

非线性 FCA 模型在流域水资源冲突风险评价中的应用

胡庆和¹ 施国庆¹ 黄涛珍¹ 刘卫林²

(1. 河海大学公共管理学院, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 : 介绍模糊矩阵合成算子的性质及其在评价中的实际意义。建立了流域水资源冲突风险评价的指标体系。在改进层次分析法的基础上 , 用非线性模糊综合评价模型对资水流域水资源冲突风险进行了评价。评价结果表明 , 所建模型对于涉及水量、水质、生态与体制等多因子的流域水资源冲突风险评价具有良好的适用性 , 可反映不同指标对评价结果的突出影响 , 弥补了线性加权模糊综合评价模型的不足 , 使评价结果更可靠。该模型可在不同流域不同时期和不同条件下的水资源冲突风险综合评价中推广应用。

关键词 流域水资源 ; 水资源冲突风险 ; 非线性模型 ; 模糊综合评价 ; 层次分析法

中图分类号 : TV213.4 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-764X(2007)02-0006-04

Application of nonlinear FCA model to risk evaluation of conflicts of river basin water resources // HU Qing-he¹, SHI Guo-qing¹, HUANG Tao-zhen¹, LIU Wei-lin² (1. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The property of fuzzy matrix composite operator and its practical meaning in assessment were introduced, and a risk evaluation index system for the conflicts of river basin water resources was established. Based on the improved analytic hierarchy process, the risk of water resources conflicts of Zishui river basin was evaluated by use of the nonlinear fuzzy comprehensive evaluation model. The result shows that the given model is suitable for risk evaluation of the river basin water resources related to the factors of water quantity, water quality, ecology, management system, etc., and it can reflect the great effect of different indexes on the evaluation result, make up for the deficiency of the linear weighted fuzzy comprehensive assessment model, and improve the reliability of the evaluation. Therefore, it can be widely applied to comprehensive risk evaluation of water resources of different river basins at different stages under different conditions.

Key words : river basin water resources; water resources conflict risk; nonlinearity model; fuzzy comprehensive evaluation; analytic hierarchy method

流域水资源冲突涉及很多方面 , 许多学者进行过研究^[1-4]。但这些研究只侧重于冲突的某一方面 , 对整个流域水资源冲突风险大小的评价目前还鲜见研究成果。流域水资源冲突风险评价是流域水资源冲突管理的基础 , 对于指导流域水资源管理实践具有重要意义。影响流域水资源冲突风险大小的因素较多 , 层次较为复杂 , 要对其进行比较客观的评价 , 需要将定性指标量化 , 将定量的数据进行模糊处理。模糊综合评价 (FCA) 模型可以将不确定信息用定量的方法表示出来 , 再借助于模糊运算得到的综合评判矩阵得出评判对象的评判等级以及其隶属于各个等级的程度^[5]。因此 , 可以采用 FCA 模型来评价流域水资源的冲突风险 , 但该模型仍是一种线性的加权评价方法 , 它存在一大缺陷 , 即无法反映某些评价

指标所具有的突出影响^[6]。评价的本质应是人的智能活动 , 而人脑的思维过程多是非线性的 , 因此一般来讲它具有非线性特征^[7]。大量的评价实践证明 , 评价工作的不确定性导致了评价的非线性 , 非线性的评价模型能更好地符合评价的实际^[8-9]。基于此 , 本文用非线性 FCA 模型结合改进层次分析法对流域水资源的冲突风险进行评价。

1 非线性模糊矩阵合成算子

模糊综合评价模型为

$$B = A \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} =$$

$$(b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (1)$$

在式(1)中定义模糊矩阵合成算子,首先定义指标突出影响程度系数向量 Λ ,记 $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 其中 $\lambda_i \geq 1$ 。指标 u_i 对评价结果所具有的突出影响程度越大则 λ_i 也就越大,当指标 u_i 不具有突出影响时,则取 λ_i 为 1。为简便起见可将 λ_i 取为大于或等于 1 的整数。令

$$\lambda = \max\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (2)$$

在模糊综合评价模型中定义非线性模糊矩阵合成算子形式为

$$f(a_1, a_2, \dots, a_n; x_1, x_2, \dots, x_n; \Lambda) = (a_1 x_1^{\lambda_1} + a_2 x_2^{\lambda_2} + \dots + a_n x_n^{\lambda_n})^{1/\lambda} \quad (3)$$

