

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201901082



本刊网刊

涉水工程洪水风险基本概念的探讨

王文圣¹, 黄伟军², 覃光华^{1*}, 丁晶¹

(1.四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2.成都大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106)

摘要:洪水风险是水文学中一个非常重要的研究课题。本文论述了洪水风险的确切含义, 指出现存的两种洪水风险理念: 次风险和年风险, 前者认为年内最大和次大洪水引起的风险都应在工程设计中考虑, 后者认为只有年内最大洪水引起的风险在设计中才能考虑。提出了以频率表征洪水风险度的思路, 与次风险度对应的称作次频率, 与年风险度对应的称为年频率。阐明了基于年风险度和次风险度为基础的防洪标准是不同的。探讨了以年内最大洪水信息为基础的年风险度和以年内最大及次大洪水信息为基础的年风险度的差异, 研究表明前者符合现行防洪标准要求, 后者不完全符合防洪标准要求。

关键词:洪水风险; 风险度; 防洪标准; 年最大选择; 超定量取样法

中图分类号:TV122

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)01-0013-05

Preliminary Probe on Basic Concept of Flood Risk for Wading Project

WANG Wensheng¹, HUANG Weijun², QIN Guanghua^{1*}, DING Jing¹

(1.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2.School of Architecture and Civil Eng., Chengdu Univ., Chengdu 610106, China)

Abstract: Flood risk is a very important subject in hydrology. Firstly, the exact meaning of flood risk has been discussed, and two concepts of flood risk in the current situation, time risk and annual risk, have been pointed out. In the former, Both risks resulting from annual maximum flood and submajor flood are considered simultaneously in the design. In the latter, only risk resulting from annual maximum flood is considered in the design. Secondly, frequency or probability is defined as flood risk degree in this paper. While time frequency corresponds to time flood risk degree, annual frequency corresponds to annual flood risk degree. Lastly, the analysis and calculation show that the standards for flood control of annual flood risk degree and time flood risk degree are different from each other. The difference between annual flood risk degree based on annual maximum flood value and that based on annual maximum and submajor flood value has been discussed. The former accords with current standard for flood control of water-related engineering, whereas the latter is not consistent fully with the current standard for flood control.

Key words: flood risk; flood risk degree; standard for flood control; annual maximum sample selection; super quantitative sampling

洪水灾害对人类社会产生巨大影响, 历来受到高度关注。涉水工程因遭遇大洪水可能导致破坏, 这就致使工程面临洪水风险。所谓洪水风险, 就是工程遭受洪水损失、伤害或毁灭的可能性, 这种不确定性包括发生与否的不确定、发生时间的不确定和导致结果的不确定^[1-2]。洪水风险研究开启了从以往单

纯注重“防御洪水”转变为“洪水风险管理”的步伐。洪水风险成为水文学研究的热点和重点, 其基本原理、方法和技术途径已被广泛接受并形成了系统的知识体系和规范^[2-7]。

洪水资料选择、洪水频率计算方法、防洪标准及洪水风险之间的关系是密切联系的, 水文学者就它

收稿日期:2019-11-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51679155; 51879172); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401903)

作者简介:王文圣(1970—), 男, 教授, 博士。研究方向: 水文不确定性分析。E-mail: wangws70@scu.edu.cn

*通信作者:覃光华, E-mail: ghqin2000@163.com

网络出版时间:2020-12-21 15:21:09

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20201218.1606.002.html>

们的确切含义、基本理念及其区别开展了大量的研究,取得相关的认识和成果^[8-14]。限于篇幅,这里不再对这些成果进行回顾。目前这些成果已部分达成共识,但仍然存在不明晰之处,相关的处理和运用会导致不同的风险结果,涉水工程的洪水风险就截然不同,采取相应措施避免破坏或损失的风险代价就有异。其中关键点在于对年风险、次风险及分期风险的正确理解,它们在涉水工程(如水利工程、海绵城市、湿地、桥涵工程等)设计、施工和管理中广泛运用。为此,本文论述洪水风险的含义和理念,重点分析洪水风险的度量,探讨年洪水风险度、次洪水风险度及分期洪水风险度的差异,为涉水度工程的防洪安全设计提供参考和依据。

