

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.010

基于等可靠度法的变化环境下 工程水文设计值估计方法

梁忠民^{1,2}, 胡义明³, 王军¹, 李彬权¹, 杨靖¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学商学院管理科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 气候变化及人类活动影响的加剧, 改变了水文极值系列产生的平稳性条件, 给现行水文频率分析计算方法带来挑战, 亟需发展非平稳性条件下的水文频率分析理论与方法。讨论了等可靠度法的基本思想, 拓宽了该方法在变化环境下工程水文设计方面的应用, 以解决变化环境下工程水文设计值中的两类问题: ① 对于待建工程, 依据非平稳性的水文极值系列, 如何推求给定标准的设计值; ② 对于已建工程, 如何协调/调整已建工程的洪水设计值, 以适应变化环境对其产生的影响。以黄龙滩 1956—2014 年共 59 年的 15 日洪量系列为对象, 对等可靠度法进行应用示例研究, 并分析了参数估计不确定性对水文设计值的影响。结果表明, 在非一致性条件下, 给定设计标准下的水文设计值随着工程设计使用年限的变化而变化, 且设计值估计的不确定性随着工程设计使用年限的增加而增大。

关键词: 变化环境; 工程水文设计; 等可靠度法; 设计使用年限; 不确定性

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)03-0398-08

气候变化及人类活动的影响, 使得不同时期水文过程背景条件/洪水孕育环境发生了改变^[1-3], 动摇了现行水文频率分析方法对水文极值系列的平稳性假定^[4-8]。基于非平稳的水文系列, 如何推求水文设计值是工程水文设计中迫切需要解决的问题。

目前, 在对非平稳性极值系列的分布特征进行描述时, 通常采用变参数概率分布函数, 即假定分布函数中的参数是其他因子(也称为协变量, 如时间、降雨等)的函数, 通过建立分布函数中的参数与协变量间的统计关系, 根据协变量的变化驱动分布函数中参数的变化, 以刻画环境变化对水文极值分布的影响^[9-14]。显然, 在变化环境下, 对于给定的设计标准(如重现期), 工程水文设计值不是常数, 而是随时间而变化。如何推求这种随时间变化的水文设计值, 国外学者提出了期望等待时间法^[12]和期望发生次数法^[13]。然而, 两个方法都存在一些不足, 如期望等待时间法, 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^[14], 进而导致设计值的估计存在更大的不确定性。梁忠民等^[15]提出了非平稳性水文设计值估计的等可靠度法, 该方法基于可靠度指标, 将设计值估计与工程设计使用年限联系起来, 不仅一定程度上降低了变参数概率分布模型随时间外延而给设计值估计带来的不确定性, 也为非平稳性条件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。

本文进一步讨论了等可靠度法的基本思想, 拓宽其在非平稳性水文设计值估计方面的应用, 以期解决变化环境下工程水文设计中面临的两个关键问题: ① 如何基于非平稳性的水文极值样本系列, 推求待建工程的水文设计洪水值; ② 调节已建工程的洪水设计值, 使工程能适应环境变化所带来的影响。作为示例, 根据实测的非一致性流量系列对等可靠度法进行了应用研究, 并分析了参数估计不确定性对水文设计值估计的影响。

收稿日期: 2016-10-06; **网络出版时间:** 2017-04-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170426.0931.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51190095); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402709)

作者简介: 梁忠民(1962—), 男, 辽宁凤城人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水文水资源研究。

E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

1 等可靠度法基本理论

1.1 等可靠度法概念

为了诠释等可靠度法的基本思路,现以如下的水文设计任务来说明:某地建设一座设计使用年限为 L 年的大坝工程,为此需要根据设计标准推求相应的洪水设计值。

在平稳性条件下,认为任何一年洪水极值的总体分布,在过去、现在和未来均不变,所以由指定的设计标准(重现期或设计频率)根据历史洪水极值资料估计的总体分布即可推求设计洪水值。但在非平稳性条件下,每一年洪水极值的总体分布均不同,所以同一设计标准对应的洪水设计值亦不同,或同一洪水设计值对应的标准不同,故现行方法无法直接使用。从水文分析计算角度,虽然环境变化导致了水文系列的非平稳性,但根据非平稳性水文极值系列推求的水文设计值,其具有的水文设计可靠度不应该被降低,至少应与现行平稳性条件下频率计算方法提供的设计值具有相同的可靠度,因为后者的可靠性已被大量的工程实践所接受。因此,虽然对非平稳性水文极值变量,现行平稳性条件下的重现期或设计频率的概念已不复存在,但基于这种“等可靠度”的思想,依然可以借用平稳性条件下设计可靠度的概念进行非平稳样本下设计值的推求。

