

网络出版时间:2015-06-30 13:47

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2015.08.021

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150630.1347.021.html

基于改进模糊物元模型的水安全评价研究

杜向润^{1,2},冯民权¹,张建龙²

(1 西安理工大学 教育部西北水资源与环境生态重点实验室,陕西 西安 710048;

2 山西省水利建设开发中心,山西 太原 030002)

【摘要】 **【目的】**建立基于改进模糊物元的水安全评价模型,为有效评价区域水安全状况提供支持。**【方法】**建立基于熵权的改进模糊物元模型,选取人均水资源量、单位面积水资源量、地表水利用程度、地下水利用程度、工业万元增加值用水量、农业用水综合定额、人均用水量、工业废水处理达标排放率、Ⅳ级以上水质级别占总河长比例、洪水受灾面积率、干旱受灾面积率、单位面积蓄水工程总库容、堤防保护耕地面积率、灌溉面积率等 14 项评价指标,对山西省太原、大同、阳泉、长治、晋城、朔州、忻州、吕梁、晋中、临汾、运城等 11 个地区的水安全进行评价。**【结果】**采用基于熵权的改进模糊物元模型对山西省水安全状况的评价结果表明,山西省属于水不安全地区,综合评价等级值为 1.950 3;晋中市、阳泉市、长治市、忻州市和晋城市属临界安全地区,综合评价等级值分别为 2.178 9、2.138 1、2.121 1、2.102 4 和 2.088 2;太原市、运城市、吕梁市、临汾市、朔州市和大同市属于不安全地区,综合评价等级值分别为 1.869 1、1.825 9、1.816 9、1.796 2、1.769 7 和 1.746 3。**【结论】**建立的基于熵权的改进模糊物元模型的水安全评价结果与当地水资源实际状况基本相符,可为区域水资源开发利用提供指导。

【关键词】 水安全评价;熵权;模糊物元模型;山西省

【中图分类号】 TV213.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)08-0222-07

Water security evaluation based on improved fuzzy matter-element model

DU Xiang-run^{1,2}, FENG Min-quan¹, ZHANG Jian-long²

(1 Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 Shanxi Province Water Conservancy Construction and Development Centers, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract: **【Objective】** This study proposed an improved fuzzy matter-element model to support the effective evaluation of regional water safety. **【Method】** A total of 14 indicators including per capita water resources, water resources per unit area, surface water level, groundwater utilization degree, million yuan of industrial added value of water, agricultural water quota, comprehensive water use per capita, industrial wastewater discharge rate, ratio of water with level Ⅳ and above, ratio of flooded area, ratio of drought area, water storage per unit area of storage projects, ratio of embankment protected cultivated land, and ratio of irrigation area were selected to evaluate water safety in Taiyuan, Datong, Yangquan, Changzhi, Jincheng, Shuozhou, Xinzhou, Lüliang, Jinzhong, Linfen, and Yuncheng in Shanxi province. **【Result】** Based on the improved fuzzy matter-element model, water effective evaluation showed that Shanxi province was unsafe for water utilization with comprehensive evaluation value of 1.950 3. Jinzhong, Yangquan, Changzhi, Xinzhou

【收稿日期】 2014-01-20

【基金项目】 山西省水利科学技术项目

【作者简介】 杜向润(1962—),男,山西汾阳人,教授级高工,在职博士,主要从事水资源系统工程研究。

E-mail: zjlong007@126.com

【通信作者】 冯民权(1964—),男,山西运城人,教授,博士生导师,主要从事计算水力学与环境水力学研究。

E-mail: mqfeng@xaut.edu.cn

and Jincheng belonged to critical safety areas with comprehensive evaluation values of 2.178 9,2.138 1, 2.121 1,2.102 4 and 2.088 2, respectively. Taiyuan, Yuncheng, Lüliang, Linfen, Shuozhou and Datong belonged to unsafe areas with comprehensive evaluation values of 1.869 1,1.825 9,1.816 9,1.796 2,1.769 7 and 1.746 3, respectively. 【Conclusion】 The improved fuzzy matter-element model based water effective evaluation was generally consistent with the water resources status. The model can provide guidance for development and utilization of regional water resources.

