

变化环境下水文设计值计算方法研究综述

胡义明¹,梁忠民²,姚 轶²,王 军²,李彬权²

(1. 河海大学商学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:系统总结了国内外在变化环境下单、多变量水文设计值计算及计算成果不确定性评估三方面的研究成果,重点评述了基于水文极值系列重构、分布函数加权综合和变参数概率分布模型 3 类单变量水文设计值计算方法,分析了考虑边缘分布非一致性和结构参数非一致性的变参数联合分布函数模型,指出一致性条件下多变量重现期和设计值计算方法无法应用于非一致性条件下的多变量情景。提出了变化环境下水文设计值计算领域需进一步深入研究的问题,包括已建工程设计洪水复核调整、多变量情形下组合设计值计算、计算成果可靠性评估等。

关键词:水文设计值;变化环境;单变量;多变量;不确定性;计算方法

中图分类号:TV12 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)04-0089-06

Review on computational methods of hydrological design values in changing environment//HU Yiming¹, LIANG Zhongmin², YAO Yi², WANG Jun², LI Binquan² (1. *Business School, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The advances on the estimation of hydrological design values in changing environment in terms of univariate, multivariate design value estimation and uncertainty analysis of design values were systematically summarized. The series reconstruction method, weighted synthesis of distributed functions and varying-parameter probabilistic distribution model were reviewed with the emphasis for univariate hydrological design value estimation. In multivariate hydrological design value estimation, the varying-parameter joint distribution function model considering the inconsistency of marginal distribution and structural parameters of multivariate was analyzed and it is pointed out that the method for calculating the multivariate return period or design value cannot be applied to the multivariate cases under inconsistent conditions. This paper puts forward the problems to be further explored in the field of hydrological design value estimation under changing environments, including the design flood adjustment of the constructed projects, estimation of the combined design values in multivariate cases and the reliability evaluation of the calculation results.

Key words: hydrological design values; changing environment; single variable; multiple variable; uncertainty; computational methods

在工程水文计算中,无论是基于流量系列进行水文设计值计算的直接途径,还是通过设计暴雨与水文模型耦合的间接途径,都需要采用水文频率分析方法对流量或降雨的极值样本进行分析。现行水文频率分析方法的理论前提是:水文极值系列具有一致性(或平稳性),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。然而,由于气候变化及人类活动的影响,在流域层面上已形成了较为复杂的气候-人类活动影响链,改变了区域的降雨特性、流域下垫面的产汇流规律及河道洪水的天然时空分配模式^[1-2],这就导致了不同时期的洪水孕育环境发生改变,其结果是不同时期(或年份)的水文

极值事件的统计特征或概率分布发生变化,最直接的外在表现即为水文极值系列发生趋势性或跳跃性变异,而不再满足一致性要求。原则上,当水文极值系列不满足一致性要求时,已不能采用现行的一致性框架下的水文频率分析方法进行水文设计值计算。因此,开展变化环境下非一致性水文设计值计算方法研究,具有重要的理论及实践意义。

相比于传统一致性框架下水文设计值计算方法而言,变化环境下水文设计值计算方法的研究是一项新兴的研究课题。目前,变化环境下水文设计值的计算主要有基于水文极值系列重构途径、基于分布函数加权综合途径和基于变参数概率分布模型途

径3类,本文对这3类途径中的典型方法进行评述,并对需进一步深入研究的内容作了展望。

1 变化环境下单变量水文设计值计算

1.1 基于水文极值系列重构途径

基于水文极值系列重构途径的变化环境下水文设计值计算是通过非一致性水文极值系列进行重构,使重构后的系列满足一致性要求,进而再采用现行的一致性水文频率分析方法进行水文设计值计算。

