

# 基于物元分析法的区域水资源安全评价

刘邦贵, 刘永强, 王浩, 姚悦铃

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:**采用物元分析法对区域水资源安全进行评价,从水资源总体安全、水资源社会安全、水资源经济安全、水资源生态安全四个方面建立评价指标体系,并以宿城区为例进行水资源安全评价,结果显示宿城区2012年水资源处于较安全状态。研究表明,物元分析法能够解决不同指标间不相容问题,采用物元分析法进行区域水资源安全评价是合理的、可行的。

**关键词:**物元分析法;水资源安全;评价指标体系;宿城区

**中图分类号:**TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1683(2014)05-0100-04

## Evaluation of regional water security based on matter element analysis

LIU Bang-gui, LIU Yong-qiang, WANG Hao, YAO Yue-ling

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The matter element analysis method was used to evaluate the security of regional water resources and to develop the evaluation index system from four aspects, including the overall security of water resources, the social security of water resources, the economic security of water resources, and the ecological security of water resources. The evaluation index system was applied to Sucheng District. The results showed that the water resources of Sucheng District were healthy in 2012. The matter element analysis method can solve the problem of incompatibility between different indicators, and it can provide reasonable and feasible evaluation of regional water security.

**Key words:** matter element analysis; water resources security; evaluation index system; Sucheng District

水资源是基础性的自然资源和战略性经济资源、社会资源,是经济社会可持续发展的重要基础。目前国际上通用的宏观衡量水资源压力的指标主要有两个<sup>[1]</sup>:一是区域人均水资源量,二是水资源开发利用程度。水资源压力指标虽然可以从宏观上反映一个流域水资源的丰裕/稀缺程度和开发利用程度,但却不能反映一个流域水资源实际满足社会需求(或水资源安全)的程度。而且,因为水资源安全是一个很综合的概念,如果只是用一两个指标难以反映其全部内容,所以有必要建立水资源安全评价指标体系。在以往的水资源安全评价研究中,往往侧重水资源总体安全,而涉及水资源社会、经济和生态安全研究较少。本文采用物元分析法,综合考虑上述四个层次水资源安全问题,并将其组成有序三元组来描述水资源安全的基本元,构建水资源安全评价指标体系,并以宿城区为例,采用物元分析法对其水资源安全进行评价。

## 1 水资源安全评价的物元分析法模型

物元分析法<sup>[2]</sup>由我国著名研究学者蔡文教授提出,其主要思想是将任一事物均用“事物、特征、量值”三个要素来描述,并组成有序三元组的基本元,并分析研究这些物元及其变化规律。

### 1.1 确定待评价物元

水资源安全  $N$ 、水资源安全特征  $C$  和特征量值  $X$  共同组成水资源安全物元。假设水资源安全  $N$  有多个特征,并以  $n$  个特征相应的量值  $C_1, C_2, \dots, C_n$  和相应的量值  $X_1, X_2, \dots, X_n$  来描述,则水资源安全物元可以表示为

$$R = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2014-02-21 修回日期:2014-04-16 网络出版时间:2014-08-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.05.023.html>

基金项目:水利部2009年公益性基金资助项目(200901084)

作者简介:刘邦贵(1987-),男,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事水利水电建设与管理方面的工作。E-mail:1148795922@qq.com

通讯作者:刘永强(1970-),男,甘肃定西人,副教授,博士,主要从事水利水电工程建设技术与项目管理方面的研究工作。E-mail:ljc2002@hhu.edu.cn

式中:  $R$  为  $n$  维水资源安全物元, 记为  $R=(N, C, X)$ 。

### 1.2 经典域与节域物元

水资源安全的经典域物元  $R_j$  可表示为

$$R_j(N_j, C, X_j) = \begin{pmatrix} N_j & C_1 & X_{j1} \\ & C_2 & X_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{jn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_j & C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & C_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $N_j (j=1, 2, \dots, m)$  为所划分水资源安全的  $j$  个评审状况等级;  $C_i (i=1, 2, \dots, n)$  为评价指标; 区间  $X_{ji} = [a_{ji}, b_{ji}]$  为对应评价等级  $j$  的量值范围—经典域。

水资源安全的节域物元  $R_p$  可表示为

$$R_p(N_p, C, X_p) = \begin{pmatrix} N_p & C_1 & X_{p1} \\ & C_2 & X_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_p & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:  $N_p$  为评价等级的全体;  $X_{pi} = [a_{pi}, b_{pi}]$  为节域物元  $R_p$  关于特征  $C_i$  所取的量值范围。  $P$  为水资源安全等级。