Key words: water security evaluation; entropy weight; fuzzy matter-element model; Shanxi Province

水安全属于非传统安全的范畴,最早出现在 2000 年斯德哥尔摩举行的水讨论会上。水安全已成为影响国家经济、社会可持续发展和长治久安的重大战略问题^[1]。我国水资源短缺与用水需求不断增长的矛盾日益突出,水资源形势堪忧,洪涝干旱、水质污染等水问题,已严重影响社会经济的可持续发展^[2]。水安全是一个全新的概念,近年来,许多学者从理论与方法上对其进行了广泛的研究^[3-7],张士锋等^[8]应用区域水资源压力指数,从水资源供需平衡的角度研究了海河流域的水安全问题;韩宇平等^[9-10]提出了多目标多层次水安全评价模型;成建国等^[11]系统地提出了水安全评价指标体系和水安全保障措施构想;卢敏等^[12]利用支持向量机法对水安全预警进行了研究;陈德敏等^[13]研究了中国水资源安全的法律保障及存在问题,提出了完善水资源安全法律的保障对策。

虽然国内外对水安全有了很多的探讨和研究^[14-15],也产生了很多纲领性的文件和重要的成果。但有些评价方法并不能完全反映地区真实的水安全水平,如层次分析法在进行方案重要性排序时仅考虑判断矩阵中对应一行元素的影响,尚不能较准确地反映实际情况,同时考虑到仅采用客观权重不能真正体现指标的重要程度,本研究在前人研究成果的基础上,利用主观与客观相结合的方法确定综合权重,提出基于熵权的改进模糊物元模型法对区域水资源进行水安全评价研究,以期为区域水资源的开发利用提供指导。

1 模糊物元模型及其改进

1.1 模糊物元模型

对于某一给定的事物名称 M 而言,关于它的特征 c 的模糊性量值为 v ,可以以有序三元组描述事物的基本模糊物元^[16-17],记为 $R(M,c,v)$ 。如果有 n 个特征的事物 m ,则存在 $c_1,c_2,\cdots,c_n$ 和相应的模糊性量值 $v_1,v_2,\cdots,v_n$,称 R 为 n 维模糊物元,记为 $\tilde{R}(M,c,v)$ 。如果将 m 个事物的 n 维物元进行组

合,则可以构成 m 个事物 n 维复合模糊物元,记作 $\tilde{R}_{mn}$ 。可表示为:

$$\tilde{R}_{mn} = \begin{pmatrix} M_1 & \cdots & M_m \\ c_1 & u_{11} & \cdots & u_{m1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_n & u_{1n} & \cdots & u_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $\tilde{R}_{mn}$ 为 m 个事物的 n 维复合模糊物元, c_j 为给定事物第 j 项的特征, M_i 为第 i 个事物; u_{ij} 为第 i 个事物第 j 项特征对应量值的从优隶属度($i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n$)。

相应量值的从优隶属度标准化计算包括 2 种,可表示为:

成本型指标(逆指标):

$$u_{ij} = 1 - \frac{(\max x_{ij}) - x_{ij}}{(\max x_{ij}) - (\min x_{ij})} \quad (2)$$

效益型指标(正指标):

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{(\max x_{ij}) - (\min x_{ij})} \quad (3)$$

式中: $\max x_{ij}$ 为各事物中第 j 项特征所对应的所有量值中的最大值, x_{ij} 为给定事物的特征值, $\min x_{ij}$ 为各事物中第 j 项特征所对应的所有量值中的最小值。

