

DOI:CNKI:61-1390/S. 20110907. 1100. 020

网络出版时间:2011-09-07 11:00

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20110907.1100.020.html>

基于模糊物元的多属性水文预报组合决策方法

申 海^{1,2}, 解建仓¹, 李建勋¹

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 2 西安外国语大学 基础教学部, 陕西 西安 710128)

[摘 要] **【目的】**建立合理的多属性水文预报组合决策方法, 为提高水文预报的精度提供参考。**【方法】**根据水文预报的特点, 提取了水文预报中的 4 个决策属性指标, 利用主观权重和熵权结合的方法确定属性指标的综合权重。将模糊物元理论和信息熵引入水文预报研究领域, 利用模糊物元理论处理水文预报中的模糊信息, 然后结合信息熵对属性进行集结, 按照集结后方案的相对贴近度进行择优排序, 建立了基于模糊物元的多属性水文预报组合决策方法。**【结果】**应用该组合决策方法对断面各时间点的预报模型进行择优, 得到了断面在某一时间段与实测值更为接近的预报值。实例计算结果表明, 该组合预报方法能够择优得到各方案预报值相对误差较小的最优值, 有效地提高了水文预报精度, 将预报结果至少提升了 1 个等级。**【结论】**所构建的基于模糊物元的多属性水文预报组合决策方法, 具有较强的合理性及较广的适用性, 为水文预报精度的提高提供了一条有效途径。

[关键词] 水文预报; 预报模型; 组合决策; 模糊物元

[中图分类号] N941; P338

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)11-0209-07

Hydrological forecasting decision combination based on multi-attribute fuzzy matter-element

SHEN Hai^{1,2}, XIE Jian-cang¹, LI Jian-xun¹

(1 Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 Department of General Studies, Xi'an International Studies University, Xi'an, Shaanxi 710128, China)

Abstract: **【Objective】**The study was to establish a reasonable decision combination for multiple attribute hydrological forecasting, so as to provide important decision basis to improve forecast accuracy. **【Method】**The study described the extraction of its attributes of hydrological forecasting. Synthesis weight was determined by subjective weight of experts and entropy weight. The fuzzy matter-element and comentropy were introduced into hydrological forecasting research field, and the fuzzy matter-element theory was used to deal with fuzzy information of hydrological forecasting, and the effective aggregation of attribute made use of comentropy. The scheme's preferred order according to the relative closeness, hydrological forecasting decision combination based on multi-attribute fuzzy matter-element was established. **【Result】**This study used the combined method to pick the best hydrological forecasting model of the same section in different time points. We obtained the forecasting with measured time period much closer to the prediction value. The results showed that the combine method can forecast optimal value of the small relative error for merit-based scheme. It could improve the accuracy of forecasting results effectively, and improve the level of forecasting value. **【Conclusion】**The hydrological forecasting decision combination based on multi-attribute

* [收稿日期] 2011-04-11

[基金项目] 国家高技术研究发展计划(863)项目“面向水利信息化的高性能计算与网格应用”(2006AA01A126); 国家自然科学基金项目“面向防汛抗旱会商的综合集成平台及知识服务模式研究”(50979088)

[作者简介] 申 海(1978—), 男, 陕西西安人, 讲师, 在职博士, 主要从事智能决策系统、GIS、计算机应用与水利信息化研究。
E-mail: hai0709@sina.com

fuzzy matter-element had strong rationality and applicability. An effective way was provided to improve forecast accuracy of hydrological forecasting.

Key words: hydrological forecasting; forecast model; decision combination; fuzzy matter-element

水文预报是根据已知信息对未来一段时期内水文要素的状态进行定性和定量的预测^[1],是水库洪水调度决策的重要依据。水文预报方法以水文基本规律、水文模型研究为基础,结合生产实际问题的需要,构成具体的预报方法或预报方案,服务于生产实际。近几年来对水文预报的研究取得了一定的成果,夏军^[2]基于时间序列和灰色系统理论的关联分析思想,提出了灰关联模式识别预报方法,并将其应用于年月径流预报和灾变预测;谢新民等^[3]将人工神经网络技术应用于河川径流实时预报系统,建立了河川径流实时预报的 BP 网络模型;赵永龙等^[4]将相空间小波网络模型用于金沙江屏山站日流量汛期长期预报,并与其他方法进行对比,初步表明该模型在实际应用中是可行的。但现有的这些研究成果主要集中在如何选择适合的模型来增长预见期和提高精度上,而水文预报是一个复杂的非线性不确定性过程,受到水文、气象、自然、生态环境等多方面因素影响^[5-7],这些因素始终制约着预报结果的准确性,如果仅仅使用一种决策模型对预报方案进行择优,往往难以得到符合实际的决策预报方案。同时,水文预报具有一定的不完全性和不精确性,模糊信息广泛存在于水文预报决策之中。利用模糊物元理论将可拓学中的物元概念与模糊集理论相结合,可以解决水文预报中存在的模糊性问题,寻找提高水文预报精确度的规律和方法。在水文预报中,评价指标的属性值是一种信息的载体,信息熵的引入能够有效地评价指标的属性值和确定方案的相对重要性。为此,本研究针对水文预报决策需提高预报精度的要求,结合模糊物元理论与信息熵的概念,将模糊物元理论引入水文预报决策中,采用多种决策预报模型组合对同一断面进行多属性预报决策,并对多个预报方案进行组合,建立更加接近真实测量值的预报方案,以期提高水文预报的准确性和可操作性。

