

病险水库运行风险的复合不确定性分析

胡德秀¹, 杨 杰^{1,2}, 周孝德¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

【摘 要】 【目的】针对病险水库运行风险的量化问题,进行灰色-随机风险计算的复合不确定性分析方法研究。【方法】将病险水库运行中的复杂不确定性影响关系,简化处理为仅由灰色和随机不确定性构成,由此建立了病险水库运行风险的灰色-随机风险率计算方法,并通过对功能函数的确定,将灰色-随机风险概率转换成一般随机风险率,最后应用改进一次二阶矩法,实现对病险水库运行风险的复合不确定性分析与计算。【结果】所求得的风险值为一灰色区间,客观地反映了水库运行风险的不确定性。【结论】工程实例表明,所提出的复合不确定性分析,能较好地评价病险水库的运行风险。

【关键词】 病险水库;运行风险;复合不确定性;灰色-随机风险概率

【中图分类号】 TV698.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)03-0230-05

Analysis on complex uncertainty for the run risk of ill reservoir

HU De-xiu¹, YANG Jie^{1,2}, ZHOU Xiao-de¹

(1 Institute of Water Resources & Electricity, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: 【Objective】 Aimed at the quantitative analysis for the run risk of ill reservoir, a complex uncertainty analysis method of grey-stochastic risk evaluation was put forward. 【Method】 By simplifying the complicated uncertainty relationships in the run of ill reservoir to a grey-stochastic complex uncertainty, the evaluation method of grey-stochastic risk probability was set up for ill reservoir risk analysis. According to ascertaining the functional function, the grey-stochastic risk probability was transformed into commonly stochastic risk probability. Finally, the amended first-order second-moment method was utilized to calculate the run risk of ill reservoir. 【Result】 The risk probability obtained by the grey-stochastic risk evaluation fell in a grey space, which satisfactorily reflected the uncertainty of reservoir run risk. 【Conclusion】 Project instance analysis shows that the complex uncertainty analysis method proposed can satisfactorily evaluate the run risk of ill reservoir.

Key words: ill reservoir; run risk; complex uncertainty; grey-randomicity risk probability

不确定性广泛存在于自然、社会及工程领域中,使得人们对事物发展的趋势与结果无法作出准确判断,由此产生了风险的概念。事实上,不确定性和风险是一对孪生物:一方面,不确定性的存在导致了风

险的产生;而另一方面,风险大小又综合反映了各种不确定性的作用。

大坝失事风险的量化问题,一直是病险水库运行风险分析研究的重点。目前,国内外研究人员^[1-5]

* [收稿日期] 2008-04-22

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50779051);水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目(2007B037);陕西省教育厅专项科研计划项目(07JK354);西安理工大学科学研究基金项目(106-210509)

[作者简介] 胡德秀(1973—),女,四川涪陵人,讲师,在职博士,主要从事水利工程风险分析和水污染控制研究。
hudexiu@xaut.edu.cn

[通信作者] 杨 杰(1971—),男,四川大邑人,副教授,博士,主要从事水工结构工程及大坝安全监测与控制研究。
yjie999@xaut.edu.cn

主要针对水库运行风险中的某种单一不确定性,如随机性、模糊性、灰色性、未确知性等,分别采用概率统计^[6]、模糊集理论^[7]、灰色理论^[8]和未确知数学^[9]等来量化风险。但实际上,在病险水库运行中,不同类型的 uncertainty 往往共同存在、相互影响、相互渗透,有时很难准确辨识到底何种不确定性的作用更为显著,如果仅考虑其中某种不确定性的单一作用,显然不尽合理。但如何对两种及两种以上不确定性交互作用而形成的复合不确定性问题进行研究,不仅涉及到对多种不确定性的有效辨识和分析,而且还涉及到对多种数学理论方法的交叉和综合应用,因而是一个十分复杂的课题,目前国内外相关研究还较少。因此,在水利工程风险意识逐步加强、风险管理科学逐渐得以重视的今天,开展病险水库运行风险的复合不确定性分析方法研究,无疑具有重要意义。

为此,作者结合近年来的研究^[10],将病险水库运行中诸多不确定性共同作用的不明确关系看作灰色,同时将各种荷载作用及由此而产生的结果看作是以随机不确定性影响为主,由此将病险水库运行中的诸多不确定性简化处理为主要由灰色和随机两种不确定性构成,从而展开对灰色-随机复合不确定性作用下的病险水库运行风险分析方法研究,以期对病险水库风险分析及其除险加固提供参考。