1 洪水风险的含义和理念

1.1 洪水风险的含义

涉水工程并非一旦出现洪水 x 便随之发生灾害,而是出现大于或等于某量级洪水 x_0 时才会导致洪水风险,也就是说,当 $x \geq x_0$ 时,洪水风险发生。 $x \geq x_0$ 是一个事件,该事件出现,风险便随之出现。因此,洪水风险有3个显著特点:

1)它是一个不幸(不利或非期望)的事件。事件($x \geq x_0$)发生就意味着风险出现,灾害就发生。人们期望该事件不发生,形象地称为“非期望事件”。

2)它是一个不确定性事件。事件($x \geq x_0$)是可能事件,“发生”的可能性大小不确定。追根溯源,事件($x \geq x_0$)的不确定是由洪水 x 不确定性导致的。

3)它是一个面对将来的事件。作为风险的事件,必须是面临的事件(将来的事件)。因此,就风险本质而言,必然隐藏着预测的含义,一种概率意义下的定量预测。

综上所述,洪水风险的含义乃是面临可能的非期望事件。当然上述的含义可以由洪水风险推广到其他风险,如干旱风险、污染风险、经济风险等。

1.2 洪水风险的理念

洪水风险含义为事件($x \geq x_0$)发生,洪水风险出现。洪水在一年中发生多次,例如未来发生 K 次,其中,最大值记为 x_1 ,次大值记为 x_2 ,最小洪水记为 x_K 。现在的问题是如何计算洪水风险?

当前有两种理念:1)认为凡是洪水 x 超过 x_0 的,均记为风险,此时称 x_0 为阈值(设计值),这种获取资料的方式称为超定量取样法。若 $x_K \geq x_0$,则该年发生 K 次洪灾,出现 K 次洪水风险; $K=1$ 时,出现了一次风险; $K=2$ 时,出现了两次风险,依次类推。在这种理念下还有一种资料获取方式,就是每年有 K 次洪水值被选中,称为年多个样法^[12],它是超定量取样法的一种特殊

情况。2)仅认为最大洪水 x_1 超过 x_0 才记为风险,不再考虑 $x_K \geq x_0$ ($K \geq 2$)事件的洪水风险,这是基于工程被最大洪水破坏后次大洪水并不形成破坏而考虑的;在这种理念下,每年仅选取年最大洪水进行洪水风险分析,这种资料选样方式称为年最大值取样法。

为了叙述之便,将两种理念的前者称之为次风险理念,以次为单位考虑洪水风险,因为计及年内最大和次大等洪水引起的风险;后者称之为年风险理念,以年为单位考虑洪水风险,因为只计年内最大值洪水引起的风险。可见,次风险理念和年风险理念在形式上差异明显,实质上的区别也常常被忽略。这两类风险对涉水工程的防洪安全设计至关重要。

2 洪水风险度量

对“存在洪水风险”的说法并不满足规范要求,而是需要关心洪水风险的大小,这就涉及洪水风险的度量问题。洪水风险是一个特殊性事件。度量风险必然从度量事件着手,即通过事件度量清晰地表征风险度。显然对可能事件度量最科学合理、实用的指标为频率(概率)。因此,洪水风险度便顺理成章地采用频率(概率)指标。频率大,事件出现的可能性大,洪水风险小;反之,亦然。

当风险以频率表征其大小时,则称为风险度。本文严格区分二者,风险单指事件,而风险度单指事件发生的频率。

次风险和年风险的风险度均以频率表征,分别称为次风险度和年风险度。对次风险度,以次频率表示,记为 P_s ;对年风险度,以年频率表示,记为 P_y 。 P_s 和 P_y 完全不同,存在本质差异,前者以次计量,后者以年计量,两者绝对不能混淆。

