

文章编号: 0559-9350(2005)08-0906-07

水资源短缺风险的模糊综合评价

阮本清, 韩宇平, 王浩, 蒋任飞

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 本文选取区域水资源短缺风险程度的风险率、脆弱性、可恢复性、重现期和风险度作为评价指标, 研究了水资源短缺风险的模糊综合评价方法。最后对包括北京和天津在内的首都圈水资源短缺风险进行了评价。结果表明, 如果没有南水北调工程, 2010 年整个首都圈的水资源短缺风险将会处于高风险水平, 水资源供需状况极度危险, 对水资源采取有效的风险管理措施已刻不容缓。

关键词: 水资源; 风险; 综合评价; 北京; 天津

中图分类号: TV213; X820.4

文献标识码: A

水资源系统风险泛指在特定的时空环境条件下, 水资源系统中所发生的非期望事件及其发生的概率以及由此产生的经济与非经济损失。在以往的研究中, 洪水风险分析方面的成果比较多, 而对水资源短缺的风险研究则远远不够, 随着近年来水量日益短缺的严峻现实, 对水资源短缺风险进行定量分析成为水资源科学发展的必然。区域水资源是否短缺、短缺情况如何, 简单来讲是受用水需求和供水两个因素影响决定的。由于降雨、径流等的随机性, 供水和需水都存在不确定因素, 因此, 水资源短缺也具有随机性, 即存在一定的水资源短缺风险。概括而言, 所谓水资源短缺风险是指在特定的时空环境条件下, 由于来水和用水两方面存在不确定性, 使区域水资源系统发生供水短缺的概率以及由此产生的损失。

一般的风险研究只对个别风险指标进行描述, 而对区域水资源短缺风险的综合评判则比较少见。本文在水资源短缺风险分析的基础上, 对区域水资源短缺风险分析所得到的性能指标进行综合评判, 从而确定区域水资源短缺风险所达到的程度, 为区域水资源规划和管理提供决策依据。

1 水资源短缺风险评价指标

1.1 风险率 根据风险理论, 荷载是使系统“失事”的驱动力, 而抗力则是对象抵御“失事”的能力。如果把水资源系统的失事状态记为 $F \in (\lambda > \rho)$, 正常状态记为 $S \in (\lambda < \rho)$, 那么水资源系统的风险率为^[1]

$$r = P(\lambda > \rho) = P\{X_i \in F\} \quad (1)$$

式中: X_i 为水资源系统状态变量

如果水资源系统的工作状态有长期的记录, 风险率也可以定义为水资源系统不能正常工作的时间与整个工作历时之比, 即

$$a = \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} I_i \quad (2)$$

式中: NS 为水资源系统工作的总历时; I_i 是水资源系统的状态变量。

收稿日期: 2004-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50239090)

作者简介: 阮本清(1959-), 男, 河南辉县人, 教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为水资源系统工程。E-mail: ruanbq@iwahr.com

$$I_t = \begin{cases} 0, & \text{系统工作正常}(X_t \in S) \\ 1, & \text{系统失事}(X_t \in F) \end{cases}$$

1.2 脆弱性 脆弱性是描述水资源系统失事损失平均严重程度的重要指标。为了定量表示系统的脆弱性,假定系统第 i 次失事的损失程度为 S_i ,其相应的发生概率为 P_i ,那么系统的脆弱性可表达为^[1]

$$x = E(S) = \sum_{i=1}^{NF} P_i S_i \quad (3)$$

式中: NF 为系统失事的总次数。

例如,在供水系统的风险分析中,可以用缺水量来描述系统缺水失事的损失程度。类似洪水分析,假定 $P_1 = P_2 = \dots = P_{NF} = 1/NF$,即不同缺水量的缺水事件是同频率的,这样上式可写为

$$x = \frac{1}{NF} \sum_{i=1}^{NF} VE_i \quad (4)$$

式中: VE_i 为第 i 次缺水的缺水量。

上式说明干旱的期望缺水量可以用来表示供水系统的脆弱性。为了消除需水量不同的影响,一般采用相对值,即

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{NF} VE_i}{\sum_{i=1}^{NF} VD_i} \quad (5)$$

式中: VD_i 是第 i 次干旱缺水期的需水量。

1.3 重现期 事故周期是两次进入失事模式 F 之间的时间间隔,也叫平均重现期。用 $d(\mu, n)$ 表示第 n 间隔时间的历时,则平均重现期为^[2]

$$\omega = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N-1} d(\mu, n) \quad (6)$$

