

文章编号:1000-6060(2003)02-0116-06

# 水资源系统中的不确定性及风险分析方法<sup>\*</sup>

左其亭<sup>1,2</sup> 吴泽宁<sup>1</sup> 赵伟<sup>3</sup>

(1 郑州大学环境与水利学院,郑州 450002; 2 中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011;

3 新疆水利规划设计局,乌鲁木齐 830001)

**摘要:** 水资源系统中广泛存在着不确定性,其对系统的影响很大,甚至带来灾害性风险(如洪水、干旱),是风险产生的根本原因,也是水资源系统研究遇到的难点问题之一。从分析总结水资源系统中存在的不确定性因素的类型(包括随机性、模糊性、灰色性及未确知性)及研究方法,提出水资源不确定性系统的概念,从不确定性因素的数学处理方法入手,介绍基于概率统计学(处理随机性)的风险计算模型,提出基于模糊隶属度(处理模糊性)、基于灰数(处理灰色)和基于未确知数(处理未确知性)的风险计算模型。为水资源系统风险规划与管理奠定基础。

**关键词:** 水资源系统 不确定性 风险分析

**中图分类号:** TV13.9 **文献标识码:** A

## 1 引言

水,是生命之源,是人类及一切生物赖以生存的一种不可缺少的宝贵资源。从水的基本属性来看,水资源系统是客观存在于自然界的天然系统。然而,它与人类社会经济发展有着千丝万缕的联系。人类发展依赖水资源,又对水资源有越来越大的影响,特别是随着社会经济的发展,出现的水问题(如干旱、洪水、水污染)日益突出。

随着社会实践的需要和研究方法的发展,人们已经看到了把水资源看成一个系统来研究的重要性。在人类社会早期,人们只能通过简单的劳动(如堤防、沟渠),来改善水资源利用;随着社会的进一步发展,对水资源的需求量增加,开发利用水资源的力度加大,综合开发利用水资源的工程措施和水资源系统分析与管理的思想逐步形成;到了20世纪中期,由于经济迅速发展和人口剧烈膨胀,水资源供需紧张和生态环境恶化的局面越来越严峻。因此,需要把水资源纳入到一个系统,来研究合理开发、利用和优化配置水资源问题。

水资源系统是一个十分复杂的不确定性系统,广泛存在着随机性、模糊性、灰色性、未确知性。正是由于不确定性的广泛存在,水资源系统在开发、利

用及获得经济效益的同时,也存在一定的风险(如干旱、洪水、水污染、经济亏损、生态环境破坏)。那么,如何评价和降低风险?如何进行水资源系统风险规划与管理?解决这些问题的基础是要定量研究不确定性问题以及寻找风险分析计算方法。

## 2 水资源不确定性系统

### 2.1 客观存在的不确定性类型

到目前为止,人们已认识到四种不确定性<sup>[1,2]</sup>:

(1) 由于条件提供的不充分和偶然因素的干扰,使几种人们已经知道的结果的出现呈现偶然性,但在某次试验中不能预料哪一个结果发生。这种不确定性即为“随机性”;

(2) 由于事物的复杂性,事物的界线不分明,对其概念不能给出确定的描述和确切的评定标准。这种不确定性即为“模糊性”;

(3) 由于事物的复杂性、信道上噪音干扰和接收系统能力(含人的辩识能力)的限制,人们只知系统的部分信息或信息量所呈现的大致范围。这种部分已知、部分未知的不确定性即称为“灰色性”;

(4) 纯主观上的、认识上的不确定性称为“未确知性”。与灰色性相比,它具有较多的信息量,不但

\* 收稿日期:2002-11-06; 修回日期:2003-02-28

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999043608)及中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-327)

作者简介:左其亭,1967年生,男,河南固始县人,工学博士。主要研究方向为水文水环境与水资源管理。已发表论文66篇,主持和参加课题12项。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