$\lambda_i \geq 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 记 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 其中 $a_i > 0$ 且 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$; $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 这里 $x_i \geq 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。由于在模糊综合评价中通常有隶属度 $r_{ij} \in [0, 1]$,故在应用此算子进行模糊矩阵合成时,必须先对评价对象的隶属度矩阵作变换,将隶属度的值变换为大于 1 的数,如可取 $r_{ij}' = a^{r_{ij}}$ (a 为大于 1 的常数)。

引入非线性模糊矩阵合成算子符合评价的实际要求,具体表现在以下几个方面(其数学证明详见文献[6]):

- 当各指标的突出影响程度不同时,即使所有指标的评价值相同,其评价结果也应有所不同。
- 当一个评价对象的所有评价指标值均高于另外一个评价对象时,则前者的评价结果高于后者。
- 评价对象的各种评价指标值的增大可使最终的评价指标值增大,且这种增大是连续而平稳的。
- 指标的突出影响程度越大,该指标值对评价结果的影响就会越强烈。

由于非线性模糊矩阵合成算子具有以上性质,因此,它既可以保留全部的评价信息,又可以弥补线性加权方法的不足,更具有评价优势。

2 利用改进的层次分析法确定权系数

AHP(analytic hierarchy process)模型以模糊聚类分析和模式识别为理论基础,是对非定量事件做定量分析的一种简便方法。但传统的 AHP 法往往面临难以选定标度的困难和较为繁琐的一致性检验,因此,本文采用改进的 AHP 法来确定权系数,该方法只选择 3 个标度 -1, 0, 1, 同时采用自调节方式建立比较矩阵,通过最优传递矩阵,将比较矩阵转化为一致性判断矩阵,此过程不需要进行一致性检验[10]。

设某一评价体系有 B_i 个准则层($i = 1, 2, \dots, t$),每一准则层有不同的指标。设某一准则层有 n 个指标 $G_1, G_2, \dots, G_n$,其相应的权重分别为 $W_{G_1}, W_{G_2}, \dots, W_{G_n}$ 且 $W_{G_1} + W_{G_2} + \dots + W_{G_n} = 1$ 。为构造判断矩阵,对每个准则层 B_i 通过相应指标两两比较,用三标度法建立比较矩阵。在准则层 B_i 下,指标 G_j 比指标 G_k 重要,则 $c_{ijk} = 1$;指标 G_j 与指标 G_k 同样重要,则 $c_{ijk} = 0$;指标 G_j 没有指标 G_k 重要,则 $c_{ijk} = -1$ 。

$$C_i = \begin{bmatrix} G_1/G_1 & \dots & G_1/G_n \\ G_n/G_1 & \dots & G_n/G_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{bmatrix} = (c_{jk})_{n \times n} \quad (4)$$

标度矩阵 C_i 除了表示各指标间的重要性关系外,还可通过数学换算求出在准则层 B_i 下各指标的重要程度,其步骤如下:

- 求出 C_i 的最优传递矩阵 O_i :

$$O_i = \begin{bmatrix} o_{11} & \dots & o_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ o_{n1} & \dots & o_{nn} \end{bmatrix} = (o_{jk})_{n \times n} \quad (5)$$

$$o_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_{ji} + c_{ik}) \quad (6)$$

- 把矩阵 O_i 转化为一致性矩阵 D_i , D_i 也称为在准则层 B_i 下的判断矩阵:

$$D_i = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} = (d_{jk})_{n \times n} \quad (7)$$

$$d_{jk} = e^{o_{jk}} \quad (8)$$

- 求 D_i 的特征向量 W_i 。

用方根法求得特征向量 $W_i = (w_{1i}, w_{2i}, \dots, w_{ni})^T$,所得 W_i 即可作为在准则层 B_i 下各指标的权重。同样可以计算出各准则层相对于评价目标的权重,最后通过线性相乘再进行归一化处理,就可以得到各指标对于评价目标 O 的组合权向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。