假设给定论域 U 及 U 中的 1 个集合 A ,用 1 个实数 $\xi(x)$ 来描述论域 U 中的元素 x 不属于和属于 A 的程度,显然 $\xi(x) \in (-\infty, +\infty)$, $\xi(x) < 0$ 表示 x 不属于 A 的程度, $\xi(x) \geq 0$ 表示 x 属于 A 的程度,称函数 $\xi(x)$ 为 U 关于集合 A 的关联函数,函数值称为关联度。关联系数可由隶属函数值加以确定,可表示为:

$$\xi_{ij} = u_{ij} = u(x_{ij}) \quad (4)$$

式中: ξ_{ij} 为第 i 个事物第 j 项特征的关联系数, $u(x_{ij})$ 为第 i 个事物第 j 项特征经标准化计算后的从优隶属度。

假设水安全各评价指标的综合权向量为 $w = (w_1, w_2, \cdots, w_m)^T$,利用模糊数学的方法,采用 $M(\cdot, +)$ 的先乘后加运算模式来计算贴近度 k_i ,其

可表示为:

$$k_i=\sum_{j=1}^n\omega_j\times\xi_{ij}。(5)$$

式中: k_i 为评价指标的贴近度, ω_j 为第 j 项特征的权重值,其他符号意义同上。

然后以此构造贴近度复合模糊物元 $\tilde{R}_k$,可表示为:

$$\tilde{R}_k=\begin{pmatrix} M_1 & \cdots & M_m \\ k_i & k_1 & \cdots & k_m \end{pmatrix}。(6)$$

由计算出的各贴近度,可以得出各事物的相对优劣次序以及它们与理想状况的贴近度。对于每一个评价对象,其水安全评价等级可表示为:

$$G=\sum_{i=1}^m i \frac{k_i}{\sum_{i=1}^m k_i}。(7)$$

式中: G 为水安全评价等级值,其他符号意义同上。

1.2 模型改进

模糊物元模型的应用基础是隶属度函数,隶属度函数的确定过程,从本质上而言应该是客观的,隶属度函数是否正确构造是建立模糊物元模型的关键,但是对于同一个模糊概念的认识每个人理解又有差异,因此函数的确定又带有一定的主观性。目前,还没有一套成熟有效的方法确立隶属度函数,大多数确立方法还停留在试验和经验的基础上,即将观测次数较多的数据样本近似认为其隶属度函数具有正态性,可表示为:

$$\xi(x)=\exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right]。(8)$$

式中: $\xi(x)$ 为隶属度函数值; x 为指标取值; a 、 b 为常数,且均大于零。

当 $x=a$ 时, $\xi(x)=1$,则 a 为该指标所对应的各级标准的平均值,可表示为:

$$a=\frac{x_{\text{上}}+x_{\text{下}}}{2}。(9)$$

式中: $x_{\text{上}}$ 和 $x_{\text{下}}$ 为对应级别的上、下边界值,其他符号意义同上。

对于参量范围为相应级别之间的过渡值,即同时居于上、下级别的分界点,其可同时属于 2 种级别,此时属于一种模糊边界,但 2 种级别的隶属度相等,可表示为:

$$\xi(x)=\exp\left[-\left(\frac{x_{\text{上}}-x_{\text{下}}}{2b}\right)^2\right]=\frac{1}{2},$$
$$b=0.600\ 6(x_{\text{上}}-x_{\text{下}})。(10)$$

然而,上述方法显然不适用于水安全评价的Ⅰ级(极不安全)和Ⅳ级(安全)2 个边界等级问题。鉴于此,为了能较好地处理各评价等级之间的过渡问

题,并适用于各种极端值现象,现对隶属度函数进行如下改进:

1)当水安全评价指标取值在Ⅰ级范围,且 a 取Ⅰ级下边界时,则有 $\xi(x)=1,a=x_{\text{下}}$ 。当 a 取Ⅱ级下边界且是Ⅰ级上边界时,它对应 2 个级别的隶属度相等,则由式(9)和(10)可得:

$$b=1.201\ 2(x_{\text{上}}-x_{\text{下}})。(11)$$

2)当水安全评价指标取值在Ⅳ级范围,且 a 取Ⅳ级上边界时,则有 $\xi(x)=1,a=x_{\text{上}}$ 。当 a 取Ⅲ级上边界且是Ⅳ级下边界时,它对应 2 个级别的隶属度应相等,可采用式(11)计算。