用于水文极值系列重构的方法大体上可归纳为以下4大类:①建立变异点前后序列的降雨径流关系,并以此关系对变异后或变异前的系列进行修正。陆中央^[3]利用横山岭水库以上流域不同年代的年降雨量和年径流量建立统计关系,将变异点前的系列修正到现在状态下,也即实现了水库年径流系列的“向后还原”。②时间序列的分解和合成法^[4]。将水文序列分解为相对一致的随机性成分和非一致性的确定性成分,采用确定性模型对确定性成分进行拟合计算并预报,然后将其与随机性成分合成得到新的序列,进而可以得到过去、现在和未来不同时期的合成序列以及不同时期对应的概率分布函数。谢平等^[5]应用此方法对潮白河的年径流系列进行了研究,通过采用时间序列的分解和合成方法,得到了潮白河过去、现在和未来不同时期的年径流概率分布情况。胡义明等^[6]以金沙江流域某站点洪峰系列资料为例,采用滑动秩和检验法和有序聚类法分析了洪峰系列的跳跃性,采用序列的分解与合成方法对系列进行一致性修正,并基于修正的系列推求了水文设计值,结果表明基于修正系列和未修正系列推求的水文设计值存在明显差异。③基于振动中心对应均值的重构方法。该法假定变异性水文序列存在着理想化的平稳性状态,且此平稳状态所具有的振动中心(即均值)是序列某分割点前后子样本系列均值的线性组合,通过综合变异点前后两段系列特征,对趋势性或跳跃性变异系列进行一致性重构。胡义明等^[7-8]研究表明,经该方法重构后的系列可满足一致性要求。④基于水文模型的间接法。建立不同时期的下垫面特征与模型参数间的定量统计关系,进而用模型参数的变化来反映下垫面的变异;将不同时期的降雨系列资料与某一给定时期的水文模型结合(体现在参数上),从而达到洪水系列还原或还现^[9]。王忠静等^[10]探讨了传统水文还原方法可能存在的还原“失真”与还原“失效”现象及其成因,并建议利用分布式水文模型进行水资源分析的一致性修正。

基于水文极值系列重构的方法进行水文频率分析本质上并未能很好地考虑未来环境变化对水文频率分析成果的影响,如第①③④类方法仅是将系列还原(或还现)到过去(或现在)某个阶段,以获得在某一时期(阶段)条件下的水文极值系列的统计特征,而并未考虑未来环境变化对水文极值系列统计特征的影响。尽管第②类方法可以通过确定性模型对未来时刻的确定性成分进行预测,得到未来不同年份的序列统计特征,但在重现期较大或预测期较长的情况下,通过确定性模型对确定性成分进行预测存在较大不确定性,进而可能导致计算结果存在较大误差^[11]。

1.2 基于分布函数加权综合途径

基于分布函数加权综合途径的变化环境下水文设计值计算是通过对整个观测样本系列中的样本进行分类,使每一类中的样本系列(子样本系列)满足一致性要求,通过加权方法对各子样本系列对应的分布函数进行综合,进而获得一个综合的分布函数,基于该综合的分布函数推求给定标准的水文设计值。

基于分布函数加权综合途径的变化环境下水文设计值计算方法大体可以归为两类:①混合分布函数法。根据变异点位置将整个系列分为若干子系列,假定每个子系列样本满足一致性要求,通过加权方法对各子系列分布函数进行综合,得到表征整个系列分布的一个混合分布函数,用以描述整个系列的分布特征^[12-13]。Alila等^[12]应用混合分布函数方法对具有较长水文气象观测资料的Gila流域的水文特征进行了研究,发现应用混合分布模型进行频率分析比传统的方法要更好。王军等^[14]根据重建的淮河流域1470—1999年共530年夏季面平均降雨量系列数据,采用混合分布方法计算了指定标准对应的设计值,并与基于大样本(530年)数据计算的的经验设计值进行了对比,结果表明混合分布模型对观测系列具有较好的拟合效果。②条件概率分布法。根据洪水形成机理的差异性将年内洪水划分为多个时期,假定同一时期内的极值洪水样本服从同一分布,不同时期内的样本相互独立,且极值洪水事件以不同的概率发生在不同时期,通过对不同时期的条件概率分布函数进行加权综合,进而获得一个综合的分布函数,以进行洪水设计值计算。Singha等^[15]运用此方法对4组来自不同流域河流的洪量数据进行频率分析,取得了良好的效果。

基于分布函数加权综合途径的水文频率分析本质上也没有考虑未来环境变化对水文频率分析成果的影响,仅是采用综合分布函数对实测的非一致性

系列进行拟合,选取使拟合效果最优的综合分布函数来表征非一致性水文极值变量的分布特征,这就导致了综合分布函数包含的统计信息仅是针对已有实测资料,而未包含未来环境变化对分布函数的影响信息。