1 决策属性的组合提取

由于决策信息的不确定性和不完全性,模糊集理论被广泛用于水文预报决策^[8]。Gau 等^[9]提出的 Vague 集理论,在处理不确定信息时,比模糊集有更强和更灵活的表现能力,所含的信息也较模糊集更加丰富。物元是可拓学的基本概念,是用形式化模型研

究拓展的可能性和开拓创新的规律和方法^[10]。本研究将可拓学中的物元思想引入模糊决策过程中,以期充分利用水文预报的“预报正确率”、“确定性系数”、“合格区间”、“发生可能性”4 个预报特征指标中的信息进行组合预报,提高预报的客观性和合理性。

定义 1: 设 U 是一个非空集合,其元素用 x 表示。 U 上的 1 个 Vague 集 A 是指 U 上的 1 对隶属函数 t_A 和 f_A ,即 $t_A:U \rightarrow [0,1], f_A:U \rightarrow [0,1]$ 。满足 $t_A(x) + f_A(x) \leq 1$,且 $0 \leq t_A(x) \leq 1, 0 \leq f_A(x) \leq 1$ 。其中 t_A 和 f_A 分别称为 Vague 集的真、假隶属函数。那么,称 $\pi_A(x) = 1 - t_A(x) - f_A(x)$ 为元素 x 相对 Vague 集 A 的不确定程度。当 $x \in U$,称闭区间 $[t_A(x), 1 - f_A(x)]$ 为 Vague 集 A 在点 x 的 Vague 值。

定义 2: 设 Vague 值 $x = [t_x, 1 - f_x], 0 \leq t_x \leq 1 - f_x \leq 1$ 。若 $t_x = 1, f_x = 0$,即 $x = [1, 1]$,则称 x 为 Vague 单位元;若 $t_x = 0, f_x = 1$,即 $x = [0, 0]$,则称 x 为 Vague 零元。

定义 3: 物元是由事物、特征及事物特征的量值组成的三元组,即 $R = (\text{名称}, \text{特征}, \text{量值}) = (N, C, V)$,其中事物 N 有 n 个特征 $C = c_1, c_2, \dots, c_n$ 。若特征的取值 v_j 为 Vague 值 $[a_j, b_j], j = 1, 2, \dots, n$,则称 R 为 n 维 Vague 物元。若 m 个事物的 n 维 Vague 物元组合在一起,则称为 m 事物的 n 维复合 Vague 物元。

Vague 集记分函数是方案对属性的合适程度^[11]。文献[11]对 Vague 集的记分函数进行了讨论,但未将犹豫度对排序的影响考虑在记分函数之中,故本研究采用如下记分函数:

$$\begin{aligned} O(A_i) &= (t_A - f_A)(1 + \pi_A), t_A - f_A = k (-1 \leq k \leq 1); \\ O(A_i) &= (t_A + f_A)(1 + \pi_A), t_A - f_A \neq k (-1 \leq k \leq 1). \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $O(A_i)$ 为方案集 A_i 的记分函数值, π_A 表示元素在 Vague 集 A 上的不确定程度, $i = 1, 2, \dots, m$, 其中 m 为方案的个数。记分函数值 $O(A_i)$ 越大,则方案越能满足决策需求。

从以上定义可知, Vague 集在处理不确定和模糊性决策时具有很强的表现力,而用于水文预报的决策属性也具有相同的特性^[12]。传统的水文预报多属性决策是根据属性偏好对现有的决策方案进行择优的决策方法,是通过决策方案属性值,建立决策

矩阵,通过对属性权重的分析与计算,得到规范化的标准矩阵 $\mathbf{P}$,实现对方案集的优劣评估。对于多个水文预报结果来说,其决策属性主要是和预报效果相关联的一组属性数据,依据水文预报的相似性理论,可以使用各预报模型的预报特性和近期预报效果来指导当前预报^[13]。