### 1.3 关联函数及关联度的确定

水资源安全指标关联度函数  $K_j(x_j)$  的计算公式为

$$K_j(x_j) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_j, X_{ji})}{|X_{ji}|} & x_i \in X_{ji} \\ \frac{\rho(x_j, X_{ji})}{\rho(x_i, X_{pi}) - \rho(x_i, X_{ji})} & x_i \notin X_{ji} \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\rho(x_i, X_{ji}) = \begin{cases} \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji}) & \\ \begin{cases} a_{ji} - x_i, & x_i \leq a_{ji} + b_{ji}/2 \\ x_i - b_{ji}, & x_i > a_{ji} + b_{ji}/2 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho(x_i, X_{pi}) = \begin{cases} \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) & \\ \begin{cases} a_{pi} - x_i, & x_i \leq a_{pi} + b_{pi}/2 \\ x_i - b_{pi}, & x_i > a_{pi} + b_{pi}/2 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\rho(x_i, X_{ji})$  为点  $x_i$  与有限区间  $X_{ji} [a_{ji}, b_{ji}]$  的距离;  $\rho(x_i, X_{pi})$  为点  $x_i$  与有限区间  $X_{pi} [a_{pi}, b_{pi}]$  的距离;  $x_i, X_{ji}, X_{pi}$  分别为待评价水资源安全物元的量值、经典域物元的量值范围和节域物元的量值范围,  $|X_{ji}| = |a_{ji} - b_{ji}|$ 。

### 1.4 确定待评估单元对于各等级 $j$ 的综合关联度

待评估对象  $P_0$  关于等级  $j$  的综合关联度  $K_j(P_0)$  为

$$K_j(P_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j(x_i) \quad (7)$$

式中:  $\omega_i$  为第  $i$  项特征值的权重。

### 1.5 待评单元 $P_0$ 的等级评定

若  $K_j = \max\{K_j(P_0)\} (j=1, 2, \dots, m)$ , 则  $P_0$  的等级为第  $j$  级。当  $0 < K_j(P_0) < 1$  时, 表示评估单元符合标准对象的要求; 当  $-1 < K_j(P_0) < 0$  时, 表示评估单元不符合某级评估标准的要求, 但是具备转化为标准对象的条件, 其值越小, 越易转化; 当  $K_j(P_0) < -1$  时, 表示评估单元不符合某级评估标准的要求, 而且又不具备转化为标准对象的条件。

## 2 水资源安全评价指标体系的构建及评价经典域的确定

### 2.1 水资源安全评价指标体系的构建

水资源安全包括水资源社会安全、水资源经济安全和水资源生态安全等几个层面, 因此, 水资源安全的度量指标体系, 也应该包括反映长远的水资源社会安全、水资源经济安全和水资源生态安全和综合评价等几个方面的指标<sup>[3-5]</sup>。据此, 本研究构建的评价指标体系见表 1。

表 1 水资源安全评价指标体系

Tab. 1 The evaluation index system of water resources security

目标	因素	指标
A 水资源安全	B1 水资源总体安全	C1 总需水满足率(%)
		C2 人均占有水量/( $m^3 \cdot a^{-1}$ )
		C3 人均耗水量与人均水资源量之比(%)
	B2 水资源社会安全	C4 城镇人均每天用水量/L
		C5 农村人均每天用水量/L
		C6 家庭水费支出占家庭可支配收入比例(%)
	B3 水资源经济安全	C7 灌溉用水达到农业灌溉用水标准的灌溉面积占总灌溉面积的比重(%)
		C8 居民生活用水水费支出系数(%)
	B4 水资源生态安全	C9 生态需水满足程度(%)
		C10 植被覆盖率(%)
		C11 水资源开发利用率(%)

### 2.2 水资源安全评价经典域、节域的选定

经典域的确定是物元分析法评价的基础。本文依据水资源安全评价的可拓性, 将其划分为四个等级, 即  $N_{01}, N_{02}, N_{03}, N_{04}$ , 定性描述为: 安全  $\rightarrow$  较安全  $\rightarrow$  次安全  $\rightarrow$  病危。评价经典域的评价主要参考全国平均水平、江苏省平均水平、国际通行指标以及部分学者所著论文<sup>[6-15]</sup>。据此建立的水资源安全评价经典域物元矩阵  $R_{01}, R_{02}, R_{03}, R_{04}$  和节域物元矩阵  $R_p$  分别见表 2。

