

水文非一致性变异及其对水库防洪影响的研究进展

董前进¹, 张艳敏²

(1. 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;
2. 中工武大设计研究有限公司, 湖北 武汉 430072)

摘要: 分析了国内水文非一致性变异及其对水库防洪影响研究存在的问题, 评述了水文非一致性变异的检验方法和频率计算中所涉及的还原或还现、直接频率法及水文非一致性变异对水库防洪的影响等, 指出水文非一致性变异对水库防洪影响需在进一步研究变异诊断方法和频率分析计算的基础上, 重视对防洪影响的科学评价与应对措施。

关键词: 水库防洪; 水文非一致性; 防洪安全; 变异诊断; 频率分析; 综述

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)02-0071-05

Advances in research of hydrological serial variation under non-stationary conditions and their impacts on flood control of reservoirs//DONG Qianjin¹, ZHANG Yanmin² (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. CAMCE WHU Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430072, China)

Abstract: Problems in current research on hydrological serial variation under non-stationary conditions and their impacts on flood control of reservoirs were analyzed. The test methods for hydrological serial variation under non-stationary conditions, the backward restore/forward restore and direct frequency method involved in frequency calculation, and the impacts of hydrological serial variation under non-stationary conditions on flood control of reservoirs were evaluated. It is pointed out that scientific evaluation of the impacts and corresponding measures should be highlighted based on further research of detection methods and frequency analysis.

Key words: flood control of reservoir; non-stationary hydrology; flood control safety; detection of variation of hydrological serials; frequency analysis; review

随着以气候变暖为显著特征的全球气候变化和以流域下垫面改变为主要特征的人类活动影响加剧, 水库防洪安全问题历时已久、日益突出并亟待解决。传统的水库防洪所涉及的洪水频率计算结果均是在考虑洪水样本的独立同分布条件下获得的, 在全球气候变化和人类活动影响下, 原有的独立同分布假定已遭到极大的挑战^[1], 并且水文极端事件频发, 径流趋势发生较大变化的严峻事实已让非一致性条件下的工程水文分析与计算问题的解决迫在眉睫, 在此情形下对现有水文非一致性变异及相应的频率计算方法及其对水库防洪影响的研究进行总结显得尤为必要。

本文从水文序列的变异性检验、水文非一致性频率分析、水文非一致性变异对水库防洪影响等方面对当前国内外已有研究成果进行总结。

1 水文变异性检验

关于水文变异性检验研究, 当前主要应用小波分析法^[2]、希尔伯特-黄变换 HHT 法^[3-4]、S 变换法^[5]等, 尤其以希尔伯特-黄变换 HHT 法备受关注。如 Franceschini 等^[3]利用希尔伯特-黄变换 HHT 法进行了 Niagara River 4 种时间序列(径流、水温、两种多环芳烃)的非平稳和非线性特征分析, 结果表明希尔伯特-黄变换 HHT 法的经验模态分解能更好识别序列的周期趋势和主要尺度。同样, Rudi 等^[4]利用希尔伯特-黄变换 HHT 法进行了水文时间序列的多尺度研究, 并与傅里叶转换及小波转换进行了对比分析, 结果表明希尔伯特-黄变换 HHT 法的经验模态分解能更好地识别水文序列的局部时频谱特征, 从而更好地揭示水文序列的季节性特征, 该方法在德国上游

的 Rur 流域水文序列多尺度分析中应用效果良好。其他研究如 Khaliq 等^[6]评述了诊断短期互相关序列水文趋势的多种方法,以 Cannadian 流域年平均流量为例进行了实例研究,并比较了不同方法在序列趋势诊断应用中的效果;Koutsoyiannis^[7]则重新回顾了平稳与非平稳的含义,指出非平稳也许并不存在,结合 Hurst-Kolmogorov 随机动态方法对平稳序列的非平稳特征进行了分析,并与基于趋势和气候模型的非平稳方法进行了对比。