3)当水安全评价指标取值在其他范围,则可以利用式(8)~(10)确定其隶属度。

2 综合权重的确定

熵的概念源于热力学,熵权法则是以各指标信息的效用价值为基础确定指标权重,它能尽量消除各指标权重计算时的人为干扰,使评价结果更客观、更准确。在信息系统中的信息熵是信息无序度的度量,信息熵越小,信息的无序度越低,信息的效用值越大;反之,信息熵越大,信息的无序度越高,其信息的效用值越小^[18]。

对于水安全系统而言,假如已获得的初始数据矩阵为 $\mathbf{X}=\{x_{ij}\}_{m\times n}$ (包含 m 个样本的 n 个评价指标),由于水安全评价的各指标量纲、指标优劣的取向及数量级均有很大的差异性,因此需要对评价指标的初始数据进行标准化处理,可表示为:

$$y_{ij}=x_{ij}/\sum_{i=1}^m x_{ij}。(12)$$

式中: y_{ij} 为样本的标准化数据, x_{ij} 为水安全系统初始评价指标。

由此得数据的标准化矩阵为 $\mathbf{Y}=\{y_{ij}\}_{m\times n}$ ($0\leq y_{ij}\leq 1$),则第 j 项评价指标的信息熵值可表示为:

$$e_j=-k\sum_{i=1}^m y_{ij}\ln y_{ij}。(13)$$

式中: e_j 为信息熵; k 为常数,常取 $k=1/\ln m$,与系统的样本数 m 有关;其余符号意义同上。

信息熵可用来度量 j 项指标的信息效用价值,当 $e_j=1$ 时表示完全无序,此时 e_j (也就是 j 指标的数据)的信息对综合评价的效用价值为 0,即评价指标的信息效用价值取决于该评价指标的信息熵 e_j 与 1 的差值 h_j ,即 $h_j=1-e_j$ 。

则第 j 项指标的客观权重可表示为:

$$\omega_{j1}=h_j/\sum_{j=1}^n h_j。(14)$$

续表 1 Continued table 1

指标 Index	太原 Taiyuan	大同 Datong	阳泉 Yangquan	长治 Changzhi	晋城 Jincheng	朔州 Shuozhou	忻州 Xinzhou	吕梁 Lüliang	晋中 Jinzhong	临汾 Linfen	运城 Yuncheng
洪水受灾面积率(x_{10})/% Ratio of flooded area	0.13	0.13	0.04	0.25	2.09	6.75	0.02	0.07	0.07	0.02	9.82
干旱受灾面积率(x_{11})/% Ratio of drought area	2.67	5.21	5.57	0.33	10.76	14.86	2.85	2.44	3.13	7.92	18.18
单位面积蓄水工程总库容 (x_{12})/($\times 10^4\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$) Water storage per unit area	13.13	5.56	1.58	7.60	7.85	1.78	0.94	2.44	4.32	2.29	1.33
堤防保护耕地面积率 (x_{13})/%	5.27	2.64	0.48	0.37	0.05	0.51	4.44	0.95	3.36	1.13	6.97
灌溉面积率(x_{14})/% Ratio of irrigation area	7.43	9.24	1.88	5.45	4.32	12.32	5.14	4.59	8.89	7.03	26.06

注:指标数据来源于 2011 年山西省水资源评价、水资源公报、水利统计年鉴和统计年鉴或根据相关资料计算得到。
Note:Data were collected from the 2011 Shanxi water resources assessment,water resources bulletin,water conservancy statistics and statistical yearbook,or were calculated according to obtained data.