知道信息量的取值范围,还知道所求量在该区间的分布状态。

处理各种不确定性已有了各自的数学方法。处理随机性的数学方法是随机理论与概率统计;处理模糊性的数学方法是模糊数学;处理灰色性的数学方法是灰色数学;处理未确知性的数学方法是未确知数学。但在实践中常常遇到在同一个系统中几种不确定性同时出现或交叉出现的情况。因此,研究综合处理不确定性的数学方法——不确定性数学是非常必要的。不确定性数学是以概率统计、模糊数学、灰色数学、未确知数学为主体,四方面密切相关、互相渗透组成的数学体系<sup>[1,3]</sup>。

## 2.2 水资源系统中的不确定性

从水资源系统的输入、输出以及系统内部结构三方面组成来看,既存在确定性一面,又存在不确定性一面。一般来讲,水资源系统的不确定性来自三个方面:其一是系统输入存在的不确定性;其二是系统内部结构本身存在的不确定性;其三是系统输出存在的不确定性。下面就来简单说明水资源系统中存在的四种不确定性。

### (1) 水资源系统中存在的随机性

从系统的输入与输出关系来看,由于系统环境的变化可能会影响系统功能的变化,这种变化常常表现为随机性。比如,流域降雨径流量的大小会随着降雨的随机变化而变化,从而表现为随机性。

从系统结构及内部状态来看,由于水结构的复杂性,使得人们对水文规律的认识和参数的获得常常带有随机性。比如,对地下水水文地质参数的试验,常常是随机地选择钻探点和抽水试验点,得到的水文地质参数当然也存在一定的随机性。

### (2) 水资源系统中存在的模糊性

水资源系统是一个复杂的系统,在系统输入与输出、系统结构与状态等方面,很多有关的概念界限不分明。比如,我们常说的“洪水季节”与“枯水季节”、“稳定流”与“非稳定流”、“含水层”与“隔水层”等等,都是界限不明确的模糊概念。

### (3) 水资源系统中存在的灰色性

从水质点的运移机理、流速状态以及介质结构来看,人们不可能对其清清楚楚,即永远是灰的。

从建立的系统模型来看,由于人类认识能力的限制、测试手段的限制,使得我们获取的资料或精度

不高或缺不全。当然,在这种条件下建立的系统模型也是灰的。

从系统的功能来看,由于对系统的结构、内部状态以及系统边界都不可能完全清楚,因此,对系统功能的了解和认识也不完全清楚和精确。比如,对降雨径流量的计算,由于种种原因,常常计算结果误差较大,即所得的结论也应该是灰的。

### (4) 水资源系统中存在的未确知性

由于水资源系统是一个庞大的复杂系统,对系统的内部结构、状态以及输入输出关系等的了解,一方面不可能完全清楚;一方面也不需要百分之百地清楚。比如,对“隔水层”的了解,隔水层是否完全隔水,是否存在导水通道,导水通道又在何处等。虽然,这一判断可能对我们很有用,但如果要准确做出这一判断,必然要耗费很大的人力、物力。也就是说,我们总可以在一定程度上做得到。但实际上不需要我们完完全全了解,只需要通过某些手段较准确地估计或计算出隔水层的渗透量即可。这就是未确知性。

## 2.3 水资源不确定性系统的概念

从以上分析可以看出,水资源系统广泛存在着四种不确定性,即随机性、模糊性、灰色性、未确知性。作为一个客观的水资源系统,确切地说,是一个未确知性的灰色—模糊—随机系统,称之为“水资源不确定性系统”<sup>[4~8]</sup>。

在研究水资源系统时,不可避免地会遇到不确定性的处理问题。我们应该正确理解水资源系统中存在的不确定性,不能一遇到有关不确定性问题,就把它概化成简单的确定性问题,而应该对不确定性问题采取合理的处理方法,使之更切合实际。

## 3 水资源系统不确定性带来的风险问题

由于客观世界的复杂性和人类认识的局限性,人类所有活动和决策都不可避免地伴随着不确定性的影响,因而也不可避免地冒一定风险。如洪水灾害、干旱灾害、地震灾害、台风灾害、战争以及股市下跌、经济突然滑坡等等。