紧跟国外水文非一致性变异诊断研究的步伐,国内谢平等^[8]在水文非一致性变异检验研究方面做了大量工作,提出了水文变异系统的初步诊断与详细诊断方法,并开发了相应的诊断系统及水文模型用于变化环境下水文非一致性序列的频率分析、水资源评价等领域,取得了较好的应用效果,获得了业内的高度评价。吕继强等^[9]采用滑动平均值法、逐年累计求均值法、Spearman 秩次相关系数法及基于分形理论的去趋势波动分析法 (detrended fluctuation analysis, DFA)、R/S 和 Husdorsff 分维数方法,分析了新疆和田河径流序列时域变化特征、分形特征及趋势持续性,并探讨了和田河年径流变化驱动因素。莫淑红等^[10]运用 DFA 对宝鸡市 51 年月降雨量序列进行分析,得到了定量描述降雨时间序列长期变化行为的参数——标度指数,并探讨了降雨序列的长程相关性及其内在规律性。

2 水文非一致性频率分析

水文频率分析的基本前提是水文序列满足一致性条件(独立同分布假定),然而由于气候变化和人类活动的影响,水文过程形成条件和水文序列出现了越来越明显的非一致性,导致传统水文频率分析所依赖的一致性条件越来越无法满足^[1,11]。当前关于水文非一致性频率分析研究较多,以下分两个方面进行论述。

2.1 水文非一致性变异的还原或还现法

水文非一致性变异的还原或还现法在国内使用比较普遍,《全国水资源综合规划技术大纲》^[12]水资源调查评价部分明确要求,对于实测径流已不能代表天然状况的实测水文资料要进行水量还原或还现计算;对于流域下垫面条件变化造成天然径流量序列明显变化的水文站要进行天然年径流序列的一致性分析处理。目前关于非一致性年径流序列的还原或还现计算分为两步:首先采用还原或还现的方法将水文序列进行一致性修正,然后对一致性序列进行频率分析。雷强^[13]以山西省坪上水库流域为例,探讨了河道水量还原计算的技术方法,将遗传算法

和神经网络引入到水资源的还原计算中。叶寿征等^[14]从理论和实践两方面对《全国水资源总体规划技术大纲》水资源调查评价部分的一些规定及具体方法提出了自己的见解,指出变化环境下的水资源评价包含 4 个问题:年降水径流关系是否发生了变化;如何鉴别这一变化;引起变化的原因;如何处理这一变化。人们也常常利用水文模型进行还原或还现计算^[15-18],该方法的主要思路是建立不同时期流域下垫面条件与水文模型参数之间的定量关系,以模型参数的变化反映流域下垫面变异;将不同时期的降雨资料与变化前或变化后的流域下垫面条件进行组合,利用水文模型进行水文过程模拟,从而实现还原或还现径流序列的目的。

无论是还原还是还现计算,所推求的年径流频率分布均只能反映过去或现状径流形成的条件,而无法反映不同时期环境的变化,特别是未来某个水平年的径流状况。为了适应变化环境对水文频率计算的要求,人们提出了基于“分解-合成”理论的水文非一致性频率分析方法^[8,19],该方法的水文频率计算原理如下^[8]:假设水文非一致性序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,采用成因分析法与统计分析法分别对确定性成分和随机性成分进行识别与检验,并对确定性成分进行拟合计算,对随机性成分进行频率计算;根据时间序列分析的分解与合成理论,将确定性的预测值和随机性的设计值进行合成,以得到过去、现在和未来不同时期合成序列的频率分布。梁忠民等^[20]系统总结了国内外关于水文非一致性频率分析的代表性成果,指出了当前水文非一致性频率分析的问题和方向。刘睿等^[21]采用云模型和水文非一致性计算方法建立了岷江流域年径流预测模型,与传统预测方法相比,非一致性云预测方法有较高的预测精度。

2.2 基于非一致性极值序列的直接频率方法

由于对水库防洪造成危险的通常是稀遇洪水,由此对水文极值序列频率分析是当前研究的重点。根据对水文序列的处理情况,在非一致性条件下国外通常采用直接法进行频率分析,该方法基于:①考虑水文序列服从不同分布组合的混合分布;②考虑统计参数的时变特征;③考虑洪水发生季节性的基础上构造水文序列及其条件分布进行直接频率计算,其中以考虑统计参数时变特征的频率计算方法比较有代表性。Strupczewski 等^[22-24]为了处理洪水频率模型中的水文非一致性成分(趋势成分),提出了水文非一致性频率分析的极大似然法和最小二乘法模型,并成功应用于 Polish 河的水文分析中。Strupczewski 等^[24]以单站水文分析模型为例,探讨