在水文预报组合决策中,主要是对同一计算时段 τ 的多个预报结果进行择优,利用计算出的属性权值和决策方法建立预报模型之间的序关系,最后将择优结果加以组合,形成组合预报模型。为叙述方便,在预报系统 S 中,设一个有限的预报模型集为 $C = \{c_i | i \in N\}$,其中, c_i 表示第 i 个预报模型,共计 n 个预报方案; $V^0 = \{v_i^0 | i \in N\}$ 为预报结果集, v_i^0 为 t^0 时刻 c_i 模型的预报结果,并令 z^0 为 t^0 时刻的实测数据,预报属性集为 $Q = \{q_i | i \in M\}$ 。定义预报模型的决策集为 $D = \{d_i | i \in H\}$,其中 d_i 表示第 i 个决策者,决策者由 $t \leq t^0$ 且与时刻 t^0 紧邻的观测点位 $\{t^0 - h\tau, t^0 - (h-1)\tau, \dots, t^0 - \tau\}$ 来承担,其中, h 为设置的流量观测点的个数, τ 为各预报模型的间隔最小观测时段或间隔计算时段。各模型的决策属性则可由与预报效果相关的统计量来承担,其主要分为效用型、成本型、序关系型。水文预报中的 4 个特征指标可分别表示为精确数、区间数属性值类型。

(1) 预报正确率。在预报系统 S 中,预报模型 c_i 的正确率 Correct_{c_i} 是指在观测点位选择 c_i 进行预报时,正确的次数与总体预报次数之间的比值,即 $\text{Correct}_{c_i} = \sum_{j=1}^h \text{sign}(\min(|v_i^0 - j\tau - z^0 - j\tau|) - |v_i^0 - j\tau - z^0 - j\tau|) / h$,其中, $\text{sign}(x)$ 为阶跃函数,在 $x \geq 0$ 时取值 1, $x < 0$ 时取值 0。预报正确率是一种权重未知的效用型属性值,无量纲,对应的效用值向量为 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$,其中 $u_i = \text{Correct}_{c_i}$ 是实数型数值,并且满足 $u_i \geq 0, \sum_{i=1}^n u_i \leq 1$,效用值 u_i 越大则对应的预报方案 c_i 越优。在决策矩阵中对预报正确率进行规范化,从而得到预报正确率属性值,即: $\phi_{ij} = a_{ij} / \max_i(a_{ij}), i \in N, j \in P_1$,其中 P_1 为决策矩阵中预报正确率属性的下标集。

(2) 确定性系数。确定性系数 DC 反映的是预报值与实测值之间的吻合程度。但由于确定性系数是对已发生预报的评价,如果使用 DC 来对未发生的水文预报进行评价势必会误导预报模型的选择,引起择优过程发散。因此要对 DC 进行模糊化处理,采用序数值方式进行描述,以避免系统根据历史

预报精度而直接确定预报模型。DC 是一种权重未知的属性值,其定义为 $\text{DC}_{c_i} = 1 - \sum_{j=1}^h (v_i^0 - j\tau - z^0 - j\tau)^2 / \sum_{j=1}^h (z^0 - j\tau - \bar{z})^2$ 。对 DC 排序后所得的序关系值向量为 $\text{Order}_{\text{DC}} = (o_1, o_2, \dots, o_n)^T$,其值越大,则所选择的预报模型越优。由于 DC 不可公度,可利用规范化对其属性进行提取,即: $\phi_{ij} = (a_{ij} - \min_j a_{ij}) / (\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}), i \in N, j \in P_2$,其中 P_2 为决策矩阵中确定性系数属性的下标集。