关于风险的定义有许多种,可以从不同的角度来对风险进行定义。比如,从探讨风险与损失之间的联系入手,定义风险是产生损失的可能性;从某种

程度的损失产生的概率入手,定义风险是产生某种程度损失的机会。

无论是哪种定义都承认风险是由不确定性因素产生的。正是由于客观世界和人类活动中存在大量的不确定性因素,致使人们不能准确地预测未来事件发生的后果及其可能性大小。从这个意义上讲,所谓风险是指发生损失的不确定性。

风险具有三个基本特征:客观性、损失性和不确定性。“客观性”是指不论人们是否意识到,风险都是客观存在的,如地震、风暴、洪水等。“损失性”是指有可能带来损失的事件才称为有风险,即风险总是与损失相联系的,如洪水灾害、干旱灾害、地震灾害等。“不确定性”是指无法准确预知损失的后果,即风险是由不确定性产生的。

正是由于水资源系统中客观存在着不确定性,这就要求人们不仅要科学合理地对待不确定性,而且要在实际应用中,识别、评估不确定性因素带来的风险,并在此基础上优化组合各种风险管理技术,作出风险决策,包括水资源系统风险规划与管理,对风险实施有效的控制和妥善处理风险所致损失的后果,以期以最少的投入获得最大的安全保障<sup>[9-11]</sup>。

## 4 水资源系统风险分析计算模型

在风险分析中,对风险出现的可能性及大小有两种度量方法:一种是基于风险出现的概率,采用“风险率”度量;一种是基于风险的变异性测度,采用“风险度”度量。

### 4.1 基于概率统计的风险计算模型

#### (1) 风险率计算

根据事件  $A$  的性质,有两种确定方法:

一种是,如果事件  $A$  为“失事事件”(如洪水),则事件  $A$  的风险率为:

$$FP = P(A) \quad (1)$$

其中,  $FP$  为风险率,  $P(A)$  为事件  $A$  的概率。以下类同。

另一种是,如果事件  $A$  为“安全事件”(如可供水量),则事件  $A$  的风险率计算式为:

$$FP = 1 - P(A) \quad (2)$$

#### (2) 风险度计算

期望值计算式:

$$E(x) = \sum_{x_i \in A} x_i p(x_i) \quad (3)$$

$$\text{或} \quad E(x) = \int_A x f(x) dx \quad (4)$$

式中:  $x_i, p(x_i)$  —离散型风险变量及相应的概率;  $f(x)$  —连续型风险变量的密度函数。

标准差计算式:

$$= \sqrt{D(x)} = \sqrt{E(x - \bar{x})^2} \quad (5)$$

则,风险度(即变异系数)计算模型方程式:

$$FD = \frac{\sigma}{E(x)} \quad (6)$$

### 4.2 基于模糊隶属度的风险计算模型

“风险”这个词本身就是一个模糊概念,对“风险”的度量不是用 0,1(即经典集合论),而是用  $[0, 1]$  上某一值来度量(即模糊集)。

#### (1) 模糊风险率计算

设模糊事件  $A$  的模糊概率为  $P(A)$ ,则模糊风险率的计算也有两种情况:

一种是,如果模糊事件  $A$  为“失事事件”(如洪水),则  $A$  的模糊风险率为:

$$FP(A) = P(A) \quad (7)$$

另一种是,如果模糊事件  $A$  为“安全事件”(如可供水量),则  $A$  的模糊风险率为:

$$FP(A) = 1 - P(A) \quad (8)$$

其中,  $P(A)$  的计算式如下:

$$P(A) = \int_U \mu_A(x) dp = E(\mu_A(x)) \quad (9)$$

或

$$P(A) = \sum_{x_i \in A} \mu_A(x_i) p(x_i) \quad (10)$$

其中:  $U$  —是模糊子集;  $\mu_A(x)$  —是  $A$  的隶属度函数;  $p(x_i)$  —是  $x_i$  对应的概率。

#### (2) 模糊风险度计算

模糊事件  $A$  的期望值:

$$E(A) = \frac{\int_U x \mu_A(x) dp}{\int_U \mu_A(x) dp} = \frac{\int_U x \mu_A(x) dp}{P(A)} \quad (11)$$

