可以采用线性、抛物线型、指数型函数描述这种变化趋势,进而进行水文频率分析计算。

2001年,Strupczewski等^[29-31]提出一个非一致性极值系列的频率分析模型,该模型是将趋势性成分嵌入到分布的一、二阶矩中(时变矩),即考虑统计参数均值和方差的趋势性。作者从众多的概率分布模型中选取了正态分布、二参数对数正态、三参数对数正态、二参数P-III分布、三参数P-III分布和极值I型分布6个分布模型,在此6个分布模型中嵌入了趋势性成分,趋势类型主要考虑了4种:①只有均值存在趋势;②只有方差存在趋势;③均值和方差都存在趋势,变差系数为常数;④均值和方差都存在趋势,但两者之间没有联系;三参数分布模型的偏态系数 C_s 视为常数。趋势线型主要考虑了线性趋势和二次三项式趋势,对趋势类型④只考虑了线性趋势,而没有考虑二次三项式趋势。模型的分布参数通过一、二阶矩进行描述,从而可得到设计值随时间的变化关系。模型参数采用极大似然函数(ML)和加权的最小二乘法(WLS)进行估计。ML法的参数估计精度取决于假设的分布函数是否与真实的分布函数相符,而WLS方法则放宽了对分布函数的假设,但WLS方法只局限于对线型趋势模型参数的拟合。作者将趋势线型、趋势类型和概率分布函数相结合,共产生56个竞争模型,依实际资料采用AIC准则从56个竞争模型中选取最优模型。

现以耿贝尔(Gumbel)分布为例进一步说明,设其分布函数为 $F(x)$,均值 μ_x 、方差 σ_x^2 。

$$F(x) = \exp\{-\exp[-(x-a)/b]\}, (-\infty \leq x \leq \infty, \beta > 0) \quad (2)$$

分布参数 α 、 β 、 γ 与统计参数 μ_x 、 σ_x^2 有如下关系:

$$\mu_x = \alpha + \gamma\beta \quad (3)$$

$$\sigma_x^2 = \pi^2\beta^2/6 \quad (4)$$

$$\gamma = 0.5772 \quad (5)$$

现假设均值和均方差存在线型趋势,即

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (6)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \quad (7)$$

则分布参数 α 、 β 可表示为

$$\alpha(t) = (\mu_0 + \mu_1 t) - \gamma[6(\sigma_0 + \sigma_1 t)^2/\pi^2]^{0.05} \quad (8)$$

$$\beta(t) = [6(\sigma_0 + \sigma_1 t)^2/\pi^2]^{0.05} \quad (9)$$

进而,给定频率 P 的设计值 x_p 可以表示为

$$x_p = \alpha(t) + \beta(t) \{-\ln[-\ln(1-P)]\} \quad (10)$$

Richard和Chad等^[32]通过将二参数对数正态分布和指数趋势模型相结合,分析了美国历史洪水极值系列的变化趋势及一定标准下洪水设计值随时间的变化规律,研究表明美国很多地区的洪水量级有增加的趋势,在某些流域100年一遇洪水可能会变得更为常见。Gabriele和James等^[33]采用广义加法模型对城市化程度较高的Little Sugar Creek流域的洪峰流量系列进行了研究,通过三次样条拟合建立起分布参数和时间的关

滑函数,很好地描述了系列均值和方差随时间的变化规律;并发现基于传统频率分析方法求得的 100 年一遇洪水设计值,随时间的变化,其对应频率也发生了变化,而非 100 年一遇。

由上述研究可以看出,Strupczewski 等在进行非一致性水文极值系列的频率分析时,是建立设计值 x_p 与设计标准 P 及时间 t 的函数关系,即 $x_p = F(p, t)$ 。由此可知,一定设计标准 P 下,设计值 x_p 是随时间 t 变化的。如何将此时变矩方法运用到工程水文设计有待进一步研究。

3.3 基于条件概率分布的非一致性水文频率分析方法

同样考虑到频率分析时,所选取的极值样本系列中的个体常非服从同一分布, Singh 和 Wang 等^[34]提出了依洪水形成机理的差异性将年内洪水划分成 S 个时段 $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_s$, 各个时段之间不重叠。基于此,洪水极值样本系列 X 可以定义成如下形式:

$$X = \max\{X_i\}, (i \in s) \quad (11)$$

其中 X_i 是时段 ΔT_i 中的最大值。

应用此方法有如下几点假设:

(1) 对于各个分期的极值样本系列 X_i , 假设同一分期内的极值样本系列是同分布的, 而不同分期的极值样本系列是异分布的, 即

$$P_i(x) \neq P_j(x), i \neq j \quad (12)$$

(2) 假设不同分期间的极值样本是相互独立的, 即

$$P(X_i \geq x, X_j \geq x) = P_i(x)P_j(x), i \neq j \quad (13)$$

⋮

$$P(X_1 \geq x, X_2 \geq x, \dots, X_s \geq x) = P_1(x)P_2(x)\dots P_s(x), i \neq j \neq \dots \neq s$$

(3) 假设年最大值 X 以不同的频率发生在不同的分期内。例如, 对一年的洪水只分冬季和夏季两个时期, 冬季洪水系列为 X_1 , 夏季洪水系列为 X_2 , 那么第 i 年的年最大洪水 $x(i)$ 既可能来源于 X_1 系列, 也可能来源于 X_2 系列, 由于 X_1 和 X_2 通常不属于同一总体, 所以 $x(i)$ 发生在 X_1 系列中的概率不同于发生在 X_2 系列中的概率。如令

$$A_i = \{\text{年最大洪水发生在第 } i \text{ 时段}\}, i=1, 2, \dots, s \quad (14)$$

则

$$0 < P(A_i) < 1, i=1, 2, \dots, s; \sum_{i=1}^s P(A_i) = 1 \quad (15)$$

(4) 如果 A_i 表示发生在第 i 时段的极值洪水, 那么事件 $\{A_i\}, i=1, 2, \dots, s$ 中必有且仅有一个是年最大洪水, 即

$$A_i \cap A_j = \Phi, i \neq j \quad (16)$$

式中 Φ 表示不可能事件或是空集。

年最大值系列样本 Ω 可以划分为 A_1, A_2, \dots, A_s , 即

$$\sum_{i=1}^s A_i = \Omega \quad (17)$$

基于以上的分析可知, 事件 $B = \{X > x\}$ 的发生必须与事件 $\{A_i\}, i=1, 2, \dots, s$ 中的一个相联系, 即

$$\{X > x\} = \sum_{i=1}^s \{B \cap A_i\} \quad (18)$$

事件 $B = \{X > x\}$ 发生的概率可以表示为

$$P(X > x) = \sum_{i=1}^s P(B \cap A_i) \quad (19)$$

据概率乘法定理可知

$$P(x) = \sum_{i=1}^s P\{A_i\}P\{X > x | A_i\} = \sum_{i=1}^s P\{A_i\}P\{x | A_i\} \quad (20)$$

进一步可知其概率密度函数可表示为

$$f(x) = \sum_{i=1}^s P\{A_i\}f(x|A_i) \quad (21)$$

式中 $f(x|A_i)$ 是 Δt_i 时段的极值样本系列的概率密度函数。

作者给出了 $P\{A_i\}$ 和子分布参数的估计方法及步骤,最后得出了某设计标准 P 的设计值 x_p ,考虑到条件概率分布中 $x \sim P$ 的非线性关系及求解式的复杂性,用数值算法给出了 x_p 的表达式。

$$x_{k+1} = x_k - g(x_k)/g'(x_k), k = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

或

$$x_{k+1} = x_k - (x_k - x_{k-1})g(x_k)/[g(x_k) - g(x_{k-1})], k = 0, 1, 2, \dots \quad (23)$$

式中 $g'(x) = - \sum_{i=1}^s P(A_i)f_i(x|A_i)$

4 结论及展望

考虑到传统的频率分析模型难以适应气候变化及人类活动等因素的影响,探索适应非稳定极值系列的频率分析方法已显得非常重要,而目前国内外对这方面的研究相对较少,值得进行深入探讨。

(1) 继续深入开展水文过程变异辨别模型的研究。对于系列的周期成分、趋势成分和跳跃成分的检验,现有方法的检验结果往往差异较大。虽然综合诊断方法能有效地对各个方法的检验结果加以综合,但是其操作过程较为复杂,需进一步研究和改进。

(2) 如何将 Strupczewski 等提出的时变矩理论应用于工程实践。水文极值系列的分布函数 $F(x)$ 是时间 t 的函数,即 $F(x) = F(x, \alpha(t), \beta(t))$,不同年份水文极值系列服从不同分布;同一设计标准 P ,不同年份有不同的设计值 x_p 。如何据已有系列资料和时变分布函数确定水利工程某设计标准 P 的设计值有待深入研究。