以 R_S 表示平稳条件下、 T 年一遇重现期设计值(记为 $X_{T,S}$)的水文可靠度,则

$$R_S = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^L \quad (1)$$

$$P(X > X_{T,S}) = \frac{1}{T} \quad (2)$$

在非平稳性条件下,虽然平稳性条件下 T 年一遇重现期概念不再适用,但根据前述的“等可靠度”概念,仍可以推求等同于 T 年一遇标准的水文设计值(记为 $X_{T,NS}$)。以 R_{NS} 表示非平稳性条件下设计值 $X_{T,NS}$ 的水文可靠度,则

$$R_{NS} = \prod_{t=1}^L [1 - F_t(X_{T,NS})] \quad (3)$$

$$F_t(X_{T,NS}) = P(X_t > X_{T,NS}) \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, $F_t(X)$ 代表第 t 年水文极值的概率分布函数, $t=1, 2, \dots, L$ 。显然,由于非平稳性, $F_t(X)$ 逐年不同。

令 $R_{NS} = R_S$, 即

$$\prod_{t=1}^L [1 - F_t(X_{T,NS})] = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^L \quad (5)$$

求解式(5),即可获得 $X_{T,NS}$, 从而解决非平稳性条件下水文设计值的估计问题。

综上所述,在非平稳性条件下,采用等可靠度法的思想,水文设计人员仍然可以借用平稳性思维框架下的重现期概念,结合工程的设计使用年限,即可推求非平稳性条件下的水文设计值。

1.2 待建工程的水文设计值推求

现假设有 n 年的历史洪峰观测系列 x_1, x_2, \dots, x_n , 该系列由于存在某种趋势(如减少)而呈现非平稳性特征,而待建工程的设计使用年限为 L 年。

首先采用变参数的皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ)概率分布函数(也可以是其他类型分布函数)对该洪峰系列的分布特征进行拟合,即分布中的分布参数随着其他因子(如时间等)的变化而变化,不是常数。为便于阐述,此处仅假定P-Ⅲ分布函数中的位置参数 μ 随时间变化,如 $\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t$, 而尺度参数 β 和形状参数 γ 仍为常数。为此,变参数的P-Ⅲ概率密度函数可表示为

$$f(x | \mu(t), \beta, \gamma) = \frac{\beta^\gamma}{\Gamma(\gamma)} [x - \mu(t)]^{\gamma-1} e^{-\beta[x - \mu(t)]} \quad (6)$$

图 1 中给出了 P-III 分布函数随时间变化的示意图。由于洪峰系列 x_1, x_2, \dots, x_n 呈减少趋势, 故分布函数的位置参数 $\mu(t)$ 随时间也呈现减少趋势, 进而导致不同时刻对应的分布函数 $F_i(X|\mu(t), \beta, \gamma), t = 1, 2, \dots, n$ 随时间 t 而变化, 因此, 对于某一特定的洪峰值(图 1 中的 X_{thr}), 其对应的超过概率 $p_i, t = 1, 2, \dots, n$ 亦随时间而变化。

基于 n 年的历史洪峰观测系列 X_1, X_2, \dots, X_n , 可估计变参数 P-III 概率分布函数 $F_i(X|\mu(t), \beta, \gamma), t = 1, 2, \dots, n$ (式(6))中的参数 μ_0, μ_1, β 和 γ , 进而可得到工程设计使用年限或未来规划期内(从第 $n + 1$ 到 $n + L$), 逐年的变参数 P-III 概率分布函数 $F_i(X|\mu(t), \beta, \gamma), t = n + 1, n + 2, \dots, n + L$, 据此计算的对应设计值 $X_{T,NS}$ 的水文设计可靠度为

$$R_{NS} = \prod_{t=n+1}^{n+L} [1 - F(X_{T,NS} | \mu(t), \beta, \gamma)] \tag{7}$$

根据等可靠度方法, $R_{NS} = R_S$, 即

$$\prod_{t=n+1}^{n+L} [1 - F(X_{T,NS} | \mu(t), \beta, \gamma)] = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^L \tag{8}$$