表 2 基于物元分析法的水资源安全评价评判标准

Tab. 2 Water resources security evaluation criteria based on matter element analysis

评价指标	单位	安全( $R_{01}$ )	较安全( $R_{02}$ )	次安全( $R_{03}$ )	病危( $R_{04}$ )	$R_p$
C1	%	90~100	80~90	65~80	0~65	0~100
C2	$m^3/a$	1 670~10 000	1 000~1 670	500~1 000	0~500	0~10 000
C3	%	94~100	84~94	60~84	0~60	0~100
C4	L	211~300	166~211	130~166	0~130	0~300
C5	L	105~150	85~105	65~85	0~65	0~150
C6	%	0~1	1~2	2~2.5	2.5~5	0~5
C7	%	0~5	5~30	30~50	50~100	0~100
C8	%	0~0.67	0.67~1.27	1.27~2.56	2.56~5	0~5
C9	%	90~100	80~90	60~80	0~60	0~100
C10	%	75~100	50~75	25~50	0~25	0~100
C11	%	0~20	20~40	40~60	60~100	0~100

### 3 实例

#### 3.1 研究区域介绍

宿城区位于江苏省北部,东经 118°10'07"–118°33'88"、北纬 33°47'25"–34°1'16"之间。北靠骆马湖,南临洪泽湖,东至中运河,西至徐洪河,四周环水。区域总面积 854.72 km<sup>2</sup>,其中耕地面积 63.77 万亩。改革开放以来,宿城区的人口急剧增加,工业发展速度也迅速增长。目前,宿城区大部分河流水质均达不到饮用水的标准,日益增长的物质经济对水资源的需求和紧缺的水资源形成了巨大的矛盾。南水北调工程实施后,周边河湖均被划为水源地,限制污水排入,而本地区没有污水出路,造成区内河道污染加重。近些年,宿城区启动了区域水资源保护规划工程,区域一些重要河流的水质状况得到了明显的改善。

#### 3.2 数据来源

本文采用物元分析法,对宿城区 2012 年的水资源安全进行评价,数据主要来自《宿城区统计年鉴》(2012)、《宿城区十二五规划》、《宿迁市宿城区水利现代化规划报批稿》。

#### 3.3 宿城区水资源安全评价经典域、节域和待评物元

(1)确定宿城区水资源安全评价等级、经典域和节域。

根据 2.2 节内容以及 2012 年宿城区的各项指标的具体量值,水资源安全待评物元矩阵  $R_{2012}$  为

$$R_{2012} = \begin{bmatrix} N_{2012} & C_1 & 92.1 \\ & C_2 & 649.9 \\ & C_3 & 93 \\ & C_4 & 220 \\ & C_5 & 110 \\ & C_6 & 2.2 \\ & C_7 & 41 \\ & C_8 & 1.03 \\ & C_9 & 83 \\ & C_{10} & 60 \\ & C_{11} & 66.7 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(2)确定权值。

在综合评价中,被评价单元是一个  $n$  维物元,其各特征值对物元的影响作用各不相同,应根据各特征的作用大小分别给予不同的权重。现根据个指标因素贡献率计算方法求各因素的权值

$$\omega_i = \frac{\mu_i \sqrt{S_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_i \sqrt{S_i}} \quad (9)$$

$$\bar{S}_i = \frac{\sum_{j=1}^4 S_{ij}}{4} \quad (10)$$

式中: $\omega_i$  为第  $i$  种因素的权值; $\mu_i$  为第  $i$  中因素的实测值; $\bar{S}_i$  为第  $i$  种因素各级标准的平均值; $n$  为因素的总个数。由式(9)、式(10)计算各指标的权重,结果见表 3。

表 3 各指标权值

Tab. 3 The weights of all indexes

指标	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$\omega_7$	$\omega_8$	$\omega_9$	$\omega_{10}$	$\omega_{11}$
权值	0.111	0.020	0.111	0.110	0.109	0.085	0.089	0.044	0.102	0.197	0.022