1.3 基于变参数概率分布模型途径

基于变参数概率分布模型途径的变化环境下水文设计值计算方法是目前研究较多的一类方法,通过建立概率分布函数中的参数与某些协变量(如时间、降雨等)之间的统计关系,以驱动分布函数中的参数随着协变量变化,来刻画未来环境变化对极值分布函数的影响^[16-19]。胡义明等^[16]基于 PE3 分布和 GEV 分布函数,通过假定分布中的参数随时间变化,构建了变参数概率分布函数模型研究了黄龙滩流域非一致性洪峰系列。Du 等^[17]将时间、降雨因子纳入到频率分析模型中,构建了不同协变量驱动的变参数概率分布模型对渭河 2 个站点非一致性最小年枯季径流系列进行了研究。尽管变参数概率分布模型可以刻画水文极值变量在未来条件下的分布特征,但由于未来每一年的分布函数不同,对于给定的工程水文设计标准(重现期 T),每一年对应的水文设计值 X_T 也将不同,即重现期和对应设计值之间不是唯一的对应关系,因此,采用哪一个 X_T 作为工程的设计值成为当前国内外工程水文计算中亟须解决的难题。为了推求这种随时间变化的水文设计值,期望等待时间法^[20]、期望发生次数法^[21-22]、设计寿命水平法^[23]、年平均可靠度法^[24]和等可靠度法^[25-26]被相继提出。

a. 期望等待时间法。该方法是基于一致性条件下重现期 T 的定义“直到第一次发生超过给定阈值 X_T 事件的期望等待时间”推导而获得。但该方法未能考虑工程设计寿命对水文设计值计算的影响,且对于呈减少趋势系列而言,其可能导致无数值解或需要将已建的趋势模型随着时间无限外延。

b. 期望发生次数法。该法是基于一致性条件下重现期 T 的另一种定义方式“在重现期 T 内,水文极值事件 X_T 的期望发生次数为 1 次”而获得^[21],本文将其表述为“重现期内的期望发生次数法”。随后,Obeysekera 等^[22]基于“在工程设计寿命周期内,某种水文极值事件的期望发生次数为 N ”这一思想,也推导出用于非一致性条件下水文设计值 X_T 的计算公式,但其计算结果不能采用重现期概念去解释,本文将其表述为“设计寿命期内的期望发生次数法”。

c. 设计寿命水平法。该方法是由 Rootzén 等^[23]于 2013 年提出,即在给定设计寿命周期内,设

计标准对应设计值被超过的概率或风险。该方法的计算结果不能采用重现期概念去解释,此外,由于可靠度值的大小受工程设计寿命和重现期大小的综合影响,这使得可靠度值大小的确定有一定的难度,而关于如何确定风险值大小也未做明确说明。

d. 年平均可靠度法。也可称之为年均超过概率法,是由 Read 等^[24]提出,是指在工程的设计寿命期或一定的规划期内,对于给定事件 X_T ,规划期的平均年超过概率和一致性条件下重现期 T 对应的超过概率($1/T$)相等。以此,推导出变化环境下重现期 T 对应的水文设计值 X_T 。

e. 等可靠度法。该方法是梁忠民等^[25-26]提出的一种变化环境下水文设计值估计方法,是指虽然环境变化导致了水文的非一致性,但根据非一致水文极值系列推求的水文设计值具有的水文设计可靠度不应降低,至少应与一致性条件下的设计值具有相同的可靠度。在等可靠度概念中,有效地考虑了变化环境下工程设计寿命长短对工程水文设计值计算的影响,提供了一种确定可靠度值大小的方法,同时也为非一致性条件下设计成果与现有工程建设标准的协调与衔接提供了技术途径,解决了变化环境下工程水文设计值中的两类问题:①待建水利工程的水文设计值计算,即如何根据非一致性的观测系列,推求指定标准的水文设计值;②已建水利工程的水文设计值调整,即对于已建成且运行多年的水利工程,如何调整其原有的水文设计值,使调整后工程所具有的水文设计可靠度与当初设计阶段的可靠度一致。