1 基于灰色-随机风险概率的病险水库运行风险分析

所谓灰色,是指信息的不完全性,也就是认识的不完全性。“灰”是相对于“黑”(完全不知)和“白”(完全已知)而言的,可以理解为“部分已知部分未知”。由于各种因素的影响,使得人们对客观事物的认识,总是不完全和不充分的,具有灰色性。灰色系统理论认为,从本质上看,灰色性是比随机性更基本、更广泛的一种不确定性。灰色系统的输出是各种灰色因素综合作用的结果,其必然蕴涵着系统本身某种内在的规律。

水库大坝本身就是一个复杂的不确定性系统,引起该系统出现安全问题的不确定性风险因素很多,如气候环境变化、坝体和坝基破坏、泄流能力不足、洪水漫顶、渗流控制措施不当、滑坡、地震、施工质量差及运行管理失误等。在对病险水库的运行风险分析中,首先要考虑的正是各种风险因素的不确

定性。从灰色系统的观点看,这些不确定性,既源于病险水库大坝系统内在的不确定性,也源于模型、参数的不确定性和获取信息的不足,它们除了表现为常见的随机不确定性外,有时更多地表现为灰色不确定性。在文献[11]中,Helton 将复杂系统的不确定性分为随机不确定性和主观不确定性两种。其中随机不确定性的产生,来自于系统的复杂性和表现形式的多样性,一般可用统计概率,即风险率来描述或表征;而主观不确定性则是由于信息缺乏,使得人们对系统信息的认识不足所引起,因此可以将其视为以灰色为表征的不确定性,与之相应的灰色不确定性风险概率,则可以通过灰色系统理论方法加以描述和量化。

基于以上分析和认识,并借鉴 Helton 的思想,可以将水库大坝系统看作一个复杂的灰色-随机不确定性系统,将病险水库运行中诸多不确定性共同作用的不明确关系看作灰色,并考虑到系统中较为重要的随机不确定性因素作用,因此可以将整个系统中的诸多不确定性作用处理为由灰色和随机不确定性构成,从而展开对灰色-随机不确定性交互作用下的复合不确定性问题的研究。

1.1 灰色概率的不确定性特性表达

设 P_G 是 (Ω, Ψ) 上的闭区间集值测度,且 $1 \in P_G(\Omega)$,则称映射 $P_G: \Psi \rightarrow P[0, 1]$ 为灰色概率,称 (Ω, Ψ, P_G) 为灰色概率空间。对样本空间 Ω 上取值于实数域的随机变量函数 ξ ,有:

$$F_G(x) = P_G(\xi \leq x), (-\infty < x < +\infty), \quad (1)$$

称其为随机变量 ξ 的灰色概率分布函数。

如果存在函数 $f_G(x)$,使对于任意的 x ,有:

$$F_G(x) = \int_{-\infty}^x f_G(y) dy, \quad (2)$$

则称 $f_G(x)$ 为 $F_G(x)$ 的灰色概率密度函数^[12]。

为了更直观地表现灰色概率分布的“灰色不确定性”特性,式(2)可表示为灰区间形式,即:

$$F_G(x) = [F_G^*(x), F_G^*(x)] = [\int_{-\infty}^x f_G^*(y) dy, \int_{-\infty}^x f_G^*(y) dy]. \quad (3)$$

在灰色概率空间 (Ω, Ψ, P_G) 中,当

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x| dF_G(x) < \infty \quad (4)$$

时,则随机变量 ξ 的数学期望(简称灰色期望) $E_G(\xi)$ 和灰色方差 $D_G(\xi)$ 存在,且:

$$E_D(\xi) = [E_G^*(\xi), E_G^*(\xi)] = [\int_{-\infty}^{+\infty} x dF_G^*(x), \int_{-\infty}^{+\infty} x dF_G^*(x)], \quad (5)$$

$$D_G(\xi) = [D_G^*(\xi), D_G^*(\xi)] = [\int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - E_G(\xi))^2 dF_G(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - E_G^*(\xi))^2 dF_G^*(x), \int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - E_G^*(\xi))^2 dF_G^*(x)]. \quad (6)$$