#### 3.4 结果与分析

将待评物元输入为物元模型,得出相应的计算结果。

将  $C_i (i=1\sim 11)$  代入式(4)–式(6)即可得到各指标对应各评价等级的关联度,结果见表 4。

表 4 宿城区 2012 年水资源安全指标关联度

Tab. 4 The water resources security index correlation degree of Sucheng District in 2012

关联度	$R_{01}$	$R_{02}$	$R_{03}$	$R_{04}$	等级
$K_j(x_1)$	0.210	-0.210	-0.605	-0.774	安全
$K_j(x_2)$	-0.611	-0.350	0.300	-0.187	次安全
$K_j(x_3)$	-0.130	0.100	-0.573	-0.831	较安全
$K_j(x_4)$	0.101	-0.101	-0.403	-0.529	安全
$K_j(x_5)$	0.111	-0.111	-0.385	-0.529	安全
$K_j(x_6)$	-0.353	-0.083	0.400	-0.120	次安全
$K_j(x_7)$	-0.468	-0.212	0.550	-0.180	次安全
$K_j(x_8)$	-0.259	0.600	-0.189	-0.598	较安全
$K_j(x_9)$	-0.292	0.300	-0.150	-0.575	较安全
$K_j(x_{10})$	-0.273	0.600	-0.200	-0.467	较安全
$K_j(x_{11})$	-0.584	-0.445	-0.168	0.168	病危

根据式(7)结合表 3 与表 4 计算综合关联度,得出待评估单元对于各等级的综合关联度结果见表 5。由  $K_j = \max\{K_j(P_0)\}$  和表 5 可知  $K_j = 0.097$ ,参考对应的等级标准,2012 年宿城区水资源安全级别为“较安全”。

表 5 待评估单元对于各等级的综合关联度

Tab. 5 Comprehensive correlation degrees of grades to be assessed

关联度	安全 ( $R_{01}$ )	较安全 ( $R_{02}$ )	次安全 ( $R_{03}$ )	病危 ( $R_{04}$ )	等级
$K_j(P_0)$	-0.159	0.097	-0.195	-0.497	较安全

### 4 结语

本文利用物元分析法,将水资源安全物元、水资源安全特征和特征量值作为物元,建立了水资源安全评价的物元评判模型。根据宿城区实际状况得到模型的经典域、节域、权重、关联度,对宿城区水资源安全进行评价,结果显示整体处于较为理想状态,但是从表 4 可以看到,该水资源经济安全和水资源生态安全较整体安全稍显得差一些,因此下一阶段宿城区政府对于水资源安全的保护工作应该重点体现在经济和生态方面。

本研究作为一种研究方法的探讨,将物元分析法运用在水资源安全评价中,取得了较为准确的结论,但是由于水资源安全涉及的评价指标较多,因此在选择方面尚不能全部纳入考虑范围,所以,评价指标的选择、量值范围的界定等问题还需进一步讨论和研究。

参考文献(References):