式中: $N = N(\mu)$ 是 0 到 t 时段内属于模式 F 的事故数目。

1.4 可恢复性 恢复性是描述系统从事故状态返回到正常状态的可能性。系统的恢复性越高,表明该系统能更快地从事故状态转变为正常运行状态。它可以由如下的条件概率来定义^[3]

$$\beta = P(X_t \in S | X_{t-1} \in F) \quad (7)$$

上式亦可用全概率公式改写为

$$\beta = \frac{P\{X_{t-1} \in F, X_t \in S\}}{P\{X_{t-1} \in F\}} \quad (8)$$

引入整数变量

$$Y_t = \begin{cases} 1, & X_t \in F \\ 0, & X_t \in S \end{cases} \quad (9)$$

及

$$Z_t = \begin{cases} 1, & X_{t-1} \in F, X_t \in S \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

这样,由式(8)可得

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{NS} Z_i}{\sum_{i=1}^{NS} Y_i} \quad (11)$$

记

$$T_{FS} = \sum_{i=1}^{NS} Z_i, \quad T_F = \sum_{i=1}^{NS} Y_i \quad (12)$$

则有

$$\beta = \begin{cases} T_{FS}/T_F, & T_F \neq 0 \\ 1, & T_F = 0 \end{cases} \quad (13)$$

从上式可以看出,当 $T_F = 0$,即水资源系统在整个历时一直处于正常工作状态,则 $\beta = 1$;而当 $T_{FS} =$

0, 即水资源系统一直处于失事状态 ($T_F = NS$), 则 $\beta = 0$ 。一般来讲, $0 < \beta < 1$ 。这表明水资源系统有时会处于失事状态, 但有可能恢复正常状态, 而且失事的历时越长, 恢复性越小, 也就是说水资源系统在经历了一个较长时期的失事之后, 转为正常状态是比较困难的。

1.5 风险度 用概率分布的数学特征, 如标准差 σ 或半标准差 σ_- , 可以说明风险的大小。 σ 和 σ_- 越大, 则风险越大, 反之越小。这是因为概率分布越分散, 实际结果远离期望值的概率就越大^[4]。

$$\sigma = (D(X))^{1/2} = \left[\sum_{i=1}^n (X_i - E(X))^2 / (n - 1) \right]^{1/2} \quad (14)$$

或

$$\sigma = (D(X))^{1/2} = \left[\sum_{i=1}^n (X_i - E(X))^2 P(X_i) \right]^{1/2} \quad (15)$$

用 σ 、 σ_- 比较风险大小虽简单, 概念明确, 但 σ_- 为某一物理量的绝对量, 当两个比较方案的期望值相差很大时, 则可比性差, 同时比较结果可能不准确。为了克服用 σ_- 可比性差的不足, 可用其相对量作为比较参数, 该相对量定义为风险度 FD_i , 即标准差与期望值的比值(也称变差系数)

$$C_v = \sigma_i / E(X) = \sigma_i / \mu_i \quad (16)$$

风险度不同于风险率, 前者的值可大于 1, 而后者只能小于或等于 1。

2 区域水资源短缺风险的模糊综合评判方法

风险评价是在风险识别和风险分析的基础上, 把损失概率、损失程度以及其它因素综合起来考虑, 分析该风险的影响, 寻求风险对策并分析该对策的影响, 为风险决策创造条件。本文采用上述定义的风险率、脆弱性、可恢复性、重现期、风险度作为水资源短缺风险的评价指标, 采用模糊综合评判方法对水资源短缺风险进行评价。

设给定 2 个有限论域 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ 和 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, 其中, U 代表综合评判的因素所组成的集合; V 代表评语所组成的集合。则模糊综合评判即表示下列的模糊变换 $B = A \times R$, 式中 A 为 U 上的模糊子集。而评判结果 B 是 V 上的模糊子集, 并且可表示为 $A = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m), 0 \leq \lambda_i \leq 1; B = (b_1, b_2, \dots, b_n), 0 \leq b_j \leq 1$ 。其中 λ_i 表示单因素 u_i 在总评定因素中所起作用大小的变量, 也在一定程度上代表根据单因素 u_i 评定等级的能力; b_j 为等级 v_j 对综合评定所得模糊子集 B 的隶属度, 它表示综合评判的结果。