对 P-III 分布, 式(8)左边表达式一般很复杂, 难于得到 $X_{T,NS}$ 的解析解, 可通过试错法推求。

1.3 已建工程水文设计值的协调

主要阐述利用等可靠度法调节已建工程的设计值, 使工程在变化环境下, 依旧可以保持与设计阶段相同的可靠度。现假设基于平稳性的历史洪峰观测资料, 已建设了一座设计标准为 T 年、设计使用年限为 L 年的水利工程。则该已建工程的水文设计可靠度为

$$R_S = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^L \tag{9}$$

假设在工程运行了 t_0 年($t=t_0$)后, 环境变化导致了水文极值的非平稳性, 如图 2 中呈现的减少趋势规律。也就是说, 在工程运行第 1 年到第 t_0 年这一时期, 洪峰系列满足一致性要求, 而在第 $t_0 + 1$ 到 L 这一时期, 水文极值呈现减少趋势。为便于阐述, 假设第 $t_0 + 1$ 到第 L 年间, 洪峰的概率分布函数服从 1.2 节描述的变参数 P-III 概率分布函数 $F_i(X|\mu(t), \beta, \gamma), t = t_0 + 1, t_0 + 2, \dots, L$ (图 2)。由于从第 $t_0 + 1$ 到第 L 这一时期, 洪峰系列呈现减少趋势, 所以为了使工程保持与设计阶段相同的可靠度, 需要调整原来在平稳性条件下估计的设计值 $X_{T,S}$, 获得新的设计值 $X_{T,NS}$, 因假设极值呈减小趋势, 故理论上 $X_{T,NS}$ 应小于 $X_{T,S}$ 。

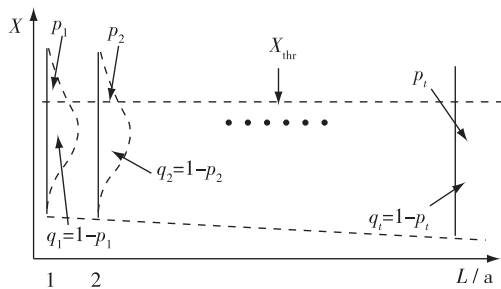


图 1 变参数概率分布函数随时间变化示意
Fig. 1 Schematic diagram for varying-parameter probability distribution function

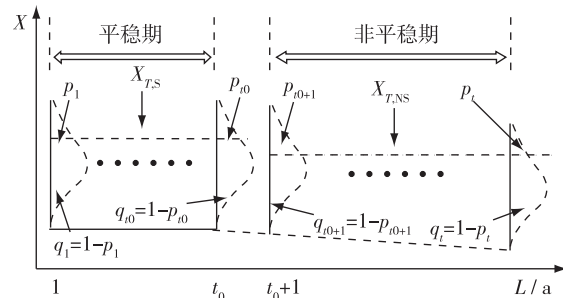


图 2 变参数概率模型随时间变化示意
Fig. 2 Schematic diagram for varying-parameter probability distribution function

工程在 L 年的设计使用年限内(图 2 中的第 1 到第 L 年这一时期)的可靠度可表示为

$$R_{NS} = \prod_{t=1}^L q_t \tag{10}$$

式中: q_t 为 t 时刻洪峰不超过设计值的概率。

对于第 1 年到第 t_0 年这一时期, 由于工程是在平稳性环境下, 按照 T 年一遇设计洪峰值 $X_{T,S}$ 运行, 所

以, 这一时期每一年洪峰不超过设计值 $X_{T,S}$ 的概率为

$$q_1 = q_2 = \dots = q_{t_0} = \left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (11)$$

对于 $t_0 + 1$ 到第 L 年这一时期, 假设工程按照设计值 $X_{T,NS}$ (图2) 进行运行, 则这一时期每一年洪峰不超过设计值 $X_{T,NS}$ 的概率为

$$q_t = 1 - F(X_{T,NS} | \mu(t), \beta, \gamma) \quad t = t_0 + 1, t_0 + 2, \dots, L \quad (12)$$

在考虑环境变化影响条件下, 整个工程在 L 年的设计使用年限内的可靠度 (即式(10)) 可进一步表示为

$$R_{NS} = \prod_{t=1}^L q_t = \prod_{t=1}^{t_0} q_t \prod_{t=t_0+1}^L q_t = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{t_0} \prod_{t=t_0+1}^L [1 - F(X_{T,NS} | \mu(t), \beta, \gamma)] \quad (13)$$