[1] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 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, 21(6): 538-545. (JIA Shao-feng, ZHANG Jun-yan, ZHANG Shi-feng. Regional water resources stress and water resources security appraisalment indicators[J]. PROGRESS IN GEOGRAPHY, 2002, 21(6): 538-545. (in Chinese))
- [2] 方国华, 黄显峰. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (FANG Guo-hua, HUANG Xian-feng. Multi-objective decision-making theory [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [3] 常福宣, 张洲英, 陈进, 等. 长江流域河道生态环境需水满足程度研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(9): 1-5. (CHANG Fu-xuan, ZHANG Zhou-ying, CHEN Jin, et al. Study on satisfactory ratio of environmental water demand of river channels in Yangtze river basin[J]. Yangtze River Scientific Research Institut, 2009, 26(9): 1-5. (in Chinese))
- [4] 唐德善. 宿城区水资源规划[Z]. 江苏: 宿迁市宿城区水利规划设计局, 2013. (TANG De-shan. Water resource planning of Sucheng District[Z]. Jiangsu: Sucheng District of Suqian Water conservancy planning Design Bureau, 2013. (in Chinese))
- [5] 何格, 唐德善. 基于改进物元可拓模型的水资源配置方案评价[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 24-26, 138. (HE Ge, TANG Deshan. Water resources allocation schemes evaluation based on improved matter-element model[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(12): 24-26, 138. (in Chinese))
- [6] 杨文慧. 河流安全的理论构架与诊断体系的研究[D]. 河海大学: 水利水电工程学院, 2007. (YANG Wen-hui. Study on theoretical framework and diagnosis system of river health[D]. Hohai University: College of water conservancy and Hydropower Engineering, 2007. (in Chinese))
- [7] 李兴德. 小流域生态需水及安全评价研究[D]. 山东农业大学: 水利土木工程学院, 2012. (LI Xing-de. Study of ecological water requirement and assessment of ecosystem health in small river basin [D]. Shandong Agricultural University: college of science and engineering civil engineering, 2012. (in Chinese))
- [8] 蔡文. 物元模型及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 25-28. (CAI Wen. Matter Element Model and Application[M]. Beijing: Science Press, 1994: 25-28. (in Chinese))
- [9] 柳长顺, 陈献, 刘昌明, 等. 华北地区城镇居民水费支出占收入与消费的比例研究[J]. 水利经济, 2005, 23(2): 27-32, 66. (LIU Chang-shun, CHEN Xian, LIU Chang-ming, et al. On the percentage of water charges to disposable income and living expenditure in North China [J]. Water Conservancy Economy, 2005, 23(2): 27-32, 66. (in Chinese))
- [10] 贾国宁, 黄平. 基于支付能力与支付意愿的居民生活用水水价承受能力研究——以广州市番禺区为例[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3): 547-555. (JIA Guo-ning, HUANG Ping. Affordability of domestic water price based on ability and willingness to pay——A case study of Panyu District of Guangzhou [J]. CHINA Environmental Science, 2012, 32(3): 547-555. (in Chinese))
- [11] 苗慧英, 聂建中, 李素丽. 农业用水水价承受能力分析[J]. 南北水调与水利科技, 2004, 2(3): 42-44. (MIAO Hui-ying, NIE Jian-zhong, LI Su-li. Bearing capacity to agricultural water Fee [J]. South To North Water Transfers AND Water Science AND Technology, 2004, 2(3): 42-43. (in Chinese))
- [12] 秦福兴, 耿雷华, 陈晓燕. 确定万元 GDP 取水量定额方法的探索[J]. 水利学报, 2004, 35(8): 0119-0122. (QIN Fu-xing, GENG Lei-hua, CHEN Xiao-yan. Investigation on method for determining water withdrawal quota per ten thousand Yuan GDP [J]. Journal OF Hydraulic Engineering, 2004, 35(8): 0119-0122. (in Chinese))
- [13] 左其亭. 人均生活用水量预测的区间 S 型模型[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 351-354. (ZUO Qi-ting. Interval S-model for forecasting per capita domestic water consumption [J]. Journal OF Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 351-354. (in Chinese))
- [14] 朱慧峰, 秦复兴, 吴耀民, 等. 上海市万元 GDP 用水量指标体系的建立[J]. 中国给水排水, 2003, 19(7): 36-37. (ZHU Hui-feng, QIN Fu-xin, WU Yao-min, et al. The establishment of the water consumption index system per ten thousand Yuan GDP [J]. CHINA WATER & WASTEWATER, 2003, 19(7): 36-37. (in Chinese))
- [15] 黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 316-322. (Huang Hui-ling, Luo Wen-bin, Wu Ci-fang, et al. Evaluation of land eco-security based on matter element analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 316-322. (in Chinese))

(上接第 95 页)

- and preliminary assessment of its trend [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 467-476. (in Chinese))
- [29] 王春鹤, 张保林, 刘福涛. 大、小兴安岭多年冻土退化规律及利弊的初步分析[J]. 冰川冻土, 1996, 18(Special Issue): 252-258. (WANG Chun-he, ZHANG Bao-lin, LIU Fu-tao. A preliminary analysis on the regularity of permafrost degradation, its advantages and disadvantages in the greater and Lesser Xing'an Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Special Issue): 252-258. (in Chinese))
- [30] 何瑞霞, 金会军, 吕兰芝, 等. 东北北部冻土退化与寒区生态环境变化[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 525-531. (HE Rui-xia, JIN Hui-jun, LV Lan-zhi, et al. Recent changes of permafrost and cold regions environments in the Northern Part of Northeastern China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 525-531. (in Chinese))
- [31] 魏智, 金会军, 张建明, 等. 气候变化条件下东北地区多年冻土变化预测[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 74-84. (WEI Zhi, JIN Hui-jun, ZHANG Jian-ming, et al. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under a changing climate [J]. Science China: Earth Science, 2011, 41(1): 74-84. (in Chinese))