关系矩阵 R 可表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

式中: r_{ij} 表示因素 u_i 的评价对等级 v_j 的隶属度, 因而矩阵 R 中第 i 行 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 即为对第 i 个因素 u_i 的单因素评判结果。在评价计算中 $A = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 代表了各个因素对综合评判重要性的权系数, 因此满足 $\sum \lambda_i = 1, (i = 1, 2, \dots, m)$; 同时, 模糊变换 $A \times R$ 也即退化为普通矩阵计算, 即 $b_j = \min \left[1, \sum \lambda_i \cdot r_{ij} \right], i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。上述权系数的确定可用层次分析法(AHP)得到。

由上述分析可以看出, 评价因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ 对应评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, 而评判矩阵中 r_{ij} 即为某因素 u_i 对应等级 v_j 的隶属度, 其值可根据各评价因素的实际数值对照各因素的分级指标推求。我们将评语级分为 5 个级别, 各评价因素分级指标见表 1。

由于水资源风险率、脆弱性、风险度是越小越优性指标, 所以对于 u_1, u_2, u_5 各评语级可构造如下隶属函数:

表 1 各评价因素分级指标

水资源短缺风险	u_1 (风险率)	u_2 (脆弱性)	u_3 (可恢复性)	u_4 (重现期)	u_5 (风险度)
v_1 (低)	≤ 0.200	≤ 0.200	≥ 0.800	≥ 9.000	≤ 0.200
v_2 (较低)	0.200~ 0.400	0.200~ 0.400	0.601~ 0.800	6.001~ 9.000	0.201~ 0.600
v_3 (中)	0.401~ 0.600	0.401~ 0.600	0.401~ 0.600	3.001~ 6.000	0.601~ 1.000
v_4 (较高)	0.601~ 0.800	0.601~ 0.800	0.200~ 0.400	1.000~ 3.000	1.001~ 2.000
v_5 (高)	≥ 0.800	≥ 0.800	≤ 0.200	≤ 1	≥ 2.000

$$\mu_{v_1}(\phi) = \begin{cases} 1, & \phi \leq a_{i1} \\ \frac{a_{i2} - \phi}{a_{i2} - a_{i1}}, & a_{i1} < \phi \leq a_{i2} \\ 0, & \phi > a_{i2} \end{cases} \quad \mu_{v_2}(\phi) = \begin{cases} \frac{\phi}{a_{i1}}, & \phi \leq a_{i1} \\ 1, & a_{i1} < \phi \leq a_{i2} \\ \frac{a_{i3} - \phi}{a_{i3} - a_{i2}}, & a_{i2} < \phi \leq a_{i3} \\ 0, & \phi > a_{i3} \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \leq a_{i1} \\ \frac{\phi}{a_{i2}}, & a_{i1} < \phi \leq a_{i2} \\ 1, & a_{i2} < \phi \leq a_{i3} \\ \frac{a_{i4} - \phi}{a_{i4} - a_{i3}}, & a_{i3} < \phi \leq a_{i4} \\ 0, & \phi > a_{i4} \end{cases} \quad \mu_{v_4}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \leq a_{i2} \\ \frac{\phi}{a_{i3}}, & a_{i2} < \phi \leq a_{i3} \\ 1, & a_{i3} < \phi \leq a_{i4} \\ \frac{\phi - a_{i4}}{a_{i4} - a_{i3}}, & \phi > a_{i4} \end{cases}$$

$$\mu_{v_5}(\phi) = \begin{cases} \frac{\phi}{a_{i3}}, & \phi \leq a_{i3} \\ \frac{\phi - a_{i3}}{a_{i4} - a_{i3}}, & a_{i3} < \phi \leq a_{i4} \\ 1, & \phi > a_{i4} \end{cases}$$

