

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 06. 04

基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价

郝光玲¹,王 烜^{2,3},罗 阳¹,李春晖²

(1. 海河流域水资源保护局, 天津 300170; 2. 北京师范大学环境学院水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:运用改进的模糊综合评价模型和灰关联分析模型对南水北调受水区——北京市的水资源短缺风险进行评价,运用组合权重方法确定评价指标的权重。结果表明:从2001—2014年,北京市水资源短缺风险总体呈下降趋势并趋于稳定,水资源短缺状况从较高风险降低为临界风险和较低风险,反映出近年来北京市政府对水资源的管理和调控已显现出成效;2012年以后,水资源短缺风险又呈升高趋势,应当对未来几年的水资源短缺风险进行密切关注并尽快采取措施,以降低北京市的水资源短缺风险,保障北京地区供用水安全。

关键词:水资源短缺风险;模糊综合评价;灰关联评价;组合权重;北京市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)06-0027-05

Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model

HAO Guangling¹, WANG Xuan^{2,3}, LUO Yang¹, LI Chunhui²

(1. Water Resources Protection Bureau of Haihe River Basin, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory for Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: By using improved fuzzy synthetic evaluation and grey relational analysis models, water shortage risk of Beijing City that is one of water intake areas of South to North Water Diversion Project were evaluated. To determine evaluation index weights, the combined weight method was adopted. The results indicated that the risk of water shortage in Beijing was generally on the downward trend and tended to be stable during the year 2001—2014, and the shortage of water resources was reduced from higher risk to critical risk and lower risk, which indicated in recent years, the management and regulation of water resources by the Beijing municipal government have shown remarkable results. However, water shortage risk showed an upward trend after the year 2012, therefore close attention should be paid to the risk of water shortage in the coming years and measures should be taken as soon as possible so as to reduce the risk of water shortage in Beijing city and ensure water supply security in Beijing area.

Key words: water resource shortage risk; fuzzy synthetic evaluation; grey relational analysis; combined weight; Beijing City

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0401302);创新研究群体科学基金(51421065);国家国际科技合作专项(2013DFA71340)
作者简介:郝光玲(1990—),女,硕士研究生,研究方向为流域水资源安全评价与管理。E-mail: hgl370@163.com
通信作者:王烜,教授。E-mail: wangx@bnu.edu.cn

北京市 2013 年人均水资源占有量约为 119 m^3 , 为我国人均水资源占有量的 5.8%, 属于重度缺水城市^[1]。随着经济的高速发展和人口规模的不断扩大, 水资源短缺已经成为影响和制约城市社会和经济发展的因素^[2-3]。北京市作为南水北调的重要受水区, 近年来调水量逐年增多, 在一定程度上缓解了水资源短缺的状况, 但缺水风险仍然存在。对北京市水资源短缺风险进行评价, 不仅有利于规避水资源短缺风险, 合理制定区域发展规划和进行水资源管理, 更可为整个南水北调受水区的水资源合理配置提供依据^[4]。

水资源短缺风险评价方法有主成分分析法^[5]、模糊综合评价法^[6]、集对分析法^[7]、遗传算法^[8]、投影寻踪法^[9-10]、蚁群算法^[11]、聚类分析法^[12]、多目标决策^[13]等, 由于影响水资源短缺风险的因素众多^[14], 且评价因子具有模糊性和不确定性, 所以不同的方法和研究者的评价结果差异很大。南水北调工程作为优化水资源配置、促进区域协调发展的基础性工程, 其水资源的合理配置依赖于对受水区水资源短缺状况的准确判断, 所以受水区水资源短缺风险评价的结果非常重要。笔者综合运用模糊综合评价方法和灰关联分析方法, 对南水北调工程受水区——北京市的水资源短缺风险进行评价, 引入组合权重方法来确定权重, 有效避免了主客观权重单独使用时, 对评价结果的影响^[15]。