Yan 等^[27]基于设计寿命水平法、期望发生次数法、年平均可靠度法和等可靠度法,分析对比了不同方法在推求设计洪水时结果的差异性,结果表明后 3 种方法的计算结果较为接近,建议在实际应用中采用年平均可靠度法和等可靠度法进行设计洪水推求。2017 年, Hu 等^[28]基于贝叶斯理论,研究了在考虑参数估计不确定性条件下,基于期望等待时间法和期望发生次数法估计的水文设计值间的差异性,结果表明,无论是从设计值的期望估计还是置信区间估计来看,两种方法估计结果的差异性明显,且同等设计标准(重现期)对应的工程水文设计可靠性也不同。哪种设计值计算方法更适合于工程应用还需要进一步研究,但总体来看,等可靠度法因其能解决待建工程水文设计值计算及已建工程设计洪水复核调整问题,具有较好的潜在应用前景。

2 变化环境下多变量水文设计值计算

变化环境下多变量水文频率分析中的非一致性

问题来源于两个方面:①各个变量自身对应边缘分布的非一致性;②不同变量间相关结构的非一致性。理论上,变化环境下非一致性单变量频率分析方法都可以用来进行非一致性边缘分布函数的构建处理。冯平等^[29]采用混合分布法分别对跳跃性变异的洪峰和洪量系列的分布特征进行了拟合,并基于 Copula 函数构建了峰量的联合分布,推求了两变量设计洪水;但该研究没有考虑峰-量间结构的非一致性及边缘分布函数在未来条件下的演变发展规律。

Bender 等^[30-31]通过假定边缘分布函数中的参数及 Copula 函数中的结构参数随时间变化,构建了可综合考虑边缘分布不一致性和结构参数不一致性的变参数联合分布函数模型,分析了二维非一致性水文极值变量情形下联合分布函数的演变规律及分布函数中各个参数的变化情况。但是,由于联合分布函数中的参数随时间变化,这使得在不同时间(年份)联合分布函数是不同的。如对于洪峰和洪量组成的二维联合分布 $F_l(X, Y)$ 而言,分布函数 $F_l(X, Y)$ 在不同时刻是不一样的。对于给定洪峰流量 X ,洪量 Y 对应的条件概率分布 $F_l(Y|X)$ 在不同时刻也是不同的。这就导致了一致性条件下多变量重现期和设计值计算的方法无法应用于非一致性条件下的多变量情景,而目前关于非一致性条件下多变量重现期和设计值组合的计算问题还缺乏有效研究。

3 变化环境下水文设计值计算成果的不确定性分析

一致性条件下的水文频率分析成果主要受样本代表性、参数估计方法及频率曲线线型的影响^[32-33]。比较而言,变化环境下水文频率分析成果的不确定性来源要更多,如在基于重构的水文极值系列推求设计洪水时,设计值的不确定性除了受样本代表性、参数估计、概率分布线型选取影响外,还受重构方法本身的影响。对于重构后满足一致性要求的水文极值系列,原则上已有的面向一致性频率分析成果不确定性评估的方法都是可以采用的。冯平等^[34]在对变异性水文系列进行修正后,基于修正后的系列进行频率分析,并分析了参数不确定性对水文设计值的影响。而基于变参数概率分布函数进行设计值推求时,影响设计值估计的主要不确定性来源有概率分布中的参数与协变量间驱动关系、模型参数估计、概率分布线型选取、驱动参数变化的协变量等。胡义明等^[16]应用贝叶斯理论研究了采用等可靠度概念推求洪水设计值时,参数估计不确定性对洪水设计值的影响;在获得洪水设计值的期望

估计(点估计)的同时,还可通过置信区间估计来定量评估洪水设计值的不确定性。

总体而言,目前关于此类问题的研究主要集中在分析水文设计值随时间或其他协变量演变时的不确定性方面^[35-36],而关于推求变化环境下给定标准(重现期)对应水文设计值的不确定性研究尚较少。

4 研究展望

关于变化环境下的水文设计值计算问题,从理论与应用层面来看,需重点解决待建工程的水文设计值计算、已建工程的设计洪水复核调整及多变量组合情形下水文设计值计算 3 类关键问题。从目前国内外的研究情况来看,以下问题还需要进一步深入探讨:

a. 关于变化环境下工程水文设计值的计算,目前主要集中在如何基于非一致性水文系列推求指定重现期对应的水文设计值,以期为待建工程的水文设计提供依据。而关于如何调整已建工程的原始水文设计值,使工程依据调整后的水文设计值,在变化环境下依旧能满足其当初规划建设时期的可靠度(安全)要求的研究相对较少。为此需继续研究变化环境下已建工程的设计洪水复核调整问题。

b. 变化环境下的水文频率分析目前主要考虑单变量情形,而关于多变量水文频率分析问题的研究尚处于起步阶段。尽管可采用变参数的 Copula 联合分布函数描述不同变量(如洪峰和洪量)间的非一致性联合分布特征,但多变量重现期和设计值组合的计算问题尚未能得到有效解决,有待进一步深入研究。

c. 在变化环境下,影响水文设计值计算结果可靠性的因素较多,如何有效评估设计值计算结果的不确定性问题需要深入研究。

参考文献:

- [1] 张建云,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234. (ZHANG Jianyun, ZHANG Silong, WANG Jinxing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2):230-234. (in Chinese))
- [2] 冯婧,严登华,秦天玲,等.变化环境下我国西北内陆河区洪灾综合应对[J].水资源保护,2012,28(4):17-23. (FENG Jing, YAN Denghua, QIN Tianling, et al. Integrated coping strategies for floods in continental river regions in Northwest China in a changing environment [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4):17-23. (in Chinese))

- Chinese))
- [3] 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 Zhongyang. Restore estimation of annual runoff series [J]. Hydrology, 2000, 20(6): 9-12. (in Chinese))
 - [4] 谢平, 陈广才, 夏军. 变化环境下非一致性年径流序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]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 2005, 38(6): 6-9. (in Chinese))
 - [5] 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 Guangcai, HAN Shumin, 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))
 - [6] 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): 37-40. (HU Yiming, LIANG Zhongmin. Frequency analysis of non-stationary flood series based on jump analysis[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2011(7): 37-40. (in Chinese))
 - [7] 胡义明, 梁忠民, 杨好周, 等. 基于趋势分析的非一致性水文频率分析研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 21-25. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, YANG Haozhou, et al. Study on frequency analysis method of non-stationary observation series based on trend analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(5): 21-25. (in Chinese))
 - [8] 胡义明, 梁忠民, 赵卫民, 等. 基于跳跃性诊断的非一致性水文频率分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(6): 51-53. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, ZHAO Weimin, et al. Study on frequency analysis method of non-stationary observation based on jump analysis [J]. Yellow River, 2014, 36(6): 51-53. (in Chinese))
 - [9] 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 on sublayer and land-cover change on flood in Daqinghe River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2010, 24(8): 27-30. (in Chinese))
 - [10] 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 Zhongjing, LI Hongyi, YANG Dawen. 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))
 - [11] 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): 145-152. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis for non-stationary observation [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 145-152. (in Chinese))
 - [12] ALILA Y, MTIRAOUI A. Implications of heterogeneous flood-frequency distributions on traditional stream-discharge prediction techniques [J]. Hydrological Processes, 2002(16): 1065-1084.
 - [13] 成静清, 宋松柏. 基于混合分布非一致性年径流序列频率参数的计算[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 229-234. (CHEN Jingqing, SONG Songbai. Calculation of hydrological frequency parameters of inconsistent annual runoff series based on mixed distribution [J]. Journal of Northwest A & F University, 2010, 38(2): 229-234. (in Chinese))
 - [14] 王军, 宁亚伟, 胡义明, 等. 混合分布在非一致性水文频率分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 1-4. (WANG Jun, NING Yawei, HU Yiming, et al. Application of mixed probability distribution to nonstationary hydrological frequency analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 1-4. (in Chinese))
 - [15] SINGHA V P, WANG S X, ZHANG L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 175-195.
 - [16] 胡义明, 梁忠民, 杨靖, 等. 贝叶斯框架下等可靠度法推求洪水设计值的不确定性分析[J]. 水资源研究, 2016, 5(6): 530-537. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, YANG Jing, et al. Uncertainty analysis of equal reliability principle based estimation of design flood in the framework of Bayesian theory [J]. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(6): 530-537. (in Chinese))
 - [17] DU T, XIONG L H, XU C Y, et al. Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 234-250.
 - [18] LOPEZ J, FRANCES F. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish Rivers, using climate and reservoir indices as external covariates [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 10(3): 3103-3142.
 - [19] 叶长青, 陈晓宏, 张家鸣, 等. 水库调节地区东江流域非一致性水文极值演变特征、成因及影响[J]. 地理科学, 2016, 33(7): 851-858. (YE Changqing, CHEN Xiaohong, ZHANG Jiaming, et al. Changing properties, causes and impacts of non-stationary extreme stream flow under the changing environment of hydraulic engineering regulated basin in Dongjiang River, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 33(7): 851-858. (in Chinese))

Chinese))

[20] OLSEN J R, LAMBERT J H, HAIMES Y Y. Risk of extreme events under nonstationary conditions [J]. Risk Analysis, 1998, 18(4): 497-510.