1.2 病险水库失事的灰色-随机风险分析方法

病险水库大坝失事风险,是指水库大坝系统局部病变或整体溃坝而不能执行其原定安全蓄水功能的概率,或指水库大坝遭遇负荷作用大于其自身承载能力而破坏失事的概率。可以分以下 3 种情况考虑病险水库失事的灰色-随机风险^[13]。

1)在仅考虑单个系统阻抗(或承载能力)和单个系统负荷的情况下,若系统阻抗为遵从某一经典分布的随机变量 X 、而外来负荷为遵从某一灰色概率

$$R_G = [\int_0^\infty (1 - F_{Y_G^*}(x)) f_X(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G}(x)) f_X(x) dx] \quad (8)$$

灰色-随机风险概率 R_G 的质的量度,可用曲线 $f_X(x)$ 分别与 $f_{Y_G^*}(y)$ 、 $f_{Y_G}(y)$ 的重叠部分表示。

2)同样在仅考虑单个系统阻抗(或承载能力)和单个系统负荷的情况下,若系统阻抗和系统负荷是分别遵从某一灰色概率分布 $F_G(x)$ 与 $F_G(y)$ 的随机变量 X_G 和 Y_G ,则水库失事的风险概率为:

$$R_G = P_G(X_G < Y_G) \quad (9)$$

$$R_G = [R_G^*, R_G^*] = [P_G^*, P_G^*] = \left[\min \left[\int_0^\infty (1 - F_{Y_G^*}(x)) f_{X_G^*}(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G^*}(x)) f_{X_G}(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G}(x)) f_{X_G^*}(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G}(x)) f_{X_G}(x) dx \right], \right. \\ \left. \max \left[\int_0^\infty (1 - F_{Y_G^*}(x)) f_{X_G^*}(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G^*}(x)) f_{X_G}(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G}(x)) f_{X_G^*}(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G}(x)) f_{X_G}(x) dx \right] \right] = \\ \left[\int_0^\infty (1 - F_{Y_G^*}(x)) f_{X_G^*}(x) dx, \int_0^\infty (1 - F_{Y_G}(x)) f_{X_G^*}(x) dx \right] \quad (10)$$

3)水库大坝失事通常涉及许多因素或状态变量,可用向量 $X_G = (X_{G1}, X_{G2}, \dots, X_{Gn})$ 来表示。因此,系统功能函数是这些因素的函数 $g(X_G)$,水库大坝失事的风险概率即为 $g(X_G) < 0$ 的概率。

将水库大坝看作一个灰色系统,则系统中的每一状态变量 X_G 遵从可用灰色概率分布函数 $[F_{X_G^*}(x), F_{X_G}^*(x)]$ 或灰色概率密度函数 $[f_{X_G^*}(x), f_{X_G}^*(x)]$ 表征的某一灰色概率分布。由此可以将水库大坝失事的临界状态表示为 $g(X_G) = 0$,它是系统的“极限状态”。

在几何学上,极限状态方程 $g(X_G) = 0$ 是一个 n 维的面,称之为“失效面”。显然,由于 X_G 的灰色特性,存在 2^n 个失效面。若失效面到原点的最小距离用向量 $d = (d_1, d_2, \dots, d_{2^n})$ 表示,由于相对于原点的失效面的位置又决定系统的风险性,因此,所有最小距离的最小值 $\min(d)$ 与最大值 $\max(d)$ 可近似地用于风险性的量度,即 $[\min(d), \max(d)]$ 。

这样,如果变量 $X_{G1}, X_{G2}, \dots, X_{Gn}$ 的联合概率密度函数为 $f_{X_{G1}, X_{G2}, \dots, X_{Gn}}(X_{G1}, X_{G2}, \dots, X_{Gn})$,则失效状态的概率为:

$$R_G = \int_{g(X_G) < 0} \dots \int f_{X_{G1}, X_{G2}, \dots, X_{Gn}}(X_{G1}, X_{G2}, \dots, X_{Gn}) dX_{G1} dX_{G2} \dots dX_{Gn} \quad (11)$$