(3) 合格区间。预报的合格程度用合格率 QR 来表述,预报的合格率定义为 $\text{QR}_{c_i} = \sum_{j=1}^h \text{sign}(|v_i^0 - j\tau - z^0 - j\tau| - \zeta) / m$, ζ 为预报许可误差值。QR 的确定是在预报许可误差下对合格预报的一个计数过程,该过程并不区分预报值与实测值之间的具体差异。经仿真试验后发现,合格率的概念过于粗糙而不利干决策分析,为此本研究以预报合格区间作为决策属性进行决策分析。若预报模型 c_i 的预报误差与实测值之间的比率为 $e_i = |c_i - z_i| / z_i$,则预报合格区间 QRI_{c_i} 为 e_i 的最小值和下四分位数所构成的区间 $[e_i^{\min}, e_i^{1/4}]$ 。预报合格区间是一种权重未知的区间型属性值,对其进行比较和规范化需要采用可能度来完成。设 $\tilde{x} = [x^L, x^R], \tilde{y} = [y^L, y^R]$ 为任意两区间数,称 $p(\tilde{x}, \tilde{y}) = \min\{\max[(x^R - y^L) / (x^R - x^L + y^R - y^L), 0], 1\}$ 为 $\tilde{x} \geq \tilde{y}$ 的可能度。对于给定的一组区间数 $\tilde{x}_i = [x_i^L, x_i^R], i \in N$,利用可能度公式进行两两比较,求得相应的可能度 $p(\tilde{x}, \tilde{y})$,简记为 $p_{ij}, i, j \in N$ 。对于水文预报来说,合格区间的序值越小,则预报精度越高,故取 $\mathbf{P} = (1 - p_{ij})_{n \times n}$ 建立可能度矩阵。该矩阵包含了所有预报模型合格区间相互比较的全部可能度信息,是一个模糊互判矩阵。利用 $\phi_{ij} = \frac{1}{n(n-1)} (\sum_{k=1}^n p_{ik} + \frac{n}{2} - 1), i \in N, j \in P_3$ 可得到决策矩阵的规范化排序向量 $\phi_{ij} = (\phi_{1j}, \phi_{2j}, \dots, \phi_{nj})^T, j \in P_3$,其中 P_3 为决策矩阵中合格区间属性的下标集。

(4) 发生可能性。水利防洪工程在设计时,一般都可以抵御几十年甚至百年一遇的洪水,因而预报值接近或超过历史实测最大值是一个小概率事件。令历史实测最大值为 $z_{\max}$,则可以采用 $\text{Possibility}_{c_i} = (v_i^0 - \tau - z_{\max}) / z_{\max}$ 作为发生可能性的评估值,该值越大则预报模型所给出预报值 v_i^0 的发生可能性越小。发生可能性为成本型,在预报中不必刻意地追求预防为主的思想,而对于预报结果

应考虑其所产生的间接成本。发生可能性的权重是未知的,择优前需要对其进行规范化处理,即: $\phi_{ij} = (\max_j a_{ij} - a_{ij}) / (\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}), i \in N, j \in P_4$,其中 P_4 为决策矩阵中发生可能性属性的下标集。

2 基于模糊物元的水文预报组合决策

利用上述决策属性进行的多属性决策优选,实际上就是对属性集结后的结果进行评估的过程。本研究利用 Vague 复合物元和 Vague 绝对理想物元对水文预报各属性进行集结,根据排序函数来确定各指标的熵权,通过德尔菲法确定主观权重^[14],然后综合主观权重和熵权来确定综合权重。利用各个决策方案的方案物元和理想物元的距离来确定各方案的相对贴近度,从而得到各方案的排序。择优后可得到预报时段的各时间点水文预报应采用的预报模型,通过平均即可得到各个时段的预报流量值。

2.1 Vague 复合物元

对未来某一时段的水文预报有 m 种模型,需要根据 n 个指标进行评价。可根据专家经验,对 m 种模型在此时段得到的预报值与真实值进行比较和评价。专家对 4 个决策属性的重要性按照语言变量来表示^[15],将专家意见转化为相应的 Vague 集,即有:

$$R_{mm} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \cdots & v_{m1} \\ v_{12} & v_{22} & \cdots & v_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{1n} & v_{2n} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a_{11}, b_{11}] & [a_{21}, b_{21}] & \cdots & [a_{m1}, b_{m1}] \\ [a_{12}, b_{12}] & [a_{22}, b_{22}] & \cdots & [a_{m2}, b_{m2}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [a_{1n}, b_{1n}] & [a_{2n}, b_{2n}] & \cdots & [a_{mn}, b_{mn}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: R_{mm} 为 m 种模型、 n 个指标的 Vague 复合物元; v_{ij} 表示第 i 个模型的第 j 个指标的量值,其值为 Vague 值 $[a_{ij}, b_{ij}]$, $i=1,2,\cdots,m; j=1,2,\cdots,n$ 。

2.2 指标权重值的确定

在预报系统中,预报正确率、确定性系数、合格区间、发生可能性 4 个属性的权重值是未知的,需要对其权重值加以确定。本研究在进行权重值确定时,采用了主观与客观相结合的定权方法。主观定权采用德尔菲法,注重专家的经验获取,而客观定权则采用熵值法,依据备选方案固有的信息加以确定。根据德尔菲法确定权重时,首先请专家选择一个最重要的指标,对其进行评分,记为 $r_j, r_j > 0$;然后利用其他指标与该指标进行比较,以确定其他指标的