[21] PAREY S, HOANG T T H, DACUNHA-CASTELLE D. Different ways to compute temperature return levels in the climate change context [J]. Environmetrics, 2010, 21: 698-718.

[22] OBEYSEKERA J, SALAS J D. Frequency of recurrent extremes under nonstationarity [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 21(5): 1-9.

[23] ROOTZÉN H, KATZ R W. Design life level: quantifying risk in a changing climate [J]. Water Resources Research, 2013, 49(9): 5964-5972.

[24] READ L K, VOGEL R M. Reliability, return periods, and risk under nonstationarity [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6381-6398.

[25] 梁忠民, 胡义明, 黄华平, 等. 非一致性条件下水文设计值估计方法探讨 [J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 52-55. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, HUANG Huaping, et al. Study on the estimation of design value under non-stationary environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 52-56. (in Chinese))

[26] 梁忠民, 胡义明, 王军, 等. 基于等可靠度法的变化环境下工程水文设计值估计方法 [J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 399-406. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, WANG Jun, et al. Estimation of design flood using equivalent reliability method under changing environment [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 399-406. (in Chinese))

[27] YAN L, XIONG L H, GUO S L, et al. Comparison of four nonstationary hydrologic design methods for changing environment [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 132-150.

[28] HU Yiming, LIANG Zhongmin, CHEN Xi, et al. Estimation of design flood using EWT and ENE metrics and uncertainty analysis under non-stationary conditions [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2017, 31: 22617-22626.

[29] 冯平, 李新. 基于 Copula 函数的非一致性洪水峰量联合分析 [J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1137-1147. (FENG Ping, LI Xin. Bivariate frequency analysis of non-stationary flood time series based on Copula methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1137-1147. (in Chinese))

[30] BENDER J, WAHL T, JENSEN J. Multivariate design in the presence of non-stationarity [J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 123-130.

[31] SARHADI A, BURN D H, CONCEPCIÓN A M, et al. Time varying nonstationary multivariate risk analysis using a dynamic Bayesian Copula [J]. Water Resources Research, 2016, 52(3): 2327-2349.

[32] LIANG Zhongmin, CHANG Wenjuan, LI Binqun, et al. Bayesian flood frequency analysis in the light of model and parameter uncertainties [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26: 721-730.

[33] 梁忠民, 宁方贵, 王钦钊. 权函数水文频率分析方法的一种应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 95-98. (LIANG Zhongmin, NING Fanggui, WANG Qinzha. Application of weighted function method to hydrological frequency analysis [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2001, 29(4): 95-98. (in Chinese))

[34] 冯平, 黄凯. 水文序列非一致性对其参数估计不确定性影响研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1145-1154. (FENG Ping, HUANG Kai. A study about the impacts of non-stationary characteristic on the uncertainties of parameters estimation in hydrological series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1145-1154. (in Chinese))

[35] LIMA C H R, LALL U. Spatial scaling in a changing climate: a hierarchical Bayesian model for non-stationary multi-site annual maximum and monthly streamflow [J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3/4): 307-318.

[36] SUN X, MERZ B, LALL U, et al. Hierarchical Bayesian clustering for nonstationary flood frequency analysis: application to trends of annual maximum flow in Germany [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6586-6601.

(收稿日期: 2017-08-21 编辑: 熊水斌)

+++++

(上接第 69 页)

[9] YAN Fuzhang, TU Xinbin, LI Guangchen. The uplift mechanism of the rock masses around the Jiangya Dam after reservoir inundation, China [J]. Engineering Geology, 2004, 76: 141-154.

[10] 蒋中明, 李双龙, 丁鹏, 等. 水库枢纽区抬升变形水地质结构模式研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2026-2033. (JIANG Zhongming, LI Shuanglong, DING Peng, et al. Modes of hydro-geological structure for uplift deformation near reservoir pivot [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2026-2033. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-08-22 编辑: 熊水斌)