1 水资源短缺风险评价方法

1.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法是应用十分广泛的多因素综合评价模型。其具体步骤如下:

a. 将水资源短缺风险用一个函数表示:

$$R = R(u_1, u_2, \dots, u_M) \quad (1)$$

式中: R 为水资源短缺风险; $u_1, u_2, \dots, u_M$ 为水资源短缺风险评价指标。

将风险划分为 5 个等级, 确定集合为 $R' = \{1, 2, 3, 4, 5\}$; 其中, 1 表示低风险, 指可忽略的风险; 2 表示较低风险, 指可接受的风险; 3 表示临界风险; 4 表示较高风险, 指较为严重的风险; 5 表示高风险, 指系统无法承受的风险。

b. 建立模糊关系矩阵 $A_{mj(M \times 5)}$, 并根据式 (3) ~ (5) 求出各评价因子对各风险等级的隶属度

$r_{m(j-1) \circ}$

$$A_{mj(M \times 5)} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{M5} \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据隶属度函数的定义

$$\begin{cases} b_{m(j-1)} = 1 - b_m & u_{mn} < (\beta_{mj} + \beta_{m(j-1)})/2 \\ b_{mj} = 1 - b_{m(j-1)} & u_{mn} > (\beta_{mj} + \beta_{m(j-1)})/2 \end{cases} \quad (3)$$

极大型指标:

$$b_{m(j-1)} = \begin{cases} \frac{u_{mn} - \beta_{mj}}{\beta_{m(j-1)} - \beta_{mj}} & \beta_{m(j-1)} > u_{mn} > \beta_{mj} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

极小型指标:

$$b_{m(j-1)} = \begin{cases} \frac{\beta_{mj} - u_{mn}}{\beta_{mj} - \beta_{m(j-1)}} & \beta_{m(j-1)} < u_{mn} < \beta_{mj} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为第 n 个评价对象; m 为第 m 个评价指标; j 为第 j 个风险等级; u_{mn} 为第 m 个指标、第 n 个评价对象的 m 个评价指标值; β_{mj} 和 $\beta_{m(j-1)}$ 分别为第 m 个评价指标的对应的第 j 个和第 $(j-1)$ 个风险等级的临界值。

由各因子的隶属度, 得到隶属度模糊矩阵 B , 将权重 W 与模糊矩阵 B 作矩阵乘法, 即可得到评价结果向量, 取最大值所对应的等级即为风险等级评价结果^[16]。

$$B_{mj(M \times 5)} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{M1} & \cdots & b_{M5} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R = W \times B = (w_1, w_2, \dots, w_M) \times \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{M1} & \cdots & b_{M5} \end{pmatrix} =$$

$$(b_1, b_2, \dots, b_M) \quad (7)$$

式中: $w_1, w_2, \dots, w_M$ 为各因子的权重。

1.2 灰关联分析法

灰关联分析法是根据问题的实际情况确定出理想的最优序列, 然后和若干个比较序列比较来判断其联系是否紧密。与其他多因素分析方法相比, 灰色关联分析对数据要求较低且计算量小, 结果比较客观^[17-18]。灰关联分析法的具体步骤如下:

a. 确定分析序列。分析序列分为参考数列(反映系统行为特征)和比较数列(影响系统行为)。

为计算水资源短缺风险, 本文将参考序列定为需水量与供给量的比值 Y 来反映水资源短缺风险; 比较序列为各可能为影响因子的值, 将其表示为 m 个指标和 n 个评价对象组成的矩阵 U 。

$$Y = \{y(n) \mid y = 1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

$$U = (u_{mn})_{M \times N} \quad (9)$$

b. 对变量序列和矩阵 $(u_{mn})_{M \times N}$, 根据式 (10) 和式 (11) 进行归一化处理得到矩阵 $V = (v_{mn})_{M \times N \circ}$