分数,得到主观权重 $w_j = r_j / \sum_{j=1}^n r_j$ 。当方案属性值为 Vague 值时,可根据式(1)所述的记分函数将 Vague 复合物元转化为属性的适合度物元 S_{mn} ,即:

$$S_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: x_{mn} 为第 m 个方案的第 n 个指标特征值。

对 4 个决策属性指标进行标准化,当指标 j 为效用型时,有:

$$y_{ij} = (x_{ij} - x_j^{\min}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (4)$$

当指标 j 为成本型时,有:

$$y_{ij} = (x_j^{\max} - x_{ij}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (5)$$

式中: $x_j^{\max}$ 表示指标 j 在方案集中的最大值, $x_j^{\min}$ 表示指标 j 在方案集中的最小值。

用熵值法确定权重时,首先,就某一指标来说,不同方案在同一属性上的作用越接近,该属性的熵 $H(z_i)$ 就越大,即该指标对各方案的作用越不明显,故输出熵计算为:

$$E_j = H(z_i) / \ln m, H(z_i) = - \sum_{i=1}^m z_{ij} \ln z_{ij}, z_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (6)$$

式中: $H(z_i)$ 为信息熵, y_{ij} 为规范化后的指标值, m 为决策方案数。

根据计算出的输出熵 E_j ,可确定指标之间的差异度 $G_j, G_j = 1 - E_j$ 。

最后,熵权 α_j 由各指标之间的差异度来决定,可定义为: $\alpha_j = G_j / \sum_{j=1}^n G_j$ 。

综合主观权重 w_j 和熵权 α_j ,可得到各指标的权重 $\theta_j, \theta_j = w_j \alpha_j / \sum_{j=1}^n w_j \alpha_j$ 。

2.3 方案择优

在计算出各个指标的权重后,可以通过各方案物元 Vague 值的相似度,分别计算与正理想方案和负理想方案的相对距离,即各物元方案的相似度距离。然后,根据计算出的相似度距离确定各个方案的相对贴近度,具体方法如下。

(1)根据 Vague 集的定义,当指标为效用型指标时,正理想方案为 Vague 单位元,负理想方案为 Vague 零元;当指标为成本型指标时,正理想方案为 Vague 零元,负理想方案为 Vague 单位元。

(2)利用 Vague 值的相似度量式计算方案物元与正负理想物元的距离^[16]:

$$d^+ = \sum_{j=1}^n w_j M_z(R_{nm}, V^+),$$
$$d^- = \sum_{j=1}^n w_j M_z(R_{nm}, V^-)。$$

(10)

式中: d^+ 为方案物元与正理想物元之间的距离, d^- 为方案物元与负理想物元之间的距离, V^+ 为正理想方案物元, V^- 为负理想方案物元。

$$M_z(x, y) = 1 - |t_x - t_y - (f_x - f_y)| / 8 - |t_x - t_y + f_x - f_y| / 4 - |t_x - t_y| + |f_x - f_y| / 8。$$

(11)

式中: $M_z(x, y)$ 为 2 个物元方案之间的相似度, $M_z(x, y)$ 越大,则 Vague 值中 x 和 y 的相似度越高。

(3)得到方案物元与正负理想物元的距离后,再计算物元方案与理想方案的相对贴进度,贴进度的值越大,表明方案距正理想方案越近,同时距负理想方案越远,则方案越优。相对贴进度的计算公式为:

$$\sigma(N_i) = d_i^+ / (d_i^+ + d_i^-)。$$

(12)

(4)对集结后的方案进行排序择优。

(5)择优后可得当前时间点的最优模型,当要预测的是任意 2 个相邻时间点之间的时间段时,可将这 2 个时间点的最优模型的预测值进行平均,即可得到当前时间段的预测值。

3 实例分析

为了验证本研究介绍方法的有效性和可行性,

表 1 水文预报 4 个特征指标的属性决策矩阵

Table 1 Hydrological forecast of four characteristics of attribute index decision matrix

预报模型 Forecasting model	预报正确率/% Correct	确定性系数 DC	合格区间 QRI	发生可能性 Possibility
XAJ	82.55	0.855	[0.06,0.35]	−0.726 828 26
SAC	81.83	0.861	[0.15,0.42]	−0.691 160 87
TANK	84.29	0.773	[0.22,0.48]	−0.708 910 87
SCLS	63.30	0.880	[0.04,0.65]	−0.744 678 26