由于水资源可恢复性和重现期是越大越优性指标, 所以对于 u_3, u_4 各评语级可构造如下隶属函数:

$$\mu_{v_1}(\phi) = \begin{cases} 1, & \phi \geq a_{i1} \\ \frac{a_{i2} - \phi}{a_{i2} - a_{i1}}, & a_{i2} \leq \phi < a_{i1} \\ 0, & \phi < a_{i2} \end{cases} \quad \mu_{v_2}(\phi) = \begin{cases} \frac{a_{i1}}{\phi}, & \phi \geq a_{i1} \\ 1, & a_{i2} \leq \phi < a_{i1} \\ \frac{a_{i3} - \phi}{a_{i3} - a_{i2}}, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ 0, & \phi < a_{i3} \end{cases}$$

$$\mu_{v_3}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i1} \\ \frac{a_{i2}}{\phi}, & a_{i2} \leq \phi < a_{i1} \\ 1, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ \frac{a_{i3} - \phi}{a_{i3} - a_{i4}}, & a_{i4} \leq \phi < a_{i3} \\ 0, & \phi < a_{i4} \end{cases} \quad \mu_{v_4}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i2} \\ \frac{a_{i3}}{\phi}, & a_{i3} \leq \phi < a_{i2} \\ 1, & a_{i4} \leq \phi < a_{i3} \\ \frac{\phi}{a_{i4}}, & \phi < a_{i4} \end{cases}$$

$$\mu_{v_5}(\phi) = \begin{cases} 0, & \phi \geq a_{i3} \\ \frac{a_{i4}}{\phi}, & a_{i4} \leq \phi < a_{i3} \\ 1, & \phi < a_{i4} \end{cases}$$

对于水资源短缺风险评价的因素集 U 而言, 对应一个测定指标向量 $Y = (\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{14}, \phi_{15})$ 。其

中, ϕ_{ij} 是 U 相对于 u_{ij} 的测定值。这样 $\mu_{v_i}(\phi_{ij})$ 便表示相对于因素 μ_i 而言属于 v_i 的程度。对于因素集 U , 便有下面的模糊关系矩阵

$$R_U = \begin{bmatrix} \mu_{v_1}(\phi_{11}) & \mu_{v_2}(\phi_{11}) & \mu_{v_3}(\phi_{11}) & \mu_{v_4}(\phi_{11}) & \mu_{v_5}(\phi_{11}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{12}) & \mu_{v_2}(\phi_{12}) & \mu_{v_3}(\phi_{12}) & \mu_{v_4}(\phi_{12}) & \mu_{v_5}(\phi_{12}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{13}) & \mu_{v_2}(\phi_{13}) & \mu_{v_3}(\phi_{13}) & \mu_{v_4}(\phi_{13}) & \mu_{v_5}(\phi_{13}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{14}) & \mu_{v_2}(\phi_{14}) & \mu_{v_3}(\phi_{14}) & \mu_{v_4}(\phi_{14}) & \mu_{v_5}(\phi_{14}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{15}) & \mu_{v_2}(\phi_{15}) & \mu_{v_3}(\phi_{15}) & \mu_{v_4}(\phi_{15}) & \mu_{v_5}(\phi_{15}) \end{bmatrix}$$

水资源短缺风险评价各因素的权重确定采用层次分析法(AHP), 设权重计算结果为 $A = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5)$, 于是可得出综合评判向量

$$B = A \circ R_U = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) \circ \begin{bmatrix} \mu_{v_1}(\phi_{11}) & \mu_{v_2}(\phi_{11}) & \mu_{v_3}(\phi_{11}) & \mu_{v_4}(\phi_{11}) & \mu_{v_5}(\phi_{11}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{12}) & \mu_{v_2}(\phi_{12}) & \mu_{v_3}(\phi_{12}) & \mu_{v_4}(\phi_{12}) & \mu_{v_5}(\phi_{12}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{13}) & \mu_{v_2}(\phi_{13}) & \mu_{v_3}(\phi_{13}) & \mu_{v_4}(\phi_{13}) & \mu_{v_5}(\phi_{13}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{14}) & \mu_{v_2}(\phi_{14}) & \mu_{v_3}(\phi_{14}) & \mu_{v_4}(\phi_{14}) & \mu_{v_5}(\phi_{14}) \\ \mu_{v_1}(\phi_{15}) & \mu_{v_2}(\phi_{15}) & \mu_{v_3}(\phi_{15}) & \mu_{v_4}(\phi_{15}) & \mu_{v_5}(\phi_{15}) \end{bmatrix}$$

在综合评判中, 我们选取“加权平均型”的 $M(\gamma, \hat{Y})$ 模型, 即 $b_j = \min\left\{1, \sum_{i=1}^n \lambda r_{ij}\right\}$, 由于 $\sum_{i=1}^n \lambda r_{ij} \leq 1$, 该模型实际上蜕化为一般的实数加法, 即

$$b_j = \sum_{i=1}^n \lambda r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