各评价指标的水安全评价等级标准分为极不安全(Ⅰ级)、不安全(Ⅱ级)、临界安全(Ⅲ级)和安全(Ⅳ级)4 个级别,本研究采用了 1~4 标度法来衡量水安全等级,将各指标不同级别的区间可量化为(0,1],[1,2],[2,3],[3,4]。

指标进行标准化处理,对于指标中的逆指标(即越小越优型)和正指标(即越大越优型)分别采用公式(2)和(3)进行归一化处理。利用式(8)~(11)计算各指标的从优隶属度,再以此建立关联系数复合模糊物元,可分别计算出太原市各指标相对于 4 个等级的水安全评价的复合模糊物元矩阵,结果如下:

2)确定从优隶属度和复合模糊物元。对各评价指标进行标准化处理,对于指标中的逆指标(即越小越优型)和正指标(即越大越优型)分别采用公式(2)和(3)进行归一化处理。利用式(8)~(11)计算各指标的从优隶属度,再以此建立关联系数复合模糊物元,可分别计算出太原市各指标相对于 4 个等级的水安全评价的复合模糊物元矩阵,结果如下:

$\widetilde{\mathbf{R}}_k=$	极不安全	不安全	临界安全	安全	。	
	x_1	1.000 0	0.000 0	0.000 0		
	x_2	0.500 0	0.500 0	0.000 0		
	x_3	0.030 0	0.018 9	0.198 6		
	x_4	0.005 0	0.010 8	0.442 5		
	x_5	0.306 0	0.628 0	0.043 1		
	x_6	0.001 6	0.028 9	0.068 2		
	x_7	0.463 2	0.506 8	0.018 9		
	x_8	0.556 3	0.424 8	0.010 2		
	x_9	0.005 8	0.028 9	0.204 1		
	x_{10}	1.000 0	0.000 0	0.000 0		
	x_{11}	0.803 2	0.135 4	0.045 3		
	x_{12}	0.004 9	0.426 5	0.551 8		
	x_{13}	0.000 0	0.000 0	0.500 0		
	x_{14}	0.561 4	0.410 9	0.019 8		

3)确定评价指标的权值系数。根据各指标的模糊物元矩阵,按式(13)计算各年度各评价指标的信息熵值,再由式(14)计算各指标的客观权重,利用主观、客观权重相结合的方法,由式(15)得到各指标的综合权重。计算结果见表 2。

表 2 山西省水安全评价体系中各评价指标综合权重的计算结果

Table 2 Calculation of comprehensive index weights in Shanxi water system safety assessment

指标 Index	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
综合权重 Comprehensive weight	0.060 8	0.047 9	0.054 3	0.033 4	0.011 6	0.008 6	0.015 7
指标 Index	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
综合权重 Comprehensive weight	0.043 7	0.038 3	0.285 1	0.102 3	0.100 2	0.125 1	0.073 1

4)贴适度复合模糊物元的确定及综合评价。贴适度是指被评价样品与标准样品互相接近的程度,

用式(5)计算各方案的贴近度,即可得到关联度复合模糊物元,结果如下:

$$\tilde{R_k} = \begin{bmatrix} \text{极不安全} & \text{不安全} & \text{临界安全} & \text{安全} \\ k_1 & 0.584\ 1 & 0.107\ 3 & 0.164\ 0 & 0.144\ 6 \end{bmatrix}。$$

以 1~4 标度法确定的水安全等级标准为基础,评价等级为 1.869 1,属不安全地区,水安全形势比较严峻。同理,可求得其他城市的贴近度复合模糊物元和综合评价值如下:

$\tilde{R_k} =$

	极不安全	不安全	临界安全	安全	综合评价等级值
大同	0.554 8	0.220 6	0.148 1	0.076 5	1.746 3
阳泉	0.198 5	0.566 3	0.133 8	0.101 4	2.138 1
长治	0.211 2	0.558 7	0.127 9	0.102 2	2.121 1
晋城	0.228 2	0.552 8	0.121 6	0.097 4	2.088 2
朔州	0.601 9	0.144 7	0.135 2	0.118 2	1.769 7
忻州	0.233 3	0.504 7	0.116 3	0.109 7	2.102 4
吕梁	0.521 6	0.243 7	0.130 9	0.103 8	1.816 9
晋中	0.189 8	0.560 1	0.131 5	0.118 6	2.178 9
临汾	0.591 6	0.152 2	0.124 6	0.131 6	1.796 2
运城	0.530 3	0.218 5	0.146 2	0.105 0	1.825 9