3 应用实例

3.1 流域概况

资水流域约位于北纬 $26^\circ \sim 29^\circ$ 、东经 $110^\circ \sim 112^\circ$ 范围内,流域面积 $28\,142\text{ km}^2$,其中湖南省境内面积占总面积的 95.4% ,人口 $1\,050$ 万。干流全长 653 km ,流域内河长 5 km 以上的大小支流共有 821 条,流域平均宽度 45 km ,成狭带状。流域内多

年平均湿度为 78% ~ 80.9% ,多年平均降水量为 1452.2 mm ,多年平均流量为 759 m³/s。

3.2 流域水资源冲突风险评价指标体系的构建

3.2.1 构建原则

流域水资源冲突风险的综合评价是对水量、水质、生态与体制等多个因素众多要素的度量与评价 ,因而是一个多目标、多层次的判别过程 ,必须借助一套科学、综合的指标体系进行综合评价。为使构建的指标体系既能体现评价目标的主体本质特征 ,又不失模型设计和数据收集的现实可行性 ,在选取参评因子时应考虑以下原则^[11]:①科学性原则 ;②完备性原则 ;③现实可行性原则 ;④多层次性原则 ;⑤相对独立性原则 ;⑥定量指标与定性指标相结合等。

假设影响流域水资源冲突的因子有 N 个 ,构成集合 Ω 。由此 Ω 中选择出 m 个因子构成流域水资源冲突风险综合评价的指标体系 Δ_{IDS} :

$$\Delta_{\text{IDS}} = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m\} \quad (\Delta_{\text{IDS}} \subset \Omega)$$

根据流域水资源的冲突状况 , Δ_{IDS} 的构成可以存在不同的层次和不同的复杂度。

3.2.2 指标选取与量化

根据指标选取原则 ,采用以下 4 个因子来反映流域水资源的冲突状况 ,即

$$\Delta_{\text{IDS}} = \{\text{水量因子}, \text{水质因子}, \text{生态环境因子}, \text{管理体制因子}\}$$

其中 ,水量因子反映水资源总量、人均占有量、开发利用潜力 ,以及水资源与人口、耕地分布的协调状况 ;水质因子反映流域水环境质量状况以及水资源与经济协调状况 ;生态环境因子反映流域生态环境的可持续状况 ;管理体制因子反映流域取水、用水、排水的规则 ,规则制定的完善程度直接影响流域水资源冲突的广度和深度 ,因为围绕水量、水质和生态保护的各种利益冲突可能会在各种规模的地域存在^[12] ,但利益各方都争夺水资源 ,而又无权威的管理和执行机构或相应的法律、法规统一方案时 ,即会产生冲突^[13]。选择以上 4 个一级因子(准则层) ,在每个一级因子下又设立若干个二级因素(指标层)来评价流域水资源冲突 ,具体指标体系见表 1。在表 1 中评价因素集为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_{15}\}$;评语等级论域 $V = \{V_1, V_2, V_3\}$, V_1, V_2, V_3 分别代表流域水资源冲突风险发

生程度的低、中、高。参考相关文献^[14-15]以及综合专家判断 ,确定指标分级见表 2。

表 1 流域水资源冲突风险评价指标

流域水资源 冲突 风险	水量 B_1	水资源利用率 U_1	23.13%
		耕地灌溉率 U_2	56.26%
		人均供水量 U_3	474.6 m ³
		水资源开发利用程度 U_4	14.5%
		饮用水安全人口比例 U_5	75.11%
	水质 B_2	水质综合达标率 U_6	90.9%
		土地面污染率 U_7	0
		水污染综合指数 U_8	8.87%
		污径比 U_9	1.69%
	生态环境 B_3	生态环境用水率 U_{10}	0.52%
		地下水超采率 U_{11}	0
	管理体制 B_4	机构设置的合理性 U_{12}	6
		初始水权的明晰度 U_{13}	5.38
		组织运行的规范性 U_{14}	4.75
		法律法规的健全性 U_{15}	3.88

表 1 中 ,指标 $U_1 \sim U_{11}$ 为定量指标 ,在实际计算中可以根据流域的相关资料得出 ;指标 $U_{12} \sim U_{15}$ 为定性指标 ,可通过调查的方法来获得。可在问卷调查中设计很好、较好、一般、较差、很差 5 个等级 ,供专家评价时选择 ,为便于量化 ,可分别对这 5 个等级赋予 9 分、7 分、5 分、3 分、1 分的分值。当专家所选项对应分值的均值大于 7 和小于 3 时 ,认为水资源冲突风险分别为低和高 ,介于二者之间时为中度风险。