选取与 $\max\{b_j\}$ 对应的评语为区域水资源短缺风险的评判结果。

为了比较直观的说明风险程度, 我们将其分成 5 级, 分别叫做低风险、较低风险、中风险、较高风险和高风险, 风险各级别按综合分值评判, 其评判标准和各级别风险的特征见表 2。

表 2 水资源系统水资源短缺风险级别评价

水资源短缺风险评价等级	风险级别	水资源系统的风险特征
v_1	低风险	可以忽略的风险
v_2	较低风险	可以接受的风险
v_3	中风险	边缘风险
v_4	较高风险	不可接受风险
v_5	高风险	灾变风险, 系统受到严重破坏

3 实例研究

对于在我国具有重要地位的京津首都圈(包括北京、天津两市的全部地区)而言, 水资源已成为制约其经济社会可持续发展的首要问题。主要表现在: 水资源供需严重失衡、水污染加剧和生态环境恶化。首都圈人均水量远远低于 1000m^3 , 按国际公认标准判断, 属重度缺水。建国以来, 首都圈多次出现严重的水危机, 特别是 20 世纪 80 年代初期发生的连续 5 年枯水, 对首都圈的发展造成了极为严重的影响。目前正经历着新一轮水危机, 切实研究解决首都圈水资源安全保障问题, 备受世人关注。

区域水资源短缺情况取决于来水和需水情况。为了研究来水和用水不确定性对供水系统造成的风险, 以月份为时段结合区域需水量对长系列来水资源中每一年的逐月来水, 进行联合优化调度以获取年最大可供水量, 区域需水量系列是根据不同的降水年型确定的, 最后对每一来水年份进行缺水量的统计, 对长系列水文年的统计可以得到区域水资源系统的缺水风险(见图 1)。

本次计算根据对 2010 年首都圈地区的水资源需求预测, 在现有工程的基础上(不包括南水北调工

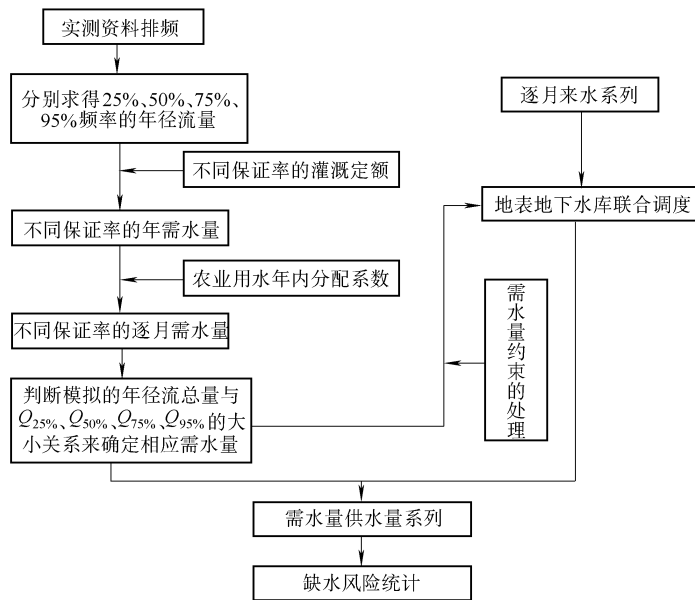


图1 区域水资源系统风险分析计算流程

程)采用1956~2000年的来水系列资料,按月为时段进行长系列供需平衡操作。通过首都圈供、用水进行一次供需平衡分析,可以得到2010水平年各月的缺水系列和年缺水系列,对北京、天津及首都圈缺水系列的概率统计见表3。

表3 首都圈2010年缺水系列概率分布参数(单位:百万m³)

指标	样本数	最小值	最大值	均值	标准差	方差	偏度	峰度
北京市	45	410.26	1329.40	700.00	227.49	51752.79	1.05	0.28
天津市	45	227.86	2051.83	1389.00	422.59	178582.55	0.05	-0.65
首都圈	45	681.73	3381.23	2089.00	576.65	332525.75	0.39	-0.24