极大型指标:

$$v_{mn} = \frac{u_{mn} - u_{m \min}}{u_{m \max} - u_{m \min}} \quad (10)$$

极小型指标:

$$v_{mn} = \frac{u_{m \max} - u_{mn}}{u_{m \max} - u_{m \min}} \quad (11)$$

式中: $u_{m \max}$ 和 $u_{m \min}$ 分别为第 m 个评价指标的 n 个评价对象中的最大值和最小值。

c. 计算关联系数。确定最优序列 X_0 , 并令两个序列的绝对差 $\Delta_{mn} = |X_0 - v_{mn}|$, 则关联系数:

$$\xi_{mn} = \frac{\min \Delta_{mn} + \rho \max \Delta_{mn}}{\Delta_{mn} + \rho \max \Delta_{mn}}$$

式中: ρ 为分辨系数, 通常取 0.5。

d. 计算关联度, 确定风险等级 R_n 。

$$R_n = \sum_{m=1}^M \omega_m \xi_{mn} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

e. 与风险等级指数比较, 确定各评价对象的风险等级^[18]。

1.3 组合权重的确定

权重的确定是影响评价结果的重要因素。主观权重常常根据经验、知识等确定评价因子的权重, 但却忽视了因子权重的具体定量; 客观赋权法主要根据原始数据之间的关系确定权重, 客观性较强, 但有可能出现因子重要性与权重偏差很大的情况^[19]。基于此, 本文建立主、客观权重相结合, 定义组合权重的方法确定目标权重。组合权重可以表示为

$$\varphi = \frac{\omega_m \theta_m}{\sum_{m=1}^M \omega_m \theta_m} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

式中: ω_m 和 θ_m 分别为第 m 个指标的客观权重和主观权重。

熵权法是客观赋权的常用方法。在信息论中, 熵值反映了信息的无序化程度, 可以用来度量信息量的大小。某项指标携带的信息越多, 表示该项指标对决策的作用越大, 熵值越小^[20]。

根据熵的定义, 第 m 个指标的熵 E_m 为

$$E_m = - \frac{\sum_{n=1}^N F_{mn} \ln F_{mn}}{\ln N} \quad (14)$$

其中:

$$F_{mn} = \frac{1 + u_{mn}}{\sum_{n=1}^N (1 + u_{mn})} \quad (15)$$

则第 m 个指标的权重即为

$$w_m = \frac{1 - E_m}{M - \sum_{m=1}^M E_m} \quad \sum_{m=1}^M w_m = 1 \quad (16)$$

G1 法是一种主观权重赋值法, 适用于影响因素不能完全量化的模糊赋值。对于评价指标集 $R = R(u_1, u_2, u_3, \dots, u_M)$, 经过专家决策, 根据因子重要程度得到唯一序关系, 记为: $u_1 > u_2 > u_3 > \dots > u_M$ 。

为确定权重系数, 需要确定相邻指标的重要程度 δ_n ^[21]:

$$\delta_m = \theta_{m-1} \theta_m^{-1} \quad m = M, M-1, M-2, \dots, 3, 2 \quad (17)$$

由此可得到权重系数:

$$\delta_M = [1 + \sum_{k=2}^M \prod_{m=k}^M \delta_m]^{-1} \quad (18)$$

$$\theta_{k-1} = \delta_k \theta_k \quad (19)$$

2 评价结果与分析

水资源短缺风险因子包括自然因子、社会因子和工程技术因子 3 个方面^[22]。本文结合参考文献和北京市实际情况, 确定了农业用水量、环境用水量、万元 GDP 耗水量、污水处理率、降雨量等 8 个指标进行分析评价, 并将评价指标划分为 5 个等级: 高风险、较高风险、临界风险、较低风险和低风险。文中所用数据来自《北京市统计年鉴》和《北京市水资源公报》等。分别运用模糊综合评价法和灰关联分析法对北京市水资源短缺风险进行评价, 并改进了权重的确定方法, 综合运用熵权法和 G1 方法确定各指标的权重(表 1)。

2.1 模糊综合评价结果

运用模糊综合评价法对 2001—2014 年北京市水资源短缺风险进行分析, 以需水量与供水量的比值为参考序列, 得到评价结果向量, 依次取最大值所对应风险等级分类结果, 得到北京市水资源短缺风险等级变化趋势(图 1)。由图 1 可见, 北京市水资源短缺风险整体上呈现减小的趋势。2001 年为高风险, 2002 年和 2003 年为较高风险, 2006 年以后, 除 2009 年以外均为较低风险和低风险。