(3) 加强频率分析成果不确定性评价研究。由于水文过程本身的复杂性及人类认识水平的局限性,导致在分布模型选择、抽样、参数估计等环节存在诸多的不确定性,最终带来频率分析成果的不确定性;而环境变化对实测系列一致性的扰动,更增加了计算成果的不确定性。如何定量评估这种不确定性,以指导工程水文设计,是值得深入研究的课题。

(4) 中国对于非一致性极值系列频率分析的研究较少,且主要集中在还原/还现方面,而基于非一致性极值系列直接进行频率分析的研究几乎是空白,需重点研究。

参考文献:

- [1] TODOROVIC P, ROUSSELLE J. Some problems of flood analysis[J]. Water Resources Research, 1971, 7(5): 1144-1150.
- [2] PETRA S F, FELIX N. More frequent flooding Changes in flood frequency in Switzerland since 1850[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381: 1-8
- [3] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1988:64-121. (DING Jing, DENG Yu-ren. Random hydrology [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1988: 64-121. (in Chinese))
- [4] 谢平,陈广才,夏军. 变化环境下非一致性年径流系列的水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(6):6-9. (XIE Ping, CHEN Guang-cai, Xia Jun. Hydrological frequency calculation principle of inconsistent annual runoff series under changing environments[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 6-9. (in Chinese))
- [5] 雷红富,谢平,陈广才. 水文系列变异点检验方法的性能比较分析[J]. 水电能源科学,2007,25(4):36-40. (LEI Hong-fu, XIE Ping, CHEN Guang-cai. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(4): 36-40. (in Chinese))
- [6] 谢平,陈广才,雷红富. 水文变异综合诊断系统[J]. 水力发电,2010,29(1):85-91. (XIE Ping, CHEN Guang-cai, LEI Hong-fu. Hydrological alteration diagnosis system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 85-91. (in Chinese))

- [7] THERESIA P, BRUNO M. Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 371: 129-141.
- [8] XIONG Li-hua, GUO Sheng-lian. Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station[J]. *Hydrological Sciences*, 2004, 49(1): 99-112.
- [9] 王恩荣, 耿鸿江. 黑龙江省主要江河水文要素的周期分析[J]. *水文*, 1995(1): 42-53. (WANG En-rong, GENG Hong-jiang. Period analysis of hydrological elements of the Major rivers in Heilongjiang Province[J]. *Journal of China Hydrology*, 1995(1): 42-53. (in Chinese))
- [10] 易淑珍, 王钊. 水文时间系列周期分析方法探讨[J]. *水文*, 2005, 25(4): 26-29. (YI Shu-zhen, WANG Zhao. The study of the period method for hydrologic time series[J]. *Journal of China Hydrology*, 2005, 25(4): 26-29. (in Chinese))
- [11] 沈宏. 天然径流还原计算方法初步探讨[J]. *水利规划与设计*, 2003(3): 15-18. (SHEN Hong. Study in the calculation method of natural runoff restore[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2003(3): 15-18. (in Chinese))
- [12] 陆中央. 关于年径流量系列的还原计算问题[J]. *水文*, 2000, 20(6): 9-12. (LU Zhong-yang. Restore estimation of annual runoff series[J]. *Journal of China Hydrology*, 2000, 20(6): 9-12. (in Chinese))
- [13] 韩瑞光, 丁志宏, 冯平. 人类活动对海河流域地表径流量影响的研究[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(3): 4-7. (HAN Rui-guang, DING Zhi-hong, FENG Ping. Study on influence of human activity on surface runoff in Haihe River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(3): 4-7. (in Chinese))
- [14] 谢平, 陈广才, 韩淑敏, 等. 从潮白河年径流频率分布变化看北京市水资源安全问题[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(6): 713-717. (XIE Ping, CHEN Guang-cai, HAN Shu-min, et al. Problems in the security of water resources in the city of Beijing reflected from the change in annual runoff frequency distribution in Chaobaihe basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(6): 713-717. (in Chinese))
- [15] 胡义明, 梁忠民. 基于跳跃分析的非一致性洪量系列的频率计算[J]. *东北水利水电*, 2011(7): 38-40. (HU Yi-ming, LIANG Zhong-min. Frequency analysis of non-stationary flood series based on jump analysis[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2011(7): 38-40. (in Chinese))
- [16] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. *中国水利*, 2008(2): 55-58. (WANG Guo-qing, ZHANG Jian-yun, LIU Jiu-fu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff[J]. *China Water Resources*, 2008(2): 55-58. (in Chinese))
- [17] 韩瑞光, 冯平. 流域下垫面变化对洪水径流影响的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(8): 27-30. (HAN Rui-guang, FENG Ping. Effects of sublayer and land-cover change on flood in Daqinghe River Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(8): 27-30. (in Chinese))
- [18] 王忠静, 李宏益, 杨大文. 现代水资源规划若干问题及解决途径与技术方法: 还原“失真”与“失效”[J]. *海河水利*, 2003(1): 13-16. (WANG Zhong-jing, LI Hong-yi, YANG Da-wen. Solutions ways and technical methods of the problems about water resources planning: Restore distortion and failure[J]. *Haihe Water Resources*, 2003(1): 13-16. (in Chinese))
- [19] WAYLEN P, WOO M K. Prediction of annual floods generated by mixed processes[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 1283-1286.
- [20] DIEHL T, POTTER K W. Mixed flood distribution in Wisconsin[C]// SINGH V P. *Hydrologic Frequency Modelling*. Netherlands: D. Reidel Publishing Company, 1987: 213-226.
- [21] SINGH K P, SINCLAIR R A. Two-distribution method for flood frequency analysis[J]. *Journal of Hydraulics Division*, 1972, 98(1): 29-44.
- [22] ALILA Y, MTIRAOUI A. Implications of heterogeneous flood-frequency distributions on traditional stream-discharge prediction techniques[J]. *Hydrological Processes*, 2002(16): 1065-1084.
- [23] SINGH K P. A versatile flood frequency methodology[J]. *Water International*, 1987, 12(3): 139-145.
- [24] ROSSI J, FIORENTINO M, VERSACE P. Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(7): 847-856.
- [25] LEYTHAM K M. Maximum likelihood estimates for the parameters of mixed distributions[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(7): 896-902.
- [26] FIORENTINO M, ARORA K, SINGH V P. The two-component extreme value distribution for flood frequency analysis: derivation of