分布的随机变量 Y_G 时,则水库大坝失事的风险概率为:

$$R_G = P_G(X < Y_G) \quad (7)$$

由于 P_G 为灰色概率,因此称 R_G 为灰色-随机风险概率。若能求得 X 的概率密度函数 $f_X(x)$ 和 Y_G 的灰色概率分布函数 $[F_{Y_G^*}(y), F_{Y_G}^*(y)]$,或灰色概率密度函数 $[f_{Y_G^*}(y), f_{Y_G}^*(y)]$,则式(7)可以改写为:

若能求得 X_G 和 Y_G 的灰色概率分布 $[F_{X_G^*}(x), F_{X_G}^*(x)]$ 、 $[F_{Y_G^*}(y), F_{Y_G}^*(y)]$,或灰色概率密度函数 $[f_{X_G^*}(x), f_{X_G}^*(x)]$ 、 $[f_{Y_G^*}(y), f_{Y_G}^*(y)]$,则可用曲线 $f_{X_G^*}(x)$ 、 $f_{X_G}^*(x)$ 分别与 $f_{Y_G^*}(y)$ 、 $f_{Y_G}^*(y)$ 的重叠部分来表示失效风险概率 R_G 的质的量度。

当考虑风险概率 R_G 为描述失事概率的最小与最大值区间时,式(9)可具体表达为:

1.3 灰色-随机风险概率的计算方法

计算风险概率的方法很多,其各有优缺点。实际使用较多的一般是蒙特-卡罗法和改进一次二阶矩法(Amended First-Order Second-Moment Method, AFOSM)^[13],这里采用 AFOSM 法。由于灰色-随机风险概率可以分解为 2^n 个随机风险概率的形式来表达,因此可以将灰色-随机风险概率转换为一般的随机风险概率,进而用 AFOSM 法求解。

原则上,失效风险概率 R_G 应从向量 $R = (R_1, R_2, \dots, R_{2^n})$ 中取最小值、最大值得到,即:

$$R_G = [R_*, R^*] = [\min(R), \max(R)] \quad (12)$$

实际运用中,通过有关信息及其分析,容易得知各因素 X_{Gi} 变化对 R_G 大小的影响,由此可以构造各因素的一、二阶矩取值的两组组合,并从其中一组(记为 X_{G^*})中可求得最小风险概率值(记为 R_*),从另一组(X_G^*)中可求得最大风险概率值(记为 R^*),即:

$$\begin{cases} R_* = P\{g(X_{G^*}) < 0\}, \\ R^* = P\{g(X_G^*) < 0\}. \end{cases} \quad (13)$$

式中, R_* 和 R^* 可用 AFOSM 法分别求得。

2 工程应用与实例分析

占我国水库总数 96.25% 的小型水库失事,是

目前水库安全管理中面临的主要问题。因此,这里以某小(1)型水库^[14](简称 A 水库)为例,利用前面提出的灰色-随机复合不确定性分析方法,对其进行水库大坝失事的风险分析。A 水库控制流域面积 18.34 km²,总库容 1.08×10⁶ m³;库区两岸,岩性坚硬,库岸稳定,风化层较薄,节理发育部位产状单一,无几组节理共同切割现象,未见库岸自然斜坡变形和破坏现象;坝基及坝肩岩石均为肉红色粗粒花岗岩,整体性好,属整体块状结构。大坝为浆砌石外壳、内填堆石构成的浆砌石重力坝,俗称“饺子坝”,最大坝高 25.0 m,坝顶宽 5.0 m,坝长 49 m。A 水库是 20 世纪 60~70 年代由当地村民为人畜饮水和灌溉用水而自发组织兴建的,受当时各方面条件所限,大坝建成后即被有关部门鉴定为“病险工程”。

2001 年,有关部门对 A 水库及其大坝进行了安全鉴定。鉴定认为,目前 A 水库大坝的运行风险主要表现在 5 个方面:①泄洪能力不足;②渗漏破坏;③上游坝壳抗滑稳定;④地震;⑤运行管理及其他。将这些风险因素分别记为 X_1, X_2, X_3, X_4 和 X_5 。其中,对于第①项,可以考虑把遭遇洪水时因泄洪能力不足而漫顶的水位高度作为负荷因子,并服从 Gumbel 分布: $F_H(x)=e^{-e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}}$;对于②、③项,则是