2.1 以年风险为基础的防洪标准

涉水工程防洪安全设计的目的是为了保证在发生小于规定风险度洪水前提下工程免遭洪水损害。在当前科学技术水平和财力下,只在极其特殊的异常工程设计时才绝对免遭洪水风险;绝大多数涉水工程设计时都容许存在一定的风险度,当然这种容许风险度会随社会的发展和财力不断增加而不断变化。在社会发展的某一阶段,国家和有关行业在综合分析基础上针对不同对象制定出相应容许洪水风险度,这就是通常所说的“洪水设计标准”或“防洪标准”^[5-6]。也就是说,“容许洪水风险度”取决于“防洪标准”,防洪标准反映了防洪风险度。标准高,防洪风险度低;反之,亦然。现行工程防洪标准以洪水重现期(N_y)或出现频率(P_y)表示,且重现期的时间单位以“年”计^[5-6]。 P_y 与 N_y 的关系如下:

$$P_y = \frac{1}{N_y} \quad (1)$$

式(1)表明,以年为单位的重现期 N_y 与对应的年频率 P_y 互为倒数。 P_y 就是年风险度。现行防洪标准 P_y 只计年内最大洪水引起的风险,而不考虑次大洪水等导致的风险。因此,估计 P_y 必须以年最大洪水为依据。这也是《水利水电工程设计洪水计算规范》^[7]明文规定频率计算中的年洪峰流量和不同时段洪量应按年最大值法进行选样的根本原因。

2.2 以次风险为基础的防洪标准

超定量取样法获得的样本涉及次风险,对应的是次风险度 P_s ,但其防洪风险度仍以年为单位的重现期来表示。

1) 以选样个数直接转换

超定量取样法或年多个样法获取的样本中一年里有多次洪水值被选中。以年多个样法为例进行分析,记年多个样法下的重现期为 N_s 。设有 n 年实测资料,每年平均选 k 次大洪水,则洪水个数为:

$$T = n \times k \quad (2)$$

将 T 个洪水由大到小排序后,序号为 m 的洪水 x_m 的频率 P_s 为:

$$P_s = \frac{m}{T} \quad (3)$$

对应的重现期 R 为:

$$R = \frac{1}{P_s} = \frac{T}{m} \quad (4)$$

式中, P_s 为事件($X \geq x_m$)的次频率, R 为平均多少次洪水中出现1次该事件(以次为单位)。如 $R=10$ 表示平均发生10次洪水中出现1次事件($X > x_m$)。

以次计的重现期如何转换到以年计的重现期,关键在于寻求计量单位次和年的定量关系。讨论年多个样法情况。将 R 除以 k 得:

$$N_s = \frac{R}{k} \quad (5)$$

式中, N_s 为事件 $X \geq x_m$ 以年计的重现期。例如, $k=5$ (每年中选取5次大洪水), $R=10$,则 $N_s=2$,即事件($X \geq x_m$)的重现期为2 a,相当于平均发生10次洪水中重现1次。

将式(3)、(4)代入式(5)得:

$$N_s = \frac{T}{km} = \frac{1}{kP_s} \quad (6)$$

利用式(6)由 T 、 k 和次洪水的序号 m 便可计算事件($X \geq x_m$)的年计重现期 N_s 。显然, N_s 是由次频率根据年选样数 k 直接转换而来的年重现期。

2) 依据公式推导转换

对任何一年而言,在该年中发生 k 次大洪水,这 k 次大洪水情况是各式各样的。现讨论 x_1, x_2, \dots, x_k 均小于 x_m 的特殊情况。事件($X \geq x_m$)的频率为 P_s ,则对

应事件($X < x_m$)的频率为 $(1-P_s)$ 。一年中发生 k 次大洪水,这些洪水均小于 x_m ,计 $x_1 < x_m, x_2 < x_m, \dots, x_k < x_m$ 。若各次洪水之间相互独立。一年中出现 k 次洪水均小于 x_m 的可能性表示为 $(1-P_s)^k$,那么,一年中出现事件($X \geq x_m$)的可能性便为 $1-(1-P_s)^k$,即以年计的可能性,记为 P_c ,故有:

$$P_c = 1 - (1 - P_s)^k \quad (7)$$

对式(7),若 $k > P_s$ (一般 k 比 P_s 大得多),可得近似式:

$$P_c = 1 - e^{-kP_s} \quad (8)$$

将 $P_c=1/N_c$ 代入式(8),可得:

$$\frac{1}{N_c} = 1 - e^{-kP_s} \quad (9)$$

式(9)为以概率统计原理推导出的关系式。通过式(9)可将 P_s 转换成年重现期 N_c 。

N_c 和 N_s 具有明显区别。下面讨论二者的关系。将式(6)代入式(9)得:

$$\frac{1}{N_c} = 1 - e^{-\frac{1}{N_s}} \quad (10)$$

简化后为:

$$N_s = \frac{1}{\ln N_c - \ln(N_c - 1)} \quad (11)$$

这就是 N_s 和 N_c 的关系表达式。

由式(11)可得表1。表1清楚地显示:在重现期5 a以下 N_s 和 N_c 存在较明显的差异。在5 a以上差异较小。需要说明,式(11)和文献[12]的研究结果一样,但本文的论述和推导却与之有别。特别是 N_c 和 N_y (见式(1))有本质不同,而文献[12]视为一样。文献[12,14]探讨了不同选样之间的频率转换方法,并对年多个样法与年最大值法之间3种次频率与年频率之间的转换关系式进行了分析。

表1 N_c 和 N_s 的近似关系

Tab. 1 Approximation relation between N_c and N_s

	a					
N_c	2	5	10	20	50	100
N_s	1.44	4.48	9.49	19.50	49.50	99.50

总之,以次风险为基础的防洪标准,需要由次风险度转换而得 N_s 或 N_c ,最终仍然使用以年为单位的重现期度量(间接体现年风险度)。 $N_c(N_s)$ 是以次风险形式重现,而 N_y 是以年风险形式重现; $N_c(N_s)$ 的数值较 N_y 小,即 $N_c < N_y, N_s < N_y$ 。

2.3 以分期洪水风险为基础的防洪标准

不同季节的洪水特性差异显著,因此称为分期洪水,如次汛期洪水、主汛期洪水。显然,各分期的洪

水风险不一样,分期洪水风险和年洪水风险亦有所不同^[10]。当水库工程管运时,既涉及分期风险,亦与年风险牵连。本节探讨分期风险和年风险之间的关系。为叙述方便,将洪水季节分为次汛期(A)和主汛期(B)。

现研究A和B期的洪水风险。A、B期的洪水阈值分别为 x_{0A} 、 x_{0B} ,以 x_A 、 x_B 分别表示A期和B期可能发生的洪水。事件($x_A \geq x_{0A}$)出现,A期发生的洪水风险度为 P_A ;事件($x_B \geq x_{0B}$)出现,B期发生的洪水风险度为 P_B 。A和B期洪水统计特性有差异,则 $P_A \neq P_B$;显然 $P_A = P_B$,则A和B期洪水特性无异,无需分期。中国的洪水计算规范^[7]规定,分期洪水统计样本应分别由分期内最大洪水组成,由样本可推得A和B期的洪水频率曲线,如图1所示。

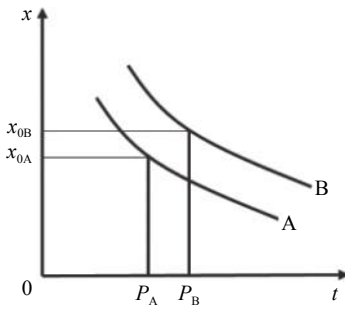


图 1 洪水频率曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram on the flood frequency curves

据设计值 x_{0A} 和 x_{0B} 在相应频率曲线上分别得到表征事件($x_A \geq x_{0A}$)的风险度 P_A 和表征事件($x_B \geq x_{0B}$)的风险度 P_B ,其中 P_A 和 P_B 均隶属于次频率,因为它们所表征的是次风险度。究其根源,A和B期的最大值系列由两部分组成,年最大值、次大值,即系列中一定含有次大值,从而导致次风险度。若分为3期,A、B和C期,则3个分期内的最大值就可能包含各种次大值。总之,分期越多,包含的次大洪水就越多,考虑次大洪水就会造成风险度越大。