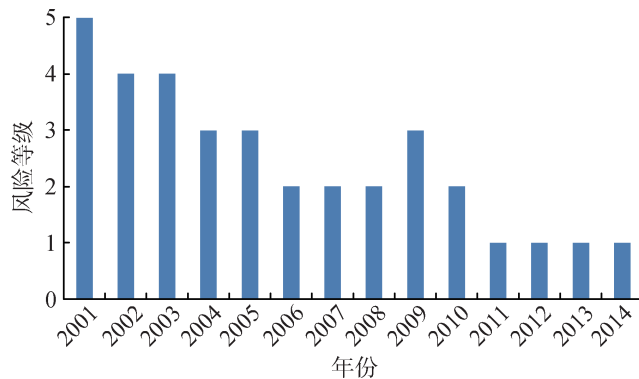


图 1 2001—2014 年水资源短缺风险模糊综合评价结果

表 1 评价指标及其权重

评价指标	农业用水	工业用水	生活用水	环境用水	万元 GDP 耗水	降水量	人均水资源占有量	污水处理率	合计
熵 权	0.096	0.171	0.065	0.152	0.141	0.105	0.092	0.178	1
G1 法权重	0.242	0.202	0.126	0.115	0.104	0.087	0.072	0.052	1
组合权重	0.078	0.137	0.093	0.063	0.097	0.198	0.221	0.113	1

2.2 灰关联分析结果

运用灰关联分析法对同期水资源短缺风险进行评价,结果见图 2。从图 1 可见,北京市面临着水资源短缺风险,所研究的 14 年间共有 79% 的年份处于临界风险之上,其中 2001 年水资源短缺最为严重,接近于最高风险;之后的几年中,北京市水资源短缺风险呈减小趋势,逐渐降低到较高风险和临界风险并趋于稳定;2012 年以后,水资源短缺风险又呈升高趋势,逐渐上升到临界风险以上。

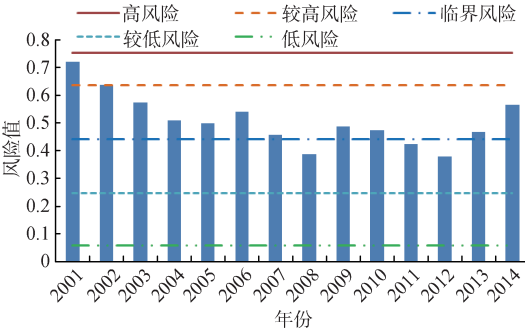


图 2 2001—2014 年水资源短缺风险灰关联分析法评价结果

2.3 结果比较与分析

从两种方法的评价结果来看,2001—2009 年,两种方法的评价结果较为一致,都反映出北京市水资源短缺的风险降低的趋势。尤其是 2006—2008 年,水资源短缺风险降低到较低风险以下,这与廖强等^[22]对北京市水资源评价中的结果一致。这期间,除北京市降雨量较多外,北京市每年应急供水约 2.5 亿~3.2 亿 t,应急供水量的增加有效地缓解了供水压力。2009—2012 年,水资源短缺风险保持稳定,在人口规模继续增加的情况下,水资源利用总量保持稳定,且水资源人均占有量持续增加,反映了北京市水资源短缺状况呈好转趋势,也说明北京市的水资源管理卓有成效。从灰关联分析结果来看,2013 年和 2014 年,水资源短缺风险又有所增加,由较低风险升高到临界风险以上。模糊综合评价方法的结果则表现为低风险。综合源数据来看,2013 年和 2014 年的降水量较少,生活用水量大量增加,灰关联分析的结果应该更为可靠。

近几年,作为南水北调中线工程的重要受水区,北京市接受南水北调来水量持续增加,一定程度上缓解了北京市的缺水状况,中线工程于 2014 年 12 月份正式通水,截至 2016 年 12 月 27 日,两年为北京供水 19.4 亿 m³,对降低北京市水资源短缺风险发挥了十分显著的作用。北京市 70% 的南水北调