在对水资源一次供需平衡结果进行概率统计的同时,还可以采用前面提出的水资源系统的风险性能指标对首都圈现状年和2010年的水资源短缺风险进行描述,其结果见表4。

表4 首都圈2010年缺水量的风险性能指标描述

指标	风险率	可靠性	脆弱性	重现期年	可恢复性	风险度(变差系数)
北京市	1.000	0.000	0.133	0.000	0.000	0.337
天津市	1.000	0.000	0.309	0.000	0.000	0.324
首都圈	1.000	0.000	0.213	0.000	0.000	0.291

采用AHP法对首都圈各评价指标的权重计算结果为 $A = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5) = (0.331, 0.210, 0.129, 0.105, 0.225)$,利用上述的水资源短缺风险评价的模糊综合评判模型对首都圈的水资源短缺风险进行综合评判,成果见表5。

表5 首都圈2010年区域水资源短缺风险综合评分值

计算单元	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	综合评价
北京市	0.210	0.139	0.216	0.556	0.574	高风险
天津市	0.095	0.305	0.387	0.472	0.565	高风险
首都圈	0.197	0.402	0.337	0.479	0.565	高风险

由综合评判结果(表5)可以看出,根据最大隶属原则,2010水平年无论是北京市还是天津市,或是整个首都圈,其水资源短缺风险都处于高风险水平,可见水资源供需状况极度危险,对水资源采取有效的风险管理措施已刻不容缓。

4 结论与建议

(1) 一般的水资源短缺风险评价仅是对水资源短缺风险率的统计,而本文则引用了多个评价指标对区域水资源短缺风险进行描述。(2) 本文在对单个水资源短缺风险性能指标计算的基础上,更进一步采用综合评价方法对区域水资源短缺情况进行判别,基于多个指标评价的模糊综合评判方法用于区域水资源短缺情况评价具有一定的可操作性和实用性。(3) 应用所建立的数学模型,对京津首都圈 2010 年的水资源短缺风险进行了评价,本次评价综合考虑了区域的来水和需水情况,首先采用长系列供需操作方法得到区域规划水平年的缺水量系列,然后利用所建立的数学模型对区域缺水风险进行综合评判,结果表明:在没有南水北调的情况下,到 2010 水平年,无论是北京市还是天津市,或是整个首都圈,其水资源短缺风险都处于高风险水平,水资源供需状况极度危险。基于上述判断,建议:(1) 对首都圈的水资源短缺风险必须进行调控,这些调控措施主要有需水管理和供水管理。需水管理的核心是抑制水资源需求的过度膨胀,促进水资源的可持续利用,节水防污型社会建设是需水管理中最重要的一项工程之一;供水管理措施主要有提供污水处理率和污水利用率、对当地水资源进行挖潜、增加雨洪利用、增加海水利用等等。(2) 南水北调工程是解决首都圈水资源短缺风险的根本措施。如果将南水北调工程加入到风险分析模型中,2010 年首都圈的水资源短缺风险率、脆弱性等将得到大幅度的改善,所以当前最重要的工作是保证南水北调东、中线工程按规划准时建成,保证首都圈的经济社会可持续发展。

参 考 文 献:

- [1] 冯平. 供水系统干旱期的水资源风险管理[J]. 自然资源学报, 1998, 13(2): 139- 144.
- [2] [美] 德克斯坦, [德] E. J 波兰特 编. 水资源工程可靠性与风险[M]. 吴媚玲, 王俊德 译. 北京: 水利水电出版社, 1993.
- [3] Kenji Jinno, Xu Zongxue, Akira Kavamura, Kaname Tajiri. Risk assessment of water supply system during drought[J]. Water Resources Development, 1995, 11(2): 189- 205.
- [4] 黄强, 苗隆德, 王增发, 水库调度中的风险分析及决策方法[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(4): 6- 10.

Fuzzy comprehensive assessment of water shortage risk

RUAN Ben-qing, HAN Yu-ping, WANG Hao, JIANG Ren-fei
(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The risk rate, weakness, possibility of recovery, period for reappear and risk level are defined as the indexes for assessing the water shortage risk of regional resources. On this basis the method for fuzzy comprehensive assessment of water shortage risk of regional resources is developed. The suggested method is used to assess the water shortage risk of capital area in China including the Beijing and Tianjin. The result shows that the water shortage risk of this area is at very high level and the contradiction between water supply and water demand will be intensive in the year of 2010 without the South to North Water Transfer Project. It means that the adoption of measures for effective risk management of water resources is a very urgent task.

Key words: water resources; water shortage; risk; comprehensive assessment; capital area of China

(责任编辑:王成丽)