- a new estimation method[J]. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 1987(1): 199-208.
- [27] 成静清, 宋松柏. 基于混合分布非一致性年径流系列频率参数的计算[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(2): 229-234. (CHENG Jing-qing, SONG Song-bai. Calculation of hydrological frequency parameters of inconsistent annual runoff series based on mixed distribution[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science*, 2010, 38(2): 229-234. (in Chinese))
- [28] 水利部长江水利委员会, 水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 23-37. (Hydrological Bureau of Changjiang Water Resources Commission Ministry of Water Resources, Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources Ministry of Water Resources. Handbook for calculating design flood of water resources and hydropower projects[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2001: 23-37. (in Chinese))
- [29] STRUPCZEWSKI W G, SINGH V P, FELUCH W. Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling: I: Aximum likelihood estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248: 123-142.
- [30] STRUPCZEWSKI W G, KACZMAREK Z. Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling: II: Weighted least squares estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248: 143-151.
- [31] STRUPCZEWSKI W G, SINGH V P, MITOSEK H T. Nonstationary approach to at-site flood frequency modeling: III: Flood analysis of Polish rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248: 152-167.
- [32] RICHARD M V, CHAD Y, MEGHAN W. Nonstationarity: Flood magnification and recurrence reduction factors in the United States[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2011, 47(3): 464-474.
- [33] GABRIELE V, JAMES A S, FRANCESCO S, et al. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin[J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32: 1255-1266.
- [34] SINGH V P, WANG S X, Zhang L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307: 175-195.

Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series *

LIANG Zhong-min, HU Yi-ming, WANG Jun

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The conventional methods of flood frequency analysis are based on the assumption that the hydrological time series is statistically independent and identically distributed. The latter assumption implies that the series is subject to a same distribution in the past, present and the future, i. e. the series should be consistent. However, this assumption is usually not valid because of the impacts of climate change and human activities on hydro-meteorological conditions. Therefore, it is necessary to develop new approaches for frequency estimation of non-stationary time series of extreme values. The advances in the subject are presented in this study. The recent development has focused largely on the following two aspects, i. e. , the approach based on the backward restore or forward restore, and that directly based on the non-stationary hydro-meteorological extremes. Finally, perspectives on the hydrological frequency analysis of non-stationary time series are prospected.

Key words: inconsistency; hydrological frequency analysis; backward restore/forward restore; mixed distribution model; time-varying moments model; conditional probability model

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB951102) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51079039) .