或

$$E(A) = \frac{\sum_{x_i \in A} x_i \mu_A(x_i) p(x_i)}{p(A)} \quad (12)$$

方差定义为:

$$\begin{aligned} \sigma^2(A) &= \frac{1}{P(A)} \int_U (x - E(A))^2 \mu_A(x) dx \\ &= E(A^2) - (E(A))^2 \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $E(A^2) = \frac{1}{P(A)} \int_U x^2 \mu_A(x) dp$

A 的模糊风险度定义为:

$$\begin{aligned}
 FD(A) &= \frac{\sqrt{{}^2(A)}}{E(A)} \\
 &= \frac{\sqrt{\frac{1}{P(A)} \int_U (x - E(A))^2 \mu_A(x) dx}}{\frac{\int_U x \mu_A(x) dx}{P(A)}} \\
 &= \frac{\sqrt{E(A^2) - (E(A))^2}}{E(A)} \quad (14)
 \end{aligned}$$

### 4.3 基于灰数的风险计算模型

#### (1) 灰集合与灰数的定义

所谓 G 是论域 U 上的一个灰子集,是指给定了从 U 到闭区间 [0, 1] 的两个映射

$$\bar{\mu}_G: U \rightarrow [0, 1], u / \bar{\mu}_G(u) \in [0, 1]$$

和

$$\underline{\mu}_G: U \rightarrow [0, 1], u / \underline{\mu}_G(u) \in [0, 1]$$

其中,  $\bar{\mu}_G$ 、 $\underline{\mu}_G$ ;  $\bar{\mu}_G$  与  $\underline{\mu}_G$  分别称为 G 的上隶属函数和下隶属函数;  $\bar{\mu}_G(u)$  与  $\underline{\mu}_G(u)$  分别称为元素 u 相对于 G 的上隶属度和下隶属度。

设论域  $U = R$ , 则称灰集合

$$G \left[ \begin{array}{l} \bar{\mu}(x) \\ \underline{\mu}(x) \end{array}, x \in R, \underline{\mu}(x), \bar{\mu}(x) \in [0, 1] \right]$$

为灰数,并简记作 G。

#### (2) 灰色风险率计算

灰色事件 A 的灰色概率  $P(A)$  可以表达为:

$$\begin{aligned}
 P(A) &= \int_U \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dp \\
 &= E\left(\frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2}\right) \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\text{或 } P(A) = \sum_{x_i \in A} \frac{\underline{\mu}(x_i) + \bar{\mu}(x_i)}{2} p(x_i) \quad (16)$$

其中,  $p(x_i)$  一是  $x_i$  对应的概率;其它符号同前。

设灰色事件 A 的灰色概率为  $P(A)$ , 则灰色风险率的计算也有两种情况:

一种是,如果灰色事件 A 为“失事事件”(如洪水灾害),则 A 的灰色风险率为

$$FP(A) = P(A) \quad (17)$$

另一种是,如果灰色事件 A 为“安全事件”(如安全供水量),则 A 的灰色风险率为:

$$FP(A) = 1 - P(A) \quad (18)$$

#### (3) 灰色风险度计算

灰色事件 A 的期望值:

$$\begin{aligned}
 E(A) &= \frac{\int_U x \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dp}{P(A)} \\
 &= \frac{\int_U x \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dp}{\int_U \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dp} \quad (19)
 \end{aligned}$$

或

$$E(A) = \frac{\sum_{x_i \in A} x_i \frac{\underline{\mu}(x_i) + \bar{\mu}(x_i)}{2} p(x_i)}{P(A)} \quad (20)$$

方差定义为:

$$\begin{aligned}
 {}^2(A) &= \frac{1}{P(A)} \int_U (x - E(A))^2 \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dp \\
 &= E(A^2) - (E(A))^2 \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\text{其中, } E(A^2) = \frac{1}{P(A)} \int_U x^2 \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dp \quad (22)$$