3.1 计算步骤

根据决策属性组合计算方法,对预报正确率、确定性系数、合格区间和发生可能性 4 个指标属性进行计算,得到属性规范化矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} 0.978 & 0.765 & 0.370 & 0.665 \\ 0.970 & 0.823 & 0.320 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.297 & 0.334 \\ 0.752 & 1.000 & 0.278 & 1.000 \end{bmatrix}。$$

归一化得:

$$R_{nm} = \begin{bmatrix} [0.90,0.95] & [0.75,0.80] & [0.90,0.95] & [0.70,0.85] \\ [0.80,0.90] & [0.85,0.95] & [0.80,0.90] & [0.00,0.00] \\ [1.00,1.00] & [0.00,0.00] & [0.70,0.85] & [0.60,0.80] \\ [0.75,0.85] & [0.90,0.95] & [0.60,0.80] & [0.90,0.95] \end{bmatrix}。$$

因为水文预报有一定的不确定性和模糊性,在

在某流域选定 A、B、C、D 4 个断面进行流量预报评定。预报时所采用的预报模型分别为新安江模型(XAJ)、萨克拉门托模型(SAC)、水箱模型(TANK)和综合约束线性系统模型(SCLS)。在采用单一模型进行预报时,各断面的确定性系数 DC 虽然都超过 0.750,但由于流域参数欠缺的原因,预报合格率 QR 均在 73.00% 以下,用 TANK 模型预报 B、C 断面的半年期合格率低于 57.00%,属于不合格预报。上述择优试验选取的是 2009 年 8 月份的洪水作为样本,洪水历时为[2009-08-15 08:00, 2009-10-12 08:00],设定流量观测位点 $h=40$ 个,各预报模型的最小间隔观测时间 $\tau=2$ h。

在 B 断面对[2010-05-22 12:00]时刻流量进行预报,新安江模型、萨克拉门托模型、水箱模型和综合约束线性系统模型 4 个模型预报的结果分别为 1.26,1.42,1.34 和 1.17 km³/s,实测值为 1.21 km³/s。本例的 4 个模型可以看作 4 个待评价方案,4 个方案要在不同的时间点进行择优选择。通过对时间点的择优可以得到某时间段流域断面的预报值。根据决策属性确定决策矩阵,如表 1 所示,此时 $n=4, m=4$ 。

$$Q = \begin{bmatrix} 0.489 & 0.385 & 0.184 & 0.335 \\ 0.485 & 0.413 & 0.165 & 0.000 \\ 0.500 & 0.000 & 0.148 & 0.166 \\ 0.368 & 0.501 & 0.138 & 0.500 \end{bmatrix}。$$

规范化矩阵 P 可看作是 4 个方案的 4 个决策属性所构造的矩阵,应用水文预报中的精度等级,引入专家的实际经验,根据文献[15]的方法,对 4 个方案模型在[2010-05-22 12:00]时刻的流量决策属性进行评价。将专家意见转化为相应的 Vague 集,得:

某一时刻采用的预报模型,不一定适合下一时刻。

所以,本研究在确定权重时,首先用专家主观赋权法(德尔菲法)来确定初始权值,专家可根据决策某时刻的具体情况,对 4 个决策属性的重要程度进行比较,确定最重要的一个属性并为其打分,将其他 3 个属性与这个最重要的属性进行比较,确定其各自的打分值。通过专家意见,确定评价指标的初始权重,根据 2.2 节所述方法计算各指标主观权重,得:

$\omega_0=\{0.261\ 54,0.246\ 15,0.276\ 92,0.215\ 39\}$ 。

根据熵权确定各属性的客观权重,利用式(1)Vague 集的记分函数,将复合物元 R_m 转化为属性的适合度物元 S_m 。由于属性指标均为效用型,利用式(4)将适合度物元标准化,得到 Y_{ij} ,即:

$$S_m=\begin{vmatrix} 0.893 & 0.578 & 0.893 & 0.633 \\ 0.770 & 0.880 & 0.770 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.633 & 0.480 \\ 0.660 & 0.892 & 0.480 & 0.893 \end{vmatrix},$$
$$Y_{ij}=\begin{vmatrix} 0.685 & 0.648 & 1.000 & 0.709 \\ 0.324 & 0.987 & 0.702 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.371 & 0.538 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & 1.000 \end{vmatrix}。$$

根据公式(6)~(8)计算熵权 α_j ,并结合主观熵权,利用公式(9)计算综合权重 $\theta_j=\{0.402,0.237,0.165,0.196\}$ 。由于 4 个决策属性指标均可视为效用型指标,则决策属性的绝对 Vague 正理想方案为 $([1,1],[1,1],[1,1],[1,1])$,绝对 Vague 负理想方案为 $([0,0],[0,0],[0,0],[0,0])$,于是根据公式(10)计算可得[2010-05-22 12:00]时刻,各方案(模型)物元到绝对 Vague 正负理想方案物元的距离和相对贴近度(表 2)。