一定时期内大坝承受负载超过其极限承载能力后,才会发生大坝失事,因此可以认为其发生概率服从泊松分布: $P(x)=\frac{\lambda^x \exp(-\lambda)}{x!}$,其中 x 为整数;对于④、⑤项,可以作为一般随机事件,其发生概率服从正态分布: $f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp[-\frac{1}{2}(\frac{x-u}{\sigma})^2]$ 。

将非正态分布的变量转换为等价正态分布,求得其等价正态分布的累积分布函数 CDF 和概率密度函数 Pdf ,然后再求得等价正态分布的均值和标准差。于是,A 水库大坝承受负荷是否超出其承载能力的问题,即转化为各风险变量的特征参数在一定范围内随机变动且其波动值呈正态分布的问题,当特征参数值偏离均值后,则可能产生失事破坏。表 1 列出了 A 水库各项风险特征参数值的计算结果。

考虑到水文、气候、工程结构、坝体材料、施工质量等方面因缺乏充足有效信息而存在的灰色不确定性,可以将 A 水库大坝系统看作灰色不确定性系统,则对于各风险变量的特征参数,可以采用 Dempster-Shafer 方法^[15],将正态分布的均值处理成如表 2 所示的灰区间形式。

表 1 A 水库的风险特征参数值
Table 1 Risk parameters of reservoir A

项目 Item	X_1 泄洪能力 Flood discharge capacity	X_2 渗漏量 Seepage quantity	X_3 坝壳稳定 Dam shell stabilization	X_4 地震 Seism	X_5 管理及其他 Management and other
取值范围 Range	0.22~1.46	0.08~0.89	0.79~1.05	4.3~8.2	0.01~0.99
均值 Mean value	0.861	0.473	0.929	6.11	0.542
均方差 Mean square value	0.102	0.084	0.097	0.463	0.037

表 2 A 水库风险特征参数的上、下灰色期望值
Table 2 Grey sup. and inf. expectations of risk parameters of reservoir A

期望值 Expectation	X_{1G} 泄洪能力 Flood discharge capacity	X_{2G} 渗漏量 Seepage quantity	X_{3G} 坝壳稳定 Dam shell stabilization	X_{4G} 地震 Seism	X_{5G} 管理及其他 Management and other
E_G^*	0.895	0.486	0.938	6.487	0.573
E_{G*}	0.837	0.462	0.917	5.816	0.511

采用前面提出的病险水库灰色-随机风险概率计算方法,对 A 水库失事风险进行分析。对于上述①~⑤项失事影响因子,可用向量 $X_G=(X_{1G}, X_{2G}, \dots, X_{5G})$ 来表示,假设各项因子相互独立,则可以建立水库安全性态的功能函数 $g(X_G)=g(X_{1G}, X_{2G}, X_{3G}, X_{4G}, X_{5G})$ 。

当功能函数 $g(X_G)>0$ 时,水库大坝处于安全状态;而当 $g(X_G)<0$ 时,则代表水库大坝有失事风险。大坝失事的灰色-随机风险概率为 $R_G=[R_G^*,$

$R_G^*]=P\{g(X_G)<0\}$ 。为此,可以采用 AFOSM 法,求得各个因子可能导致大坝失事的灰色概率区间;并根据 5 个风险因子与 A 水库失事风险率之间的正、负相关性,按照式(12)构造各因素的一、二阶矩取值组合。

最后,从 $(X_{1G}^*, X_{2G}^*, X_{3G}^*, X_{4G}^*, X_{5G}^*)$ 所构成的 X_G^*, X_{G*} 中分别取大和取小求得最大、最小风险概率值 R^* 和 R_* ,从而最终求得 A 水库大坝失事的风险概率 R_G ,即有:

$R_G = [R_*, R^*] = [\min(X_{1G}^*, X_{2G}^*, X_{3G}^*, X_{4G}^*, X_{5G}^*), \max(X_{1G}^*, X_{2G}^*, X_{3G}^*, X_{4G}^*, X_{5G}^*)] = [\min(0.018\ 4, 0.019\ 1, 0.044\ 6, 0.006\ 2, 0.026\ 5), \max(0.092\ 1, 0.057\ 4, 0.009\ 5, 0.012\ 4, 0.006\ 4)] = [0.006\ 2, 0.092\ 1]$ 。

可以看出,所求得的风险值为一灰色区间范围,较好地体现和度量了病险水库运行失事风险的不确定性。

3 小 结

本文对病险水库运行风险的复合不确定性问题进行了研究。在综合考虑随机和灰色不确定性影响的基础上,探讨了病险水库大坝的灰色-随机风险分析方法,建立了病险水库大坝失事的灰色-随机风险率表达式,推导了相应的灰色-随机风险概率计算方法。工程实例分析表明,根据本文提出的复合不确定性分析方法,所求得的风险率为一区间值,较好地体现和度量了大坝失事风险的不确定性。

[参考文献]

[1] Goulet D. Global governance, dam conflicts, and participation [J]. *Human Rights Quarterly*, 2005, 27(3): 881-907.