A 的灰色风险度定义为:

$$\begin{aligned}
 FD(A) &= \frac{\sqrt{{}^2(A)}}{E(A)} \\
 &= \frac{\sqrt{\frac{1}{P(A)} \int_U (x - E(A))^2 \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dx}}{\frac{\int_U x \frac{\underline{\mu}(x) + \bar{\mu}(x)}{2} dx}{P(A)}} \\
 &= \frac{\sqrt{E(A^2) - (E(A))^2}}{E(A)} \quad (23)
 \end{aligned}$$

### 4.4 基于未确知数的风险计算模型

#### (1) 一般未确知数的定义

对于区间数  $[a, b]$ ,若函数  $F(x)$  满足下列条件:  $F(x)$  在  $(-\infty, +\infty)$  内为单调非减函数、右连续,至多有有限个间断点。当  $x < a$  时,  $F(x) = 0$ 。当  $x > b$  时,  $F(x) = 1$ 。

则称  $[a, b]$  与  $F(x)$  构成一个未确知数, 记作

$$\{ [a, b], F(x) \}$$

$[a, b]$  为取值区间,  $F(x)$  为区间  $[a, b]$  上的主观可信度分布函数。

### (2) 未确知风险率计算

根据一般未确知数的定义可知, 真值落到  $(x_1, x_2)$  的可信度为  $F(x_2) - F(x_1)$ 。这种可信度可以定义为未确知风险率, 即

$$FP(A) = F(x_2) - F(x_1) \quad (24)$$

其中,  $A = [x_1, x_2]$

### (3) 未确知风险度计算

未确知事件  $A$  的期望值:

$$E(x) = \int_{x_1}^{x_2} x_i(x_i) dx_i \quad (25)$$

$$\text{或} \quad E(x) = \int_{x_1}^{x_2} x(x) dx \quad (26)$$

式中,  $x_i, (x_i)$  一离散型风险变量及相应的分布密度函数。  $(x_i) = F(x_i) - F(x_{i-1})$ ;  $(x)$  一连续型风险变量的密度函数。

标准差计算式:

$$= \sqrt{D(x)} = \sqrt{E(x - \bar{x})^2} \quad (27)$$

则, 风险度(即变异系数) 计算模型方程式:

$$FD = \frac{\sqrt{D(x)}}{E(x)} \quad (28)$$

## 5 结束语

(1) 本文仅探讨两方面内容: 一是针对水资源系统的特点, 论证其存在的不确定性类型, 包括模糊性、随机性、灰色性及未确知性, 提出水资源不确定性系统的概念; 二是从不确定性因素的数学处理方法入手, 介绍基于概率统计学(处理随机性)的风险计算模型, 提出基于模糊隶属度(处理模糊性)、基于灰数(处理灰性)和基于未确知数(处理未确知性)的风险计算模型。

(2) 因篇幅所限, 本文对含有多种不确定性的复杂系统的风险计算模型没有进一步推导。关于这一点, 可以参照不确定数学的研究方法, 按照上述定义风险的思路可以进行推导, 这里不再多叙。