根据贴近度的值越大,方案距正理想方案越近,同时距负理想方案越远,模型方案越优的原则,由表

2 可见,在[2010-05-22 12:00]时刻,4 个模型的排序为 $\sigma_{SCLS}>\sigma_{XAJ}>\sigma_{SAC}>\sigma_{TANK}$,说明择优模型为 SCLS 模型,此模型下的预测值为 $1.19\text{ km}^3/\text{s}$;在下一个预测时刻,即[2010-05-22 14:00],利用本研究所述方法,对此时刻 4 个预测模型进行排序,结果为 $\sigma_{XAJ}>\sigma_{SCLS}>\sigma_{SAC}>\sigma_{TANK}$,此时的择优模型为 XAJ 模型,此模型下的预测值为 $1.27\text{ km}^3/\text{s}$ 。因而 B 断面在[2010-05-22 12:00—14:00]时段的预报值应为 2 个时间点最优模型预测值的平均值,即 $1.23\text{ km}^3/\text{s}$ 。将此时间段内的流量预报值与平均实测值 $1.24\text{ km}^3/\text{s}$ 相比,相对误差为 0.81% ,而用 XAJ、SAC、TANK 和 SCLS 模型对同一断面在[2010-05-22 12:00—14:00]预测的相对误差分别为 5.15% , 16.42% , 10.45% 和 4.78% 。说明用组合预测模型较用单一预测模型的误差率更低、预测精度更高。

表 2 各模型相对贴近度的比较

Table 2 Comparison of the models' relative closeness

指标 Index	模型 Model			
	XAJ	SAC	TANK	SCLS
d^+	0.826 9	0.816 9	0.810 5	0.892 1
d^-	0.602 7	0.604 7	0.612 7	0.637 2
$\sigma(N_i)$	0.578 4	0.574 6	0.569 5	0.583 3

3.2 组合预测决策方法的应用

为了说明本研究的组合预测决策方法对时段流量进行预报决策的适用性,选取 B 断面在[2010-08-14 00:00,2010-08-17 00:00]时间段对预报模型进行组合择优分析。在该时段内分别采用 XAJ、SAC、TANK 和 SCLS 模型对断面时段进行单一预报,得到的合格率(QR)和确定性系数(DC)与采用基于模糊物元预报组合决策方法(EFCM)得到的合格率(QR)和确定性系数(DC)如表 3 所示。

表 3 预测模型的断面预报精度比较

Table 3 Comparison of section forecasting accuracy of prediction model

模型 Model	合格率/% QR	确定性系数 DC	预报评定等级 Forecast grade
XAJ	73.86	0.857	乙级 Second division
SAC	67.60	0.842	丙级 Third division
TANK	56.75	0.768	不合格 Below standard
SCLS	64.86	0.811	丙级 Third division
EFCM	87.48	0.919	甲级 First division

从表 3 可知,利用单一预报模型对 B 断面进行预报所得到的合格率(QR)和确定性系数(DC)均小于本研究提出的基于模糊物元预报组合决策方法(EFCM)所得到的结果。根据水文预报的精度要求^[17],XAJ、SAC、TANK 和 SCLS 模型的预报精度分别被评定为乙级、丙级、不合格和丙级;而利用本

研究提出的组合 EFCM 模型进行预报得到的评定等级为甲级,较 XAJ 模型预报精度至少提高了 1 个等级,较其他 3 个模型则提高了 2 个等级以上。

另外,为了检验组合模型进行多次预报的有效性,本研究还对 B、C、D、E 4 个断面近 3 年的水文资料进行了 10 000 次预报组合,结果显示,EFCM 组

合模型预报的确定性系数均达 0.900 以上,且预报合格率均超过 83.00%,组合模型的预报精度较采用 4 个单一预报模型至少高出 1 个等级。

4 结 论

本研究根据水文预报的特点,提取了水文预报的预报正确率、确定性系数、合格区间、发生可能性 4 个基本属性指标,利用熵权和模糊物元理论,提出了基于模糊物元的多属性水文预报组合决策方法,为水文预报中的多模型择优和预报时段的断面流量获取提供了一套解决方案,该方法能够避免水文预报中采取单一预报模型时,预报精度无法满足预报要求的不足。同时,该方法还引入了专家主观决策与熵权客观决策相结合的组合决策方法,提高了决策中预报模型选择的柔性,具有一定的可操作性。实例计算表明,基于模糊物元的多属性水文预报组合决策方法能够进一步提高水文预报的精度,为多属性水文预报提供了组合预测的新思路。