基于等可靠度法的思想: 无论环境如何变化, 都应保证非平稳性条件下推求的洪水设计值对应的工程可靠度 R_{NS} (式(13)) 应与工程在设计时 (平稳性条件下) 的可靠度 R_S (式(9)) 一致, 因此公式为

$$\left(1 - \frac{1}{T}\right)^L = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{t_0} \prod_{t=t_0+1}^L [1 - F(X_{T,NS} | \mu(t), \beta, \gamma)] \quad (14)$$

即

$$\prod_{t=t_0+1}^L [1 - F(X_{T,NS} | \mu(t), \beta, \gamma)] = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{L-t_0} \quad (15)$$

通过求解式(15), 可获得调整后的设计值 $X_{T,NS}$, 在工程的未来运行管理中以此为据, 可保证已建工程在其整个设计使用年限期内的可靠度与其在设计阶段规划的可靠度相同, 使工程适应环境变化所产生的影响。

2 示例研究

以黄龙滩 1956—2014 年共 59 年的 15 日洪量系列为对象, 对等可靠度法进行示例研究。图 3 给出了该洪量的时间序列图。从图 3 可以看出, 该系列呈现出较明显的减少趋势。在 0.05 显著性水平下, 采用 Mann-Kendall (M-K) 方法对趋势的显著性进行了检验, 计算的 M-K 统计量的值为 -2.08, 其绝对值大于 0.05 显著性水平下对应的阈值为 1.96, 即 15 日洪量系列呈现显著性的减少趋势。

采用变参数概率分布函数对该洪量系列的分布特征进行拟合, 这也是目前拟合趋势性变异系列的常用方法^[7-11]。本研究中以时间为驱动变量, 建立 15 日洪量总体的分布参数与时间之间的函数关系, 以刻画其分布函数随时间的演变规律。本次选取 P-III 分布和 GEV 分布, 并假定: 分布函数中位置参数随时间变化, 尺度参数和形状参数不变; 分布函数中位置参数和尺度参数随时间变化, 形状参数不变; 构建了如下 4 种变参数概率分布模型对 15 日洪量进行拟合。

(1) 模型 1: P-III 分布函数中的位置参数 μ 随着时间线性变化, 而尺度参数 β 和形状参数 γ 为常数。即 $\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t$, $\beta(t) = \beta_0$, $\gamma(t) = \gamma_0$, 记为 P-III-LoCT。

(2) 模型 2: GEV 分布函数中的位置参数 ξ 随时间变化, 而尺度参数 α 和形状参数 K 为常数。即 $\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 t$, $\alpha(t) = \alpha_0$, $K(t) = K_0$, 记为 GEV-LoCT。

(3) 模型 3: P-III 分布中位置参数 μ 和尺度参数 β 随时间变化, 形状参数 γ 为常数。即 $\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t$, $\beta(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t)$, $\gamma(t) = \gamma_0$, 记为 P-III-LoCT-ScIT。

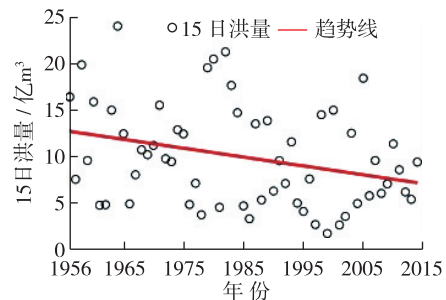


图3 极值洪量系列的时间序列

Fig. 3 Time series of 15-day flood volume

(4) 模型4: GEV分布函数中位置参数 ξ 和尺度参数 α 随时间变化,而形状参数 K 为常数。即 $\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 t, \alpha(t) = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 t), K(t) = K_0$, 记为GEV-LocT-ScIT。

模型中的参数采用Bayesian方法估计,以获得参数估计值的后验概率分布,并选取使后验概率值达到最大的参数作为模型的参数估计值。利用AIC和BIC指标对上述4种模型的拟合效果进行了评估,结果见表1。

表1 不同模型对15日洪量系列拟合的AIC和BIC指标值

Table 1 Results of AIC and BIC for fitting the 15-day flood volume of different models

指标	P-III-LocT	GEV-LocT	P-III-LocT-ScIT	GEV-LocT-ScIT
AIC值	358	360	354	358
BIC值	364	366	361	364