P_A 和 P_B 表示次风险度,不符合年风险度的要求。为此,必须将次风险度换算成年风险度。考虑一般情况,A和B期洪水间存在统计相关关系(独立为特殊情况)。

事件($x_A \geq x_{0A}$)和事件($x_B \geq x_{0B}$)间存在相依关系时,可考虑应用Copula函数建立随机变量 x_A 和 x_B 的联合分布函数 $C(u, v)$,从而推求出以年计的风险度^[15]:

$$P_c = 1 - C(u, v) \quad (12)$$

式中, $u=1-P_A$, $v=1-P_B$, P_c 为据 P_A 和 P_B 推求得到的年风险度, C 为Copula函数。

当 x_A 和 x_B 独立时, $C(u, v)=uv$,式(12)变为^[16]:

$$P_c = 1 - uv = 1 - (1 - P_A)(1 - P_B) = P_A + P_B - P_A P_B \quad (13)$$

式(12)或(13)显示出 P_c 与 P_A 、 P_B 之间的定量关系。

多数情况下分期洪水是独立的,即 x_A 和 x_B 相互独立,重点分析式(13)中 P_c 同 P_A 、 P_B 的关系。一般, $(P_A + P_B)$ 在数量上远远大于 $P_A P_B$,式(13)可近似为:

$$P_c = P_A + P_B \quad (14)$$

式(14)表明各分期的风险度在数量上远小于年风险度。由次频率变换得到的 P_c 是年风险度,而 P_A 、 P_B 为次风险度,二者有本质差异。

当前,普遍认为只要A期的 P_A 和B期的 P_B 都达到防洪标准 P_c ,工程防洪就完全达标了。这是一种误解和假象。如果 $P_A = P_B = P_c$,则式(13)或(14)右端之和远大于 P_c ,也就是说,工程防洪未达标。

在年和分期洪水风险分析中,一定先以年风险为准,然后由式(13)或(14)来选择 P_A 和 P_B 。对于一定的 P_c ,有多种 P_A 、 P_B 组合。原则上应通过综合分析选择使工程效益达到最优的一种组合。为了简化,可考虑 $P_A = P_B$ 的特殊组合,由式(14)有:

$$P_A = P_B = \frac{1}{2} P_c \quad (15)$$

通过式(15)得到的 P_A 和 P_B 作为A和B期次洪水风险度,以此获得 x_{0A} 和 x_{0B} (如图2所示)。将 x_{0A} 和 x_{0B} 作为防洪计算依据,工程的年风险度为 P_c ,防洪达标。

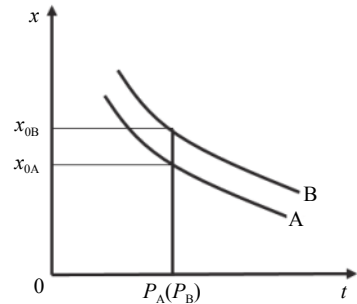


图 2 分期洪水频率曲线示意图

Fig. 2 Schematic diagram on the flood frequency curves in different seasons

总之,分期的次风险度 P_A 或 P_B 不应被误解为年风险而作为防洪标准。以 P_A 和 P_B 为基础通过概率统计特性转换得到的 P_c ,在形式上隶属于年风险度^[10,15],但是 P_c 在实质上与 P_y 有所不同,后面将给予讨论。

3 3种洪水风险度的对比分析

由前面分析可知,以 P_s 、 P_A 、 P_B 等为次风险度, P_c 为由次风险度转换而得到的年风险度, P_y 为以实测年最大洪水为依据由频率计算而得的年风险度。 P_y 表示的年风险度是符合现行防洪标准要求的,因为 P_y 表征的风险度排除了一年次大值等所引起的风

险(这正是现行标准所要求的)。

次风险度和年风险度有本质区别,即 $P_s(P_A, P_B)$ 和 P_c, P_y 不一样。从含义、推求时所依据的资料、推求方法、风险性质和是否满足现行标准等方面进行比较分析,具体详见表2。

表2 3种洪水风险度的比较

含义	P_s, P_A, P_B	P_c	P_y
推求时所依据的资料	年最大值和次大值等	年最大值和次大值等	年最大值
推求方法	以频率计算直接估计	由统计原理推导的公式间接估计	通过年最大值的频率计算直接估计
风险性质	包含年最大值和次大值等引起的风险	除最大值引起的风险外还一定程度上包含次大值等引起的风险	仅由年最大值引起的风险
满足现行标准情况	完全不满足	不完全满足	满足