[2] Seid-Karbasi M, Byrne P M. Embankment dams and earthquakes [J]. *International Journal on Hydropower and Dams*, 2004, 11(2): 96-102.

[3] Van Manen S E, Brinkhuis M. Quantitative flood risk assessment for Polders [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2005, 90(2): 229-237.

[4] Seidou O, Marche C, Robert B, et al. Risk management of hydroelectric reservoirs [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(6): 1111-1122.

[5] Stan K. The general theory of quantitative risk assessment [C]//*Risk-based Decision Making in Water Resources V*. USA: ASCE, 1991.

[6] Montanari A, Brath A. A stochastic approach for assessing the

uncertainty of rainfall-runoff simulations [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): 1-11.

[7] Zadeh L A. Fuzzy Sets [J]. *Information and Control*, 1965(8): 338-356.

[8] 邓聚龙. 灰色系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

[8] Deng J L. Grey system [M]. Beijing: Publishing Company of National Defense Industry, 1985. (in Chinese)

[9] 王光远. 未确知信息及其数学处理 [J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1990(4): 1-3.

[9] Wang G Y. Unascertained information and its mathematical treatment [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1990(4): 1-3. (in Chinese)

[10] 杨 杰, 胡德秀, 吴中如. 大坝安全监控模型因子相关性及其不确定性研究 [J]. *水利学报*, 2004(12): 99-105.

[10] Yang J, Hu D X, Wu Z R. Multiple co-linearity and uncertainty of factors in dam safety monitoring model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(12): 99-105. (in Chinese)

[11] Helton J C. Treatment of uncertainty in performance assessments for complex systems [J]. *Risk Analysis*, 1994, 14(4): 483-511.

[12] 胡国华, 夏 军, 赵沛伦. 河流水质风险评价的灰色-随机风险率方法 [J]. *地理科学*, 2002, 22(2): 249-252.

[12] Hu G H, Xia J, Zhao P L. Grey-stochastic risk assessment method for river water quality [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 249-252. (in Chinese)

[13] Duckstein L, Plate E J. Engineering reliability and risk in water resources [M]. Amsterdam: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.

[14] 胡德秀, 杨 杰, 韩 珂, 等. 塔盘沟水库大坝安全性态综合分析 [R]. 西安: 西安理工大学, 2001.

[14] Hu D X, Yang J, Han Y, et al. Synthetical analysis and evaluation on the safety properties of Tapangou reservoir and dam [R]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2001. (in Chinese)

[15] Bill C, Luo W B. Dempster-Shafer theory and decision making [C]//*Grdg Paoli. Climate change, uncertainty and decision-making*. Institute for Risk Research, 1994.

(上接第 229 页)

[17] Lei H, Wang W, Chen L L, et al. The preparation and catalytically active characterization of papain immobilized on magnetic composite microspheres [J]. *Enzym Microb Techn*, 2004, 35(1): 15-21.

[18] Li F Y, Xing Y J, Ding X. Immobilization of papain on cotton fabric by sol-gel method [J]. *Enzym Microb Techn*, 2007, 40: 1692-1697.

[19] Buisson P, Pierre A C. Immobilization in quartz fiber felt rein-

forced silica aerogel improves the activity of *Candida rugosa* lipase in organic solvents [J]. *J Mol Cataly B: Enzym*, 2006, 39(1): 77-82.

[20] 初志战, 黄卓烈, 巫光宏, 等. 乙醇溶液对木瓜蛋白酶催化活性的影响 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(4): 329-332.

[20] Chu Z Z, Huang Z L, Wu G H, et al. Effect of ethanol on catalytic activity of papain [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2005, 13(4): 329-332. (in Chinese)