从表1可以看出,P-III-LocT-ScIT模型的AIC和BIC值最小,拟合最优,为此选取P-III-LocT-ScIT作为15日洪量的线型。P-III-LocT-ScIT模型中参数的估计结果为: $\mu_0 = -0.048, \mu_1 = 2.932, \beta_0 = 0.0004, \beta_1 = -1.307, \gamma_0 = 2.564$ 。

图4给出了模型拟合阶段,超过概率为0.01、0.02、0.05和0.1条件下,对应的分位点值随时间的演变特征。从图4可以看出,不同超过概率条件下的分位点估计值都随时间在不断减少,如0.01超过概率对应的分位点估计值,从1956年的31.04亿 m^3 下降到2014年的22.17亿 m^3 ,0.02超过概率对应的分位点值从1956年的27.90亿 m^3 下降到2014年的19.58亿 m^3 ,这些均与15日洪量系列呈减少趋势相吻合。1956—2014年,发生大于超过概率0.01对应分位点值的洪量次数为0次;发生大于超过概率0.02对应分位点值的洪量次数为0次;发生大于超过概率0.05对应分位点值的洪量为3次,平均20年一次;发生大于超过概率0.1对应分位点值的洪量次数为6次,平均10年一次。表明该模型的总体拟合效果较好,可采用该模型推求未来不同时刻对应的概率分布函数作为后续设计值估计的总体分布模型。

基于该变参数概率分布模型,采用等可靠度法计算了待建工程在设计使用年限 L 为40 a(2015—2054年)、50 a(2015—2064年)、60 a(2015—2074年)、80 a(2015—2094年)和100 a(2015—2114年)时,重现期 T 为10 a、20 a、50 a和100 a对应的15日洪量的设计值,见图5。从图5可以看出,对于给定的重现期,其对应的设计值随着工程设计使用年限的增加呈减少趋势,这与15日洪量系列呈减少趋势的实际情况符合。

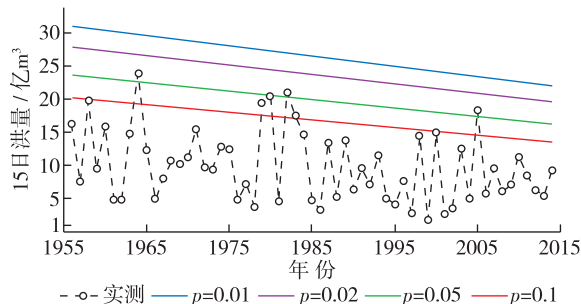


图4 根据历史资料模型P-III-LocT-ScIT估计的15日洪量设计值随时间变化

Fig. 4 Design values of 15-day flood volume change with time for the P-III-LocT-ScIT model on the basis of historical data

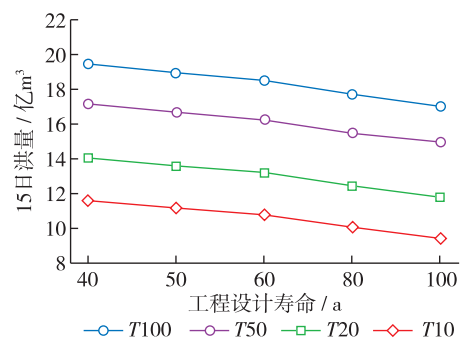


图5 不同工程设计使用年限及重现期条件下对应的15日洪量设计值

Fig. 5 Design values of 15-day flood volume with different design engineering life and different return periods

另外,分析了参数估计不确定性对设计值估计的影响。从参数的后验概率分布中抽取满足要求的5000组参数。基于每一组参数,在给定工程使用年限和重现期条件下,采用等可靠度法,可获得5000个相应的估计值;将这5000个估计值的经验分布作为设计值的抽样分布,进而评估设计值估计的不确定性。

图 6 给出了工程设计使用年限 L 为 100 a、80 a、60 a、50 a 和 40 a 条件下, 重现期 T 为 100 a 对应的设计值估计的抽样分布。从图 6 可以看出, 设计值的分布随着工程设计使用年限的增加都发生了左移, 期望值逐渐减少, 这与 15 日洪量系列随时间呈减少趋势吻合。对于呈现减少趋势的系列而言, 对于给定的超过概率, 对应的分位点估计值随着时间的增加呈现减少趋势, 因此, 对于给定的重现期, 对应的设计值会随工程设计使用年限的增加而减少, 反之亦然。