P_c 来自式(7)和(12),表明 P_c 受次风险度影响。具体而言,式(7)的 P_c 受 P_s 的影响,式(12)的 P_c 受 P_A 和 P_B 共同影响。由于 P_s, P_A 和 P_B 分别受到一年中次大洪水等影响, P_c 必然最终受到次大洪水等的影响。换言之, P_c 所表征的年风险度不但包含年最大洪水导致的风险,也在一定程度上包含次大洪水等引起的风险。以次风险度为基础转换而得到的 P_c 总要烙上次风险度的痕迹,隐含有次风险度的“基因”。要满足现行防洪标准,必须摆脱次风险度的影响,也就是说只有排除次大洪水值等信息;否则,防洪达标是不可能的。现行防洪标准 P_y 表征完全由年最大洪水导致的年风险。因此, P_y 不能和 P_c 混淆。由于 P_c 增加了次大值等导致的风险,甚至大于 P_y 。文献[15]的计算实例显示出这一特性。本文作者根据实际资料计算,其结果也验证了这一情况。

现行涉水工程的防洪标准为何要排除次大洪水等所引起的风险,下面通过一个事例进行简要分析。对一个涉水工程,若不幸在某年遭遇特大洪水破坏。在破坏的这一年,不可能立即将此工程修复,即不存在同一年中再次被破坏的可能。在工程设计时,只考虑在一年中可能发生的一次风险,这意味着只考虑由年最大洪水引起的风险,无需再考虑次大洪水引起的风险。

需要说明的是,本文研究成果主要侧重于洪水致灾因子的危险度,没有考虑成灾体的脆弱性及风险暴露。

4 结 语

洪水风险分析是一个非常重要的、极其复杂的

课题,本文仅从风险、风险度、重现期的基本概念入手对其进行了探讨和分析,可以得出初步结论如下:

1)讨论洪水风险的基本含义,即为面临的可能非期望事件;给出了次风险和年风险理念,前者是计及年内最大和次大洪水引起的风险,认为年内最大和次大洪水引起的风险都应在设计中考考虑;后者认为只有年内最大洪水引起的风险在设计中考考虑。

2)将洪水风险的大小度量度为风险度,以频率表示。与次风险度对应的称作次频率,与年风险度对应的称作年频率。

3)以年最大洪水信息为基础的年风险和以次大洪水信息为基础获得的年风险,二者在含义上有所不同。前者符合现行标准要求,后者不完全符合要求。

4)基于次风险度间接推导出重现期 N_c, N_s ,与直接推求的 N_y 相比,它们在数量上有差异,本质上也不同;一般情况下, $N_c < N_y, N_s < N_y$ 。

参考文献:

- [1] Du Tao, Xiong Lihua, Li Shuai, et al. Risk-based nonstationary design flood and uncertainty analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(2): 241–253. [杜涛, 熊立华, 李帅, 等. 基于风险的非一致性设计洪水及其不确定性研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(2): 241–253.]
- [2] 王文圣, 张翔, 金菊良, 等. 水文学不确定性分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 刘新立. 区域水灾风险评估模型的理论和实践[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [4] Ni Changjian, Wang Jie. Further discussion on the definition of natural disaster risk[J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(3): 1–5. [倪长健, 王杰. 再论自然灾害风险的含义[J]. *灾害学*, 2012, 27(3): 1–5.]
- [5] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程等级划分及洪水标准: SL252—2017[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [6] 中华人民共和国水利部. 防洪标准: GB50201—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [7] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范: SL44—2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [8] Lee C H, Kim T W, Chung G H, et al. Application of bivariate frequency analysis to the derivation of rainfall-frequency curves[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, 24(3): 389–397.
- [9] Shi Minghua, Zhong Denghua. Estimation of over-level flood risk of construction diversion using hydrological simulation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 29(3): 30–34. [石明华, 钟登华. 施工导流超标洪水风险率估计的水文模拟方法[J]. *水利学报*, 1998, 29(3): 30–34.]

(下转第46页)