了考虑趋势的统计参数估计方法,其基本思路是:将均值和方差表示成随时间变化的函数,即趋势函数;采用极大似然法和最小二乘法估计趋势函数中的参数及水文分布的其他参数;用 AIC 准则确定最优分布,包括分布函数的类型和趋势的类型。Cunderlik 等^[25]探讨了非一致综合洪水频率分析,提出了一个二阶非平稳方法用于综合洪水频率分析,研究表明即使忽视数据中很弱的非一致性都会导致风险的严重有偏估计。在基于条件分布的水文非一致性直接频率方法的基础上,Singh 等^[26]提出了依洪水形成机理差异将年内洪水划分为几个不重叠时段而进行非一致性洪水频率分析的条件频率分布法。

随着研究的深入,采用贝叶斯(Bayesian)方法进行水文频率分析正成为研究的热点之一,这些方法主要用于区域水文频率的分析,如 Renard 等^[27]采用贝叶斯分析和 MCMC 方法探讨了非平稳条件下区域极值水文频率分析方法;Nagesh 等^[28]给出了用于水文气象时间序列的非平稳预测贝叶斯动态模型,该模型能对预测的不确定性进行定量描述;Ouarda 等^[29]提供了一个基于贝叶斯方法的非一致性频率分析方法,并讨论了非一致性广义极值模型在水文频率分析中的应用情况。其他的研究还包括,Struthers 等^[30]研究了降雨径流过程阈值不均匀性对洪水生成过程及洪水频率的影响,指出区域的洪水重现期将直接与超越概率的阈值有关。Leclerc 等^[31]提出了一种无资料地区区域非一致性洪水频率分析模型,通过单站非一致性模型分析有径流资料站点的洪水风险,由相关分析方法定义水文相似区,最后将信息拓展到相邻的无径流资料站点。Villarini 等^[32]提出了适用于城区水域非一致性条件下洪水频率分析的广义加权模型,讨论了年最大序列洪水频率与总体趋势的关系,Little Sugar Creek 的实例研究显示了在一致性条件和非一致性条件下设计洪峰流量均值和方差的变化。

国内在非一致性极值序列的直接频率方法上研究成果较少,许月萍等^[33]介绍了一种新的结合物理过程的尺度模型,并分析比较了应用尺度模型和传统频率分析方法(即直接计算法)来计算设计降雨的优劣,使用香港新界北雨量站数据,发现尺度模型在降雨历时 120 min、360 min、720 min 和 1440 min 范围内比较合理,计算得出的设计降雨比直接计算法得出的要小,且随着重现期的增加,两者的差异也相应地增加,结合了物理特性的尺度模型较直接计算法结果更加合理。

3 水文非一致性变异对水库防洪的影响

传统的水利计算理论与方法是现有水库规划设

计的基础,洪水设计则是水库规划设计中的重要内容,关系到水库规划设计的几个关键参数,如设计洪水位、校核洪水位、死水位(与泥沙淤积有关)等,由此,水文非一致性变异对水库特别是防洪的影响极为重要。国外在水文非一致性变异对水库防洪影响上的研究成果不多但在不断深入,如 Raje 等^[34]分析了气候变化对多目标水库的影响和适应性管理问题,以印度 Hirakud 水库研究为例,分析了 3 种气候变化模式下水库发电、灌溉和防洪目标的可靠性及易损性、脆弱性等水库性能表现问题。

国内目前还缺乏水文非一致性变异对水库防洪影响的研究,需重点加以探索,一方面开展水文非一致性变异工程水文设计理论研究,对其中涉及的洪水频率计算方法、典型年选择、洪水过程线推求等加以分析,指导已建防洪工程的防洪能力复核与分析,对待建防洪工程的工程水文设计也将起决定作用;另一方面,需开展水文非一致性变异对防洪影响的科学评估分析,构建合理的评价指数与评价指标体系,以客观评价影响后果,为防洪工程在气候变化环境下的应对决策提供参考。这样,水文非一致性变异对水库防洪影响研究将是气候变化条件下水文响应与工程应对措施的重要环节,也是科学研究为生产实践服务的联系纽带,需重点加以研究。

4 研究展望

a. 继续加强对水文非一致性变异诊断的研究,这是水文序列是否发生变异判定的基础,虽然在变异诊断方法上有较多方法出现,然而在判定结果的一致性上需要再深入探讨,并建立相应的诊断准则。

b. 继续加强水文非一致性频率分析研究,这是联系工程实际与基础理论的纽带,特别是国内关于水文非一致性的研究基本集中于还原或还现方法,而在非一致性极值序列频率分析上研究不足,值得加强研究以填补空白。

c. 需要重视水文非一致性变异对水库防洪影响及应对措施研究,建立防洪影响评价的科学指标体系以量化影响,为已建水库工程的防洪复核和未建水库工程的防洪规划提供科学指导。

参考文献:

[1] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead; whither water management? [J] Science, 2008, 319: 573-574.