3.3 评判矩阵的计算

根据以上分析 ,评价因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_{15}\}$ 对应着评语集 $V = \{V_1, V_2, V_3\}$, r_{ij} 表示因素 U_i 的评价对等级 V_j 的隶属度 ,其值的推求可根据各评价因素的实际数值(见表 1 最后一列)对照各因素的分级指标 ,通过隶属度函数的公式计算来获得 ,具体计算方法见文献^[14]。

通过计算 ,可以得到资水流域水资源冲突风险的评判矩阵为^①

$$R = \begin{bmatrix} 0.422 & 0.000 & \dots & 0.000 & 0.000 \\ 0.578 & 0.594 & \dots & 0.938 & 0.720 \\ 0.000 & 0.407 & \dots & 0.063 & 0.280 \end{bmatrix}^T$$

3.4 评价因子权重集的确定

根据式(4)~(8)可以求得准则层 B_i ($i = 1, 2, 3, 4$)下各指标的权重 W_i ($i = 1, 2, 3, 4$)以及准则层相对于评价目标的权重 ,最终得到各指标对于评价目标 O 的归一化组合权向量

$$A = (0.037 \ 0.074 \ 0.111 \ 0.043 \ 0.164 \ 0.032 \ ,$$

表 2 流域水资源冲突风险评价分级值

风险分级	各评价指标分级值														
	$U_1/\%$	$U_2/\%$	U_3/m^3	$U_4/\%$	$U_5/\%$	$U_6/\%$	$U_7/\%$	$U_8/\%$	$U_9/\%$	$U_{10}/\%$	$U_{11}/\%$	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}
低 风 险	< 20	< 20	> 3000	< 30	> 90	> 85	< 1	< 15	< 5	> 5	< 5	> 7	> 7	> 7	> 7
中度风险	20 ~ 60	20 ~ 60	1000 ~ 3000	30 ~ 70	70 ~ 90	75 ~ 85	1 ~ 5	15 ~ 30	5 ~ 10	2 ~ 5	5 ~ 20	3 ~ 7	3 ~ 7	3 ~ 7	3 ~ 7
高 风 险	> 60	> 60	< 1000	> 70	< 70	< 75	> 5	> 30	> 10	< 2	> 20	< 3	< 3	< 3	< 3

①该矩阵较长 ,此处省去了中间的 11 列数据 ,感兴趣者请与作者联系。

0.032 0.048 0.032 0.107 0.107 0.064 ,
0.043 0.043 0.064)

3.5 非线性模糊综合评判

将指标 $U_1 \sim U_{15}$ 按可能引发冲突的严重程度重新分类,令各指标的突出影响系数为 $\lambda_i = \lambda^{(k)} \omega'$,通常取为整数, $\lambda^{(k)}$ 为指标所属类别的突出影响程度(k 为类别数), ω' 可用各指标的组合权重近似代替,根据专家判断,以 U_3, U_5, U_8, U_{13} 为第 1 类, U_1, U_4, U_{10}, U_{15} 为第 2 类,其他指标为第 3 类, $\lambda^{(1)}, \lambda^{(2)}, \lambda^{(3)}$ 分别取 10, 8, 5。结合组合权重可以得到不同指标的突出影响系数(取整数) $\lambda_i = (2, 2, 7, 2, 10, 1, 1, 3, 1, 5, 3, 2, 3, 1, 3)$, 由式(2)和 $\lambda = 10$ 。取变换 $r'_{ij} = e^{r_{ij}}$ 处理原始模糊关系矩阵,结合式(1)与式(3)对资水流域水资源冲突风险进行评价。

$$B = A \cdot R' = (1.070, 1.424, 1.219)$$

根据最大隶属度法,可判定该流域水资源冲突风险的等级为中等。从调查的情况来看,该流域人均供水量偏低,生态环境用水量不到 1%,饮用水不安全人口的比例偏高,水权界定不明晰,与流域水资源管理相关的法律法规不健全,这些指标是影响该流域水资源冲突风险大小的主要因素。本文所采用的非线性模糊矩阵合成算子反映了这些指标的突出影响,弥补了线性加权模糊综合评价模型的不足,使评价结果更为可靠,符合流域的实际情况。