【参考文献】

- [1] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考 [J]. 水科学进展, 2010, 19(7): 437-441.
Zhang J Y. Review and reflection on China's hydrological forecasting techniques [J]. Advances in Water Sciences, 2010, 19(7): 437-441. (in Chinese)
- [2] 夏 军. 中长期径流预报的一种灰关联模式识别与预测方法 [J]. 水科学进展, 1993, 4(3): 190-197.
Xia J. A grey correlative analysis and patter recognition applied to mid-long term runoff forecasting [J]. Advances in Water Sciences, 1993, 4(3): 190-197. (in Chinese)
- [3] 谢新民, 蒋云中, 石玉波, 等. 基于人工神经网络的河川径流实时预报研究 [J]. 水利水电技术, 1999, 30(9): 1-4.
Xie X M, Jiang Y Z, Shi Y B, et al. Real-time forecasting of stream flow base on artificial neural networks [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 1999, 30(9): 1-4. (in Chinese)
- [4] 赵永龙, 丁 晶, 邓育仁. 相空间小波网络模型及其在水文中长期预测中的应用 [J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 252-257.
Zhao Y L, Ding J, Deng Y R. Wave network model of phase space and its application in hydrologic prediction [J]. Advances in Water Sciences, 1998, 9(3): 252-257. (in Chinese)
- [5] 王富强, 霍凤霖. 中长期水文预报方法研究综述 [J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 25-27.
Wang F Q, Huo F L. Research on method of middle and long term hydrology forecasts [J]. Yellow River, 2010, 32(3): 25-27. (in Chinese)
- [6] Habets F, Etchevers P, Golaz C, et al. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin [J]. Journal of

- Geophysical Research, 1999, 104(24): 31145-31172.
- [7] 莫崇勋, 刘方贵, 孙桂凯. 水库汛期模糊划分及其分期汛限水位的确定 [J]. 水力发电, 2009(8): 13-15.
Mo C X, Liu F G, Sun G K. Fuzzy division of flood season and the determination of its flood control water level of reservoir [J]. Water Power, 2009(8): 13-15. (in Chinese)
- [8] Sivakumar B. Forecasting monthly stream flow dynamics in the western United States: A nonlinear dynamical approach [J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(8): 721-728.
- [9] Gau W L, Buehrer D J. Vague sets [J]. IEEE Transaction on Systems Man Cybernetics, 1993, 23(2): 610-614.
- [10] 杨春燕. 可拓学的重要科学问题及其关键点 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1087-1090.
Yang C Y. The important scientific problems and their key points on extenics [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 1087-1090. (in Chinese)
- [11] 周晓光, 张 强, 胡望斌. 基于 Vague 集的 TOPSIS 方法及应用 [J]. 系统工程理论方法应用, 2005, 14(2): 537-541.
Zhou X G, Zhang Q, Hu W B. Research on TOPSIS methods based on vague set theory [J]. Systems Engineering Theory Methodology Application, 2005, 14(2): 537-541. (in Chinese)
- [12] 赵然杭. 基于 Vague-Fuzzy 理论的城市水安全承载力评价研究 [J]. 水力发电学报, 2010, 2(1): 90-94.
Zhao R H. Evaluation on the bearing capacity and urban water security by on vague fuzzy theory [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 2(1): 90-94. (in Chinese)
- [13] 万树平. 直觉模糊多属性决策方法综述 [J]. 控制与决策, 2010, 25(11): 1601-1604.
Wan S P. Survey on intuitionist fuzzy multi-attribute decision making approach [J]. Control and Decision, 2010, 25(11): 1601-1604. (in Chinese)
- [14] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 15-86.
Xu Z S. Method and application of uncertain multi-attribute decision [J]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 15-86. (in Chinese)
- [15] 徐泽水. 基于语言标度中术语指标的多属性群决策法 [J]. 系统工程学报, 2005, 20(1): 84-88.
Xu Z S. A multi-attribute group decision making method based on term indices linguistic evaluation scales [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2005, 20(1): 84-88. (in Chinese)
- [16] 周晓光, 高学东, 武 森. 基于理想解的 Vague 集的物元决策方法及应用 [J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 123-127.
Zhou X G, Gao X D, Wu S. Method and application of vague matter-element decision making based on ides solution [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 123-127. (in Chinese)
- [17] 包为民. 水文预报 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2009.
Bao W M. Hydrologic forecast [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)