[2] DAVISON M, THIAN Y G, SAMUEL S P S, et al. Wavelet empirical orthogonal functions of space-time-frequency regimes and predictability of southern Africa summer

- rainfall[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(5):513-523.
- [3] FRANCESCHINI S, TSAI C W. Application of Hilbert-Huang transform method for analyzing toxic concentrations in the Niagara River [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(2):90-96.
- [4] RUDI J, PABEL R, JAGER G, et al. Multiscale analysis of hydrologic time series data using the Hilbert-Huang transform[J]. Vadose Zone J, 2010(9):925-942.
- [5] 冯平, 牛军宜, 张伟. 基于 S-变换的水文时间序列演变特征研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(1):1-8. (FENG Ping, NIU Junyi, ZHANG Wei. Evolution characteristics of hydrological time series based on S-transform [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(1):1-8. (in Chinese))
- [6] KHALIQ M N, OUARDA T B M J, GACHON P, et al. Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: a review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers [J]. Journal of Hydrology, 2009, 368:117-130.
- [7] KOUTSOYIANNIS D. Hurst-Kolmogorov dynamics and uncertainty[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2011, 47(3):481-495.
- [8] 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 Guangcai, 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))
- [9] 吕继强, 张晓伟, 沈冰, 等. 和田河年径流序列变化特征及驱动因素分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5):165-169. (LÜ Jiqiang, ZHANG Xiaowei, SHEN Bing, et al. Variation trend and primary driving factors of the annual runoff in Hetian River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5):148-151. (in Chinese))
- [10] 莫淑红, 吕继强, 沈冰, 等. 基于去趋势波动分析的降雨演变特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(2):148-151. (MO Shuhong, LÜ Jiqiang, SHEN Bing, et al. Research on the evolvement characteristics of the precipitation based on DFA [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(2):148-151. (in Chinese))
- [11] ZHANG Lan. Multivariate hydrological frequency analysis and risk mapping[D]. Baton Rouge, Louisiana: Louisiana State University, 2005.
- [12] 全国水资源综合规划技术大纲[R]. 北京:水利部水利水电规划设计总院, 2002.
- [13] 雷强. 河道水量还原计算技术方法及其应用研究:以山西省坪上水库流域为例[D]. 太原:太原理工大学, 2006.
- [14] 叶寿征, 叶健. 论水资源系列的修正及其它(续):关于对第二次水资源评价中若干认识的存疑[J]. 山西水利科技, 2006(4):5-8. (YE Shouzheng, YE Jian. Discussion on revision of water resources series and others (continued): inquiry on some cognitions in the second water resources assessment [J]. Shanxi Hydratechnics, 2006(4):5-8. (in Chinese))
- [15] BOUGHTON W, DROOP O. Continuous simulation for design flood estimation: a review [J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18:309-318.
- [16] 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 Zhongjin, LI Hongyi, YANG Dawen. Some problems and their solution and technical methods in modern water resources planning: on returning distortion and invalidity [J]. Haihe Water Resources, 2003(1):13-16. (in Chinese))
- [17] 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):55-59. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. China Water Resources, 2008(2):55-59. (in Chinese))
- [18] 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 Ruiguang, 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))
- [19] SALAS J D. Analysis and modeling of hydrologic time series [M]//Handbook of Hydrology. New York: McGRAW-HILL, Inc., 1992.
- [20] 梁忠民, 胡义明, 王军. 非一致性水文频率分析的研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(6):864-891. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6):864-891. (in Chinese))
- [21] 刘睿, 梁川. 基于云模型的非一致性年径流预测[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(3):106-110. (LIU Rui, LIANG Chuan. Prediction for non-compliance annual runoff based on cloud model [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(3):106-110. (in Chinese))
- [22] STRUPCZEWSKI W G, SINGH V P, FELUCH W. Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling I: maximum likelihood estimation [J]. Journal of Hydrology, 2001, 248:123-142.
- [23] STRUPCZEWSKI W G, KACZMAREK Z. Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling II: weighted least squares estimation [J]. Journal of Hydrology, 2001,

[24] STRUPCZEWSKI W G, SINGH V P, MITOSEK H T. Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling III: flood analysis of Polish rivers [J]. Journal of Hydrology, 2001, 248: 152-167.