。

经计算得山西省水安全平均综合评价等级值为 1.950 3,属于不安全地区,全省的水安全形势比较严峻。根据综合评价等级值的计算结果可知,各城市水安全综合评价等级值最大的是晋中市,为 2.178 9;最小的是大同市,为 1.746 3,其余城市综合评价等级值由大到小依次为阳泉市、长治市、忻州市、晋城市、太原市、运城市、吕梁市、临汾市和朔州市。

从水安全的综合评价等级值可以看出,晋中市、阳泉市、长治市、忻州市和晋城市属临界安全地区,其综合评价值分别为 2.178 9,2.138 1,2.121 1,2.102 4和 2.088 2,这些地区的水安全形势相对较好;太原市、运城市、吕梁市、临汾市、朔州市和大同市属于不安全地区,其综合评价值分别为 1.869 1,1.825 9,1.816 9,1.796 2,1.769 7 和 1.746 3,这些地区水安全状况处在令人担忧的状态,倘若及时采取措施有可能好转,否则可能更加恶化,因此,急需采取有力措施进行挽救。

4 结 论

水安全是 21 世纪国家安全的关键组成部分,水资源短缺是我国西北和北方地区面临的最基本的生态安全和社会安全问题之一,已成为制约区域社会经济发展和生态环境恢复、改善的瓶颈。本研究在建立改进模糊物元模型的基础上,利用熵值法确定指标权重,对山西省水安全进行了研究,得到山西省水安全的平均综合评价等级值为 1.950 3,属于不安

全地区,各地市评价结果基本上与实际情况相符。根据文献[19]利用层次分析法对山西省水安全的研究结果可知,晋城市、长治市、朔州市、运城市、忻州市和阳泉市的水安全的综合评价等级值较高,而太原市、晋中市、临汾市、大同市和吕梁市水资源安全等级较低。除晋中市和朔州市外,本研究成果与文献[19]的结论基本相符。

由于水安全所面临问题具有复杂性、社会性和普遍性等特点,也受到专业素养、理论水平及可操作能力的制约,本研究仅从水安全评价方法上进行了一些探索。为了进一步发展和完善解决水安全问题的理论与实践,今后还应在水安全保障体系、水安全应变能力建设、水安全管理信息系统等方面进行研究,继续寻求具有灵活性、可移植性、可拓展性和可操作性的方法,以提高解决水安全问题的技术能力。同时,针对复杂的水安全问题,需要转变以往“头痛医头,脚痛医脚”的方法,在可持续发展观点的支持下建立水安全保障系统,以促使对水安全问题的正确理解、快速反应和合理解决。

[参考文献]

[1] 姜文来. 中国 21 世纪水资源安全对策研究 [J]. 水科学进展, 2001,12(3):66-71.
Jiang W L. Study on water resource safety strategy in China in twenty-first century [J]. Advances in Water Science,2001,12 (3):66-71. (in Chinese)
[2] 陈家琦. 水安全保障问题浅议 [J]. 自然资源学报,2002,17 (3):276-279.