基于不同工程设计使用年限条件下设计值的抽样分布, 可以计算给定重现期对应设计值的期望估计和 90% 置信区间估计。图 7 给出了工程设计使用年限为 100 a、80 a、60 a、50 a 和 40 a 条件下, 100 a、50 a、20 a 和 10 a 重现期对应设计值的期望估计和 90% 置信区间估计。

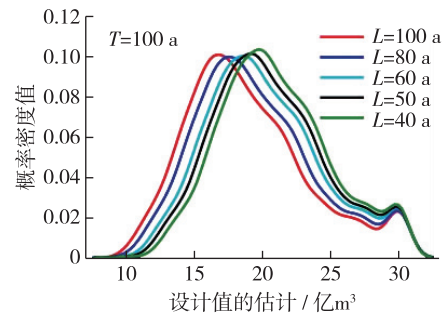


图 6 100 年一遇 15 日洪量设计值在不同工程设计使用年限条件下抽样分布的变化

Fig. 6 Sampling distribution of design value for 15-day flood volume with 100-year return period changes with design engineering life

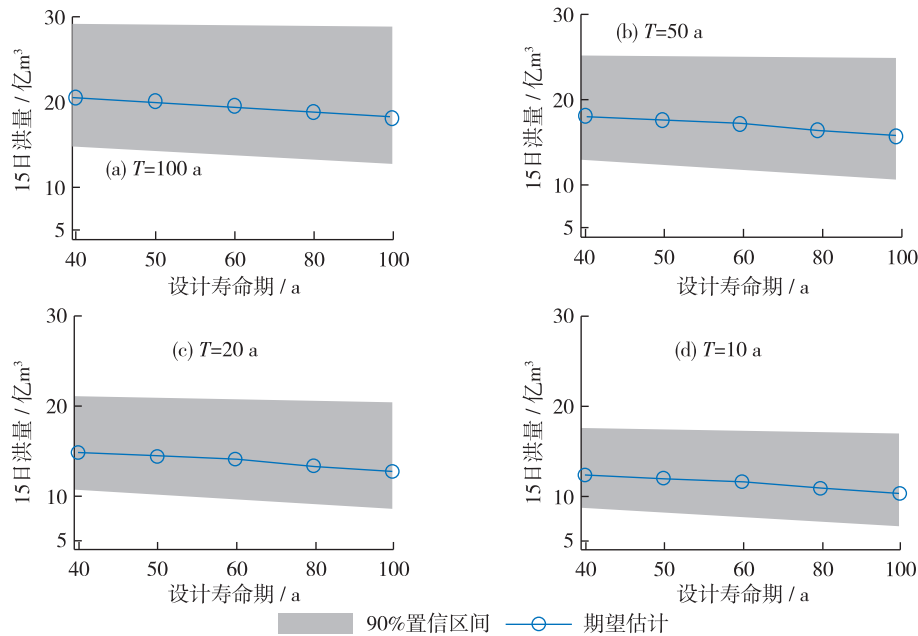


图 7 不同工程设计使用年限及重现期下设计值的期望估计和 90% 置信区间估计

Fig. 7 Expectation and 90% confident interval of design value for 15-day flood volume with different return periods under the conditions of different design engineering life

从图 7 可以看出, 随着工程设计使用年限的增加, 各个重现期对应设计值的期望估计均在减少, 90% 置信区间的上、下限值也在相应减少。另外, 对于 4 个给定的重现期, 其设计值 90% 置信区间的宽度随着工程设计使用年限的增加而增大, 如工程设计使用年限为 40 a 和 100 a 时, 100 年一遇设计值的 90% 置信区间宽度从 14.15 增大到 16.14, 其他情形亦类同, 表明设计值估计的不确定性随着工程设计使用年限的增加而增大; 同理, 对同一工程设计使用年限值, 重现期越大, 置信区间越宽, 表明估计的不确定性也越大。

3 结 论

(1) 本文进一步论述了等可靠度法的基本思想, 拓宽了其在变化环境下工程水文设计值估计方面的应

用,并建立了非一致性条件下计算方法与一致性方法之间的一种联系,为非一致性条件下水文设计与现行工程采用的成果之间的衔接与协调提供了新的途径。重点解决:①对于待建工程,可采用等可靠度法推求给定设计标准下的水文设计值;②对于已建工程,可采用等可靠度法协调/调整原设计值,使工程能适应环境变化对其产生的影响。