[25] CUNDERLIK J M, BURN D H. Non-stationary pooled flood frequency analysis [J]. Journal of Hydrology, 2003, 276: 210-223.

[26] SINGH V P, WANG S X, ZHANG L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 175-195.

[27] RENARD B, GARRETA V, LANG M. An application of Bayesian analysis and Markov chain Monte Carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima [J]. Water Resources Research, 2006, 42: W12422 (doi: 10.1029/2005WR004591).

[28] NAGESH K D, MAITY R. Bayesian dynamic modeling for nonstationary hydroclimatic time series forecasting along with uncertainty quantification [J]. Hydrol Process, 2008, 22: 3488-3499.

[29] OUARDA T B M J, EL-ADLOUNI S. Bayesian nonstationary frequency analysis of hydrological variables [J]. Journal of the American Water Resources Association,

[30] STRUTHERS I. AND SIVAPALAN M. A conceptual investigation of process controls upon flood frequency: role of thresholds [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2007, 11: 1405-1416.

[31] LECLERC M, OUARDA T. Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged sites [J]. Journal of Hydrology, 2007, 343(3/4): 254-265.

[32] VILLARINI G, SMITH J A, SERINALDI F, et al. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin [J]. Advances in Water Resources, 2009, 32: 1255-1266.

[33] 许月萍, 汤有光, 王锐琛. 尺度模型在水文频率分析中的应用 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2009, 48(6): 127-131. (XU Yueping, TANG Youguang, WANG Ruichen. Application of scale model in hydrological frequency analysis [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(6): 127-131. (in Chinese))

[34] RAJE D, MUJUMDAR P P. Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change [J]. Advances in Water Resources, 2010, 33: 312-326.

(收稿日期: 2013-03-21 编辑: 熊水斌)

(上接第 70 页)

4 结论与展望

a. 在九龙滩电站库区枯水期进行水质原型观测, 结合水质采样和室内试验测得库区特定断面各水质因子的特征浓度值。

b. 采用 3 种断面特征浓度值计算各水质因子的沿程降解系数, 按断面中垂线水面浓度值和断面浓度均值计算的平均降解系数比较接近, 而按水面浓度均值计算的结果偏差较大, 分析认为这是各种复杂因素综合影响、作用的结果。

c. 当采用原型观测法确定类似的沿程无支流及排污口汇入的低坝径流式电站库区水体的降解系数且观测断面较多时, 为提高工作效率, 在先行验证的基础上, 可以仅采集断面中垂线水面处的水样进行分析与计算。

d. 目前关于低坝径流式电站库区水质原型观测的资料较少, 本文计算得到的九龙滩电站库区水质因子降解系数尚未与其他类似水库进行对比分析。综合考虑不同水库的特点从而确定水质因子沿程降解系数的合理取值仍需进一步研究和探索。

参考文献:

[1] 李建坤. 日调节水电站对区域水资源和水环境影响分析

[J]. 湖南水利水电, 2005, 50(1): 38-39. (LI Jiankun. Analysis on effects from daily regulating hydro plant to regional water resources and aquatic environment [J]. Hunan Hydro & Power, 2005, 50(1): 38-39. (in Chinese))

[2] 朱党生, 周奕梅, 邹家祥, 等. 水利水电工程环境影响评价 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

[3] WRIGHT R M, MCDONELL A J. In-stream deoxygenation rate prediction [J]. Journal of Environmental Engineering Division, 1979, 105(2): 323-335.

[4] 刘中峰, 李然. 大型水库三维水质模型研究 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 5-9. (LIU Zhongfeng, LI Ran. Three-dimensional model of water quality for large reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 5-9. (in Chinese))

[5] 陈轶. 九龙江流域漳州河段污染物降解系数测算研究 [J]. 化学工程与装备, 2011, 40(11): 215-218. (CHEN Yi. Study on the degradation coefficient of pollutants in Zhangzhou River of Jiulonghe Basin [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2011, 40(11): 215-218. (in Chinese))

[6] GB3838—2002 地表水环境质量标准 [S].

[7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[8] 徐孝平. 环境水力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

(收稿日期: 2013-03-05 编辑: 周红梅)