4 结论与政策建议

a. 本文介绍了模糊矩阵合成算子的性质及其在水资源冲突风险评价中的实际意义,建立了流域水资源冲突风险评价指标体系,在改进层次分析法的基础上,用非线性模糊综合评价模型对资水流域水资源冲突风险进行了评价,从实例分析的结果来看,所建模型对于涉及水量、水质、生态与体制等多因子的流域水资源冲突风险评价具有良好的适用性,可在不同流域不同时期和不同条件下的水资源冲突风险综合评价中推广应用。

b. 评价指标的选择对水资源冲突风险等级的评价结果有重要影响,由于是初次尝试,本文所建的指标体系难免还存在一些缺陷和不足,在实际应用中可根据流域水资源冲突的实际情况和评价指标的选择原则来进行筛选,或者通过对所研究流域的实际调查或专家咨询方式来获得。

c. 对于本文所研究流域而言,要避免水资源冲突风险的升级,应注意以下几点:①注重生态环境保护,力争到 2010 年使流域生态用水达到 3% 左右;②饮水安全是引发水资源冲突的主要影响因素,因

此,政府和水利主管部门仍需加大饮水解困工程的投资力度;③资水流域的水资源开发利用程度只有 15.4%,应适当加大水资源的开发力度,但该流域人口众多,人均水量并不充裕,预计到 2010 年,流域人口将达到 1 120 万,因此,在强调扩大开发规模的同时更应该重视对水资源的深度开发,尽快实现由广度开发向深度开发的转变,由耗水型经济结构向节水型经济结构的转变;④要明晰水权,完善流域水资源的法律法规,加强流域规划、管理与决策中公众参与的力度,必要时可以建立流域管理局,以便从制度上减少流域水资源的冲突风险。

参考文献:

- [1] NORIO. Hypergame analysis of the lake Biwa conflict [J]. Water Research, 1985, 21(7): 917-926.
- [2] BIELSA J, DUARTE R. An economic model for water allocation in north eastern Spain [J]. Water Resources Development, 2001, 17(3): 397-410.
- [3] TISDELL J G, HARRISON S R. Estimating an optimal distribution of water entitlements [J]. Water Resources Research, 1992, 28(12): 3111-3117.
- [4] 杨志峰,冯彦,王焯,等.流域水资源可持续利用保障体系——理论与实践[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [5] 杨则英,曲建波,黄承道.基于模糊综合评判和层次分析法的桥梁安全性评估[J].天津大学学报,2005,38(12): 1063-1066.
- [6] 张晓慧,冯英浚.一种非线性模糊综合评价模型[J].系统工程理论与实践,2005(10): 54-59.
- [7] 侯定丕,王战军.非线性评估的理论探索与应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2001: 10-12.
- [8] BEE-HUA G. Evaluating the performance of combining neural networks and genetic algorithms to forecast construction demand: the case of the singapore residential sector [J]. Construction Management and Economics, 2000, 18(2): 209-217.
- [9] HU Bao-gang, MANN G K I, GOSINE R G. Control curve design for nonlinear (or fuzzy) proportional actions using spline-based function [J]. Automatica, 1998, 34(9): 1125-1133.
- [10] 张丽霞,施国庆.物元模型在城市化综合评价中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2004,33(3): 249-253.
- [11] 陈锐,王俭,汪云林,等.克里雅河流域 PRED 系统的可持续发展实证研究[J].系统工程理论与实践,2005(12): 11-14.
- [12] KRAMER A, CARIUS A, DABELKO G D. Managing water conflict: promoting water cooperation [J]. World Environment, 2005(5): 48-57.
- [13] SANDRA P. Dividing the water: food security, ecosystem health, and the new politics of scarcity [M]. Washington D. C.: World Watch Institute, 1996: 35-45.
- [14] 高彦春,刘昌明.区域水资源开发利用的阈限分析[J].水利学报,1997(8): 73-78.
- [15] 王友贞.区域水资源承载力评价研究[D].南京:河海大学,2005.

(收稿日期: 2006-05-18 编辑: 高建群)