(2)在非平稳性条件下,对于给定的重现期(设计标准),其对应的水文设计值随着工程设计使用年限的变化而变化,因此,变化环境下的工程水文设计问题需要考虑工程设计使用年限对设计值的影响。

(3)设计值估计的不确定性随着工程设计使用年限的增加而增大,表明在变化环境下,时间变参数概率分布模型外延的时间越长,估计结果的不确定性也越大。

(4)作为示例性研究,本文仅构建了概率分布函数中的参数与时间的驱动关系,而没有考虑其他协变量(如降雨、气温等)的影响。若当采用其他协变量驱动分布函数中参数变化时,则需要建立参数与协变量之间的线性/非线性关系,以驱动分布函数随着协变量变化而变化,对此可做进一步研究。

参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战: I: 城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4): 594-605. (ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: hydrological response to urbanization [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [2] 贺瑞敏,张建云,鲍振鑫,等.海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J].水科学进展,2015,26(1): 1-9. (HE R M, ZHANG J Y, BAO Z X, et al. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 1-9. (in Chinese))
- [3] 张树磊,杨大文,杨汉波,等.1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J].水科学进展,2015,26(5): 605-613. (ZHANG S L, YANG D W, YANG H B, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960—2010 [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 605-613. (in Chinese))
- [4] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: whither water management [J]. Science, 2009, 319: 573-574.
- [5] 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): 864-871. (LIANG Z M, HU Y M, WANG J. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 864-871. (in Chinese))
- [6] 谢平,陈广才,雷红富.变化环境下基于趋势分析的水资源评价方法. [J].水力发电学报,2009,28(2): 14-19. (XIE P, CHEN G C, LEI H F. Hydrological frequency calculation principle of inconsistent annual runoff series under changing environments [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 28(2): 14-19. (in Chinese))
- [7] 冯平,曾杭,李新.混合分布在非一致性洪水频率分析的应用[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(4): 298-303. (FENG P, ZENG H, LIN X. Non-stationary flood-frequency analysis based on mixed distribution [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(4): 298-303. (in Chinese))
- [8] 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方法研究[J].水力发电学报.2013,31(5): 21-25. (HU Y M, LIANG Z M, YANG H Z, et al. Study on frequency analysis method of non-stationary observation series based on trend analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 31(5): 21-25. (in Chinese))
- [9] 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.
- [10] GILROY K L, MCCUEN R H. A nonstationary flood frequency analysis method to adjust for future climate change and urbanization [J]. Journal of Hydrology, 2012, 414/415(1): 40-48.
- [11] LOPEZ J, FRANCIS 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, 17: 3189-3203.
- [12] SALAS J D, OBEYSEKERA J. Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(3): 554-568.
- [13] PAREY S, HOANG T T H, DACUNHA-CASTELLE D. Different ways to compute temperature return levels in the climate change

context [J]. *Environmetrics*, 2007, 21: 698-718.

- [14] READ L K, VOGEL R M. Reliability, return periods, and risk under nonstationarity [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6381-6398.
- [15] 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): 52-56. (LIANG Z M, HU Y M, HUANG H P, 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))

Estimation of design flood using equivalent reliability method under changing environment*

LIANG Zhongmin^{1,2}, HU Yiming³, WANG Jun¹, LI Binqun¹, YANG Jing¹

(1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*;

2. *National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro-Science, Hohai University, Nanjing 210098, China*;

3 *Research Institute of Management Science, Business School, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The intensified impact of climate change and anthropogenic activities has changed the stationary characteristics of the hydrological extreme series, thus posing a challenge on the Traditional Hydrological Frequency Analysis (THFA) method. Therefore, a new theory and approach is required for analyzing non-stationary hydrological frequency. In this paper, further discussions are conducted about the fundamental idea of Equivalent Reliability (ER) approach, and ER application for the design flood estimation under a changing environment has been expanded. The ER approach is expected to address two key issues: ① to estimate the design flood with a given design standard for a project yet to be constructed; ② to adjust the design flood for an already constructed project for its adaptation to the changing conditions. The 59 years of 15-day flood volume series from 1956 to 2014 is used to demonstrate the ER approach, and analysis is conducted for the impact of parameter uncertainty on design flood. The results show that the design flood with a given return period under non-stationary conditions varies with the engineering design lifetime, and the uncertainty of the design flood estimation increases when the engineering design lifetime extends.

Key words: changing environment; engineering hydrology; equivalent reliability; design engineering life; uncertainty

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51190095) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0402709).