来水都用于城市生活用水,但是从总量上来说,现在人均水资源量还远低于国际标准,是一个极度缺水的城市^[22]。随着经济的快速发展和人口的继续增加,北京市水资源短缺状况将在一段时间内持续存在。而且,单一外调水通道使城市供水安全存在较大的风险,所以进一步提高北京市供水安全,除依靠外调水之外,还应采取措施,如提高水资源利用率、控制人口、减少水环境污染和鼓励全民节水等,减少水资源的需求量,以保证水资源系统的良性循环和水资源的可持续利用。

3 结 语

本文两种评价方法的结果一致性较好,尤其是在 2009 年以前,都反映了北京市水资源短缺风险降低的趋势,但各年份的风险等级评价结果并不完全一致,尤其在 2012 年以后,灰关联分析结果显示,北京市水资源短缺风险又有升高趋势,这在模糊综合评价中没有很好的体现。本文在权重确定时,综合运用主客观权重来确定组合权重,有效地避免了单一权重对评价结果的影响,然而方法因素对评价结果的影响仍不可避免。在以后的分析评价中,风险等级的科学分类和合理有效的隶属度函数构建应该作为研究的重点。

参考文献:

[1] 何维达,陆平,邓佩.北京市供水与用水政策的一般均衡分析:基于水资源 CGE 模型[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2015,17(2):72-76. (HE Weida, LU Ping, DENG Pei. General equilibrium analysis of Beijing's water supply and consumption policies based on CGE-water model[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Science), 2015, 17(2): 72-76. (in Chinese))

[2] 郝光玲,王烜,李春晖,等.基于系统动力学的南阳市水资源供需平衡分析[J].水资源保护,2015,31(4):15-19. (HAO Guangling, WANG Xuan, LI Chunhui, et al. Analysis of water supply and demand balance in Nanyang City based on system dynamics [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4): 15-19. (in Chinese))

[3] 童纪新,梁斐然.我国水资源可持续利用能力评价[J].水利经济,2015,33(6):55-60. (TONG Jixin, LIANG Feiran. Evaluation of sustainable utilization of water resources in China [J]. Journal of Economic of Water Resource, 2015, 33(6): 55-60. (in Chinese))

[4] 王晓贞,王炎如.南水北调中线骨干工程水价合理标准与收费制度研究[J].水利经济,2015,33(1):18-26.