- Chen J Q. Some observations on the water security and assurance issues [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 276-279. (in Chinese)
- [3] 邱德华. 区域水安全战略的仿真评价研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- Qiu D H. Research on simulation and evaluation of regional water security strategy [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [4] 刘国香. 水安全评价模型及保障对策研究 [D]. 济南: 山东大学, 2005.
- Liu G X. Research model and measures of water security evaluation [D]. Ji'nan: Shandong University, 2005. (in Chinese)
- [5] 王琳. 辽河流域水安全评价研究 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2005.
- Wang L. Liaohe River Basin water security evaluation [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [6] 李如忠, 钱家忠, 汪家权. 模糊物元模型在区域水环境承载力评价中的应用 [J]. *环境科学与技术*, 2004, 24(5): 54-56.
- Li R Z, Qian J Z, Wang J Q. Fuzzy matter-element model for assessment of water environment bearing capacity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 24(5): 54-56. (in Chinese)
- [7] 张华侨, 窦明, 赵辉, 等. 郑州市水安全模糊综合评价 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(6): 42-47.
- Zhang H Q, Dou M, Zhao H, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water security in Zhengzhou City [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(6): 42-47. (in Chinese)
- [8] 张士锋, 贾绍凤, 张军岩. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系 [J]. *地理科学进展*, 2002, 26(6): 538-545.
- Zhang S F, Jia S F, Zhang J Y. Regional water resources stress and water resources security appraisal indicators [J]. *Progress in Geography*, 2002, 26(6): 538-545. (in Chinese)
- [9] 韩宇平, 阮本清, 解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用 [J]. *资源科学*, 2003, 25(4): 37-42.
- Han Y P, Ruan B Q, Xie J C. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation [J]. *Resources Science*, 2003, 25(4): 37-42. (in Chinese)
- [10] 韩宇平, 阮本清. 区域水安全评价指标体系初步研究 [J]. *环境科学学报*, 2003, 23(2): 267-272.
- Han Y P, Ruan B Q. Research on evaluation index system of water safety [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(2): 267-272. (in Chinese)
- [11] 成建国, 杨小柳, 魏传江, 等. 论水安全 [J]. *中国水利*, 2004(1): 21-23.
- Cheng J G, Yang X L, Wei C J, et al. Theory of water safety [J]. *China Water Resources*, 2004(1): 21-23. (in Chinese)
- [12] 卢敏, 张展羽, 冯宝平, 等. 基于支持向量机的区域水安全预警模型及应用 [J]. *计算机工程*, 2006, 32(15): 44-46.
- Lu M, Zhang Z Y, Feng B P, et al. Early-warning model and its application of regional water security based on support vector machine [J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(15): 44-46. (in Chinese)
- [13] 陈德敏, 乔兴旺. 中国水资源安全法律保障初步研究 [J]. *现代法学*, 2003, 25(5): 118-121.
- Chen D M, Qiao X W. A study of the legal protection of national water resource security in China [J]. *Modern Law Science*, 2003, 25(5): 118-121. (in Chinese)
- [14] Loucks D P. Sustainable water resources management [J]. *Water International*, 2000, 25(1): 3-10.
- [15] Levangie J C. A bottom up approach to evaluate risk assessment tools for drinking water safety in first nations communities [D]. Guelph: University of Guelph, 2010.
- [16] 郦建强, 杨晓华, 陆桂华, 等. 流域水资源承载力综合评价的改进隶属度模糊物元模型 [J]. *水力发电学报*, 2009, 28(1): 78-83.
- Li J Q, Yang X H, Lu G H, et al. Fuzzy matter-element model based on improved membership degree for comprehensive assessment of water resources carrying capacity in river basins [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(1): 78-83. (in Chinese)
- [17] 金菊良, 王文圣, 洪天求, 等. 流域水安全智能评价方法的理论基础探讨 [J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 918-925.
- Jin J L, Wang W S, Hong T Q, et al. Theoretical basis of intelligent evaluation methods of watershed water security [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(8): 918-925. (in Chinese)
- [18] 王广月, 刘建. 围岩稳定性的模糊物元评价方法 [J]. *水利学报*, 2004, 35(5): 1-7.
- Wang G Y, Liu J. Fuzzy matter-element evaluation method for analysis of surrounding rock stability [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(5): 1-7. (in Chinese)
- [19] 王瑞芳, 秦大庸, 张占彪. 层次分析法在山西省水资源安全评价中的应用 [J]. *人民黄河*, 2008, 30(9): 40-42.
- Wang R F, Qin D Y, Zhang Z P. Application of AHP in the water resources safety evaluation in Shanxi Province [J]. *Yellow River*, 2008, 30(9): 40-42. (in Chinese)