(3) 因篇幅所限, 本文没有对各模型的应用列举实例。这不影响风险分析计算模型的应用。相关成果可参见文<sup>[12]</sup>或其它研究成果。

## 参考文献 [References]

- [1] 王清印, 倪天智, 刘开第等. 不确定性数学及其研究方向 [A]. 灰色系统学术论文集 [C]. 开封: 河南大学出版社, 1993. 151 ~ 154. [Wang Qing-yin, Ni Tian-zhi, Liu Kai-di et al. Uncertainty mathematics. Proceedings of Grey System Study. Kaifeng: Henan university press. 1993. 151 ~ 154.]
- [2] 左其亭, 马军霞. 地下水系统中的不确定性信息及其处理方法 [J]. 水文地质工程地质, 1994(5): 41 ~ 43. [Zuo Qi-ting, Ma Jun-xia. The uncertainty information of groundwater system and the way of its processing. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994, 21(5): 41 ~ 45.]
- [3] 刘开第, 吴和琴, 王念鹏等. 不确定性信息数学处理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999, 1 ~ 20. [Liu Kai-di, Wu He-qin, Wang Nian-peng et al. mathematical process of uncertainty information and its applications. Beijing: science press. 1999, 1 ~ 20.]
- [4] 左其亭, 王中根. 现代水文学 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 17 ~ 20. [Zuo Qi-ting, Wang Zhong-gen. Modern hydrology. Zhengzhou: Yellow River Hydrological Press. 2002. 17 ~ 22.]
- [5] 夏军. 灰色系统水文学 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999. 1 ~ 23. [Xia Jun. Grey system hydrology. Wuhan: Huazhong university of science and technology press. 1999. 1 ~ 23.]
- [6] 王清印, 左其亭, 王峰松等. 灰色数学基础 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996. 7 ~ 34. [Wang Qing-yin, Zuo Qi-ting, Wang Feng-song et al. Basic grey mathematics. Wuhan: Huazhong university of science and technology press. 1996, 7 ~ 34.]
- [7] 刘绍英, 庞彦军, 苑乐仁等. 未确知数学及其应用 [M]. 保定: 河北大学出版社, 1994. 1 ~ 8. [Liu Shao-ying, Pang Yan-jun, Yuan Yue-ren et al. Unascertainty mathematics and its applications. Baoding: Hebei university press. 1994. 1 ~ 8.]
- [8] Zbigniew W Kundzewicz. New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources [M]. Cambridge University Press. 2001. 1 ~ 23.
- [9] 王丽萍, 傅湘编著. 洪灾风险及经济分析 [M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 1 ~ 71. [Wang Li-ping, Fu Xiang. Flood risk and economic analysis. Wuhan: Wuhan university of hydraulic and electric engineering press. 1999. 1 ~ 71.]
- [10] 张海波, 张捷斌. 新疆流域水资源分配模拟系统设计 [J]. 干旱区地理, 2001, 24(3): 251 ~ 254. [Zhang Hai-Bo, Zhang Jie-bin. Modeling system design for water resource allocation of river basin in Xinjiang. Arid Land Geography, 2001, 24(3): 251 ~ 254.]
- [11] 李新, 杨德刚. 塔里木河水资源利用的效益与生态损失 [J]. 干旱区地理, 2001, 24(4): 327 ~ 331. [Li Xin, Yang De-gang. Benefit and ecological loss of water utilization in Tarim river. Arid

Land Geography, 2001, 24(4): 327 ~ 331. ]  
[12] 左其亭, 吴泽宁. 模糊风险计算模型及其应用研究[J]. 郑州工  
业大学学报, 2001, 22(3): 78 ~ 80. [Zuo Qi-ting, Wu Ze-ning.

Fuzzy risk computation model and its applications. Journal of  
Zhengzhou University of Technology. 2001, 22(3): 78 ~ 80. ]

## Uncertainties in Water Resources System and Risk Analysis Method

ZUO Qi-ting<sup>1,2</sup> WU Ze-ning<sup>1</sup> ZHAO Wei<sup>3</sup>

(1 School of Environment & Water conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China;

3 Xinjiang Water Resources Planning and Management Bureau, Urumqi 830001, China)

**Abstract:** One of the key problems in water resources system research today is how to quantify uncertainty, which is inherent in every water resources system. Uncertainties are the origin of risk in hydrology and water resources. In this paper, the types of uncertainties in water resources system are comprehensively concluded, such as random, fuzzy, grey and unascertainty, and the concept of uncertain system of water resources is put forward. From the points of mathematical proceeding of uncertainty factors, the risk analysis model based on probability theory (related to the field of random) is introduced, and new risk analysis models based on fuzzy subordinate degree (related to the field of fuzzy), grey number (related to the field of grey) and unascertained mathematics (related to the field of unascertainty) are put forward. It lay a foundation for risk planning and management of water resources.

**Key word:** Water Resources System, Uncertainty, Risk, Risk Analysis