- (WANG Xiaozhen, WANG Yanru. Rational standard of water price and charging system for backbone project of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion [J]. Journal of economics of Water Resources, 2015, 33 (1): 18-26. (in Chinese))
- [5] 张代青, 于国荣. 河川径流情势主成分分析[J]. 水资源保护, 2016, 32 (4): 39-44. (ZHANG Daiqing, YU Guorong. Principal component analysis of runoff regimes of rivers[J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (4): 39-44. (in Chinese))
- [6] 朱怡娟, 黄建武, 揭毅. 武汉城市圈水资源脆弱性评价[J]. 水资源保护, 2015, 31 (2): 59-64. (ZHU Yijuan, HUANG Jianwu, JIE Yi. Evaluation on water resources vulnerability of Wuhan City Circle[J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (2): 59-64. (in Chinese))
- [7] 王栋, 梁忠民, 常文娟, 等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33 (1): 35-40. (WANG Dong, LIANG Zhongmin, CHANG Wenjuan, et al. Comprehensive evaluation of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1): 35-40. (in Chinese))
- [8] 崔东文. 鸡群优化算法-投影寻踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (2): 16-23. (CUI Dongwen. Projection pursuit model for evaluation of flood and drought disasters based on chicken swarm optimization algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2): 16-23. (in Chinese))
- [9] 黄显峰, 贾永乐, 方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明评价[J]. 水资源保护, 2016, 32 (6): 117-122. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua. Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction based on projection pursuit method [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (6): 117-122. (in Chinese))
- [10] 许淮, 郭晓亮, 徐昕, 等. 生物群体智能优化的投影寻踪模型在灌区水资源综合效益研究中的应用[J]. 水资源保护, 2016, 32 (3): 38-43. (XU Zhun, GUO Xiaoliang, XU Xin, et al. Application of projection pursuit classification model basing on biological swarm intelligence in comprehensive benefit research of water resources in irrigation district [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3): 38-43. (in Chinese))
- [11] 杨娜, 付强, 李荣东. 蚁群算法在水科学中的应用研究进展[J]. 水资源保护, 2007, 23 (5): 67-70. (YANG Na, FU Qiang, LI Rongdong. Progress on application of ant colony algorithm in water science [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (5): 67-70. (in Chinese))
- [12] 张继国, 管耀宗, 朱永忠. 降雨空间分布的模糊熵聚类分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44 (4): 353-357. (ZHANG Jiguo, GUAN Yaozong, ZHU Yongzhong. Fuzzy entropy clustering analysis of spatial distribution of precipitation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (4): 353-357. (in Chinese))
- [13] 庞清江, 亓剑, 张钰镭, 等. 大汶河流域水资源承载力多目标决策分析[J]. 水资源保护, 2007, 23 (5): 21-24. (PANG Qingjiang, QI Jian, ZHANG Yulei, et al. Multi-objective decision-making analysis of water resources carrying capacity in Dawenhe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (5): 21-24. (in Chinese))
- [14] 王红瑞, 洪思扬, 秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33 (5): 1-4. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (5): 1-4. (in Chinese))
- [15] 袁文博, 窦玉丹, 刘妍, 等. 基于组合权重模糊可变模型的旱涝灾害评价[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33 (10): 2583-2589. (YUAN Yongbo, DOU Yudan, LIU Yan, et al. Evaluation of droughts and floods based on fuzzy variable model with combined weights [J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2013, 33 (10): 2583-2589. (in Chinese))
- [16] 袁艳梅, 沙晓军, 刘煜晴, 等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017, 33 (1): 52-56. (YUAN Yanmei, SHA Xiaojun, LIU Yuqing, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1): 52-56. (in Chinese))
- [17] 孙才志, 杨宇, 陈相涛, 等. 中国省际水风险评价及空间关联格局研究[J]. 水资源保护, 2015, 31 (6): 18-26. (SUN Caizhi, YANG Yu, CHEN Xiangtao, et al. Water risk assessment and spatial correlation patterns research in provincial scale in China [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6): 18-26. (in Chinese))
- [18] LI Y P, HUANG G H. Risk analysis and management for water resources systems [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27 (3): 593-597.
- [19] 宋海洲, 王志江. 客观权重与主观权重的权衡[J]. 技术经济与管理研究, 2003 (3): 62. (SONG Haizhou, WANG Zhijiang. The balance of objective weight and subjective weight [J]. Technoeconomics and Management Research, 2003 (3): 62. (in Chinese))
- [20] 刘珊, 吴成国, 潘争伟, 等. 基于集对分析的区域产业结构与用水结构协调评价[J]. 水资源保护, 2016, 32 (3): 64-68. (LIU Shan, WU Chengguo, PAN Zhengwei, et al. Coordinate assessment of regional industrial structure and water utilization structure based on set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3): 64-68. (in Chinese))
- [21] 陈建生, 何会祥, 王涛. 基于熵权-可变模糊集模型的堤坝渗漏探测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44 (4): 358-363. (CHEN Jiansheng, HE Huixiang, WANG Tao. Dam leakage detection based on entropy weight-variable fuzzy set model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (4): 358-363. (in Chinese))
- [22] 廖强, 张士锋, 陈俊旭. 北京市水资源短缺风险等级评价与预测[J]. 资源科学, 2013, 35 (1): 140-147. (LIAO Qiang, ZHANG Shifeng, CHEN Junxu. Risk assessment and prediction of water shortages in Beijing [J]. Resources Science, 2013, 35 (1): 140-147. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-05-09 编辑: 徐娟)