文章编号: 1006-4710(2012)01-0056-06

# 直觉模糊集的水库洪水调度多属性组合决策方法及应用

申海[1,2], 解建仓[1], 罗军刚[1], 李维乾[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:** 针对水库洪水调度决策中"模糊概念"难于处理,决策中没有充分考虑不确定的犹豫度和最优权重确定具有片面性的问题,提出了基于直觉模糊集的犹豫度加权组合方法。通过解线性规划问题和设置确定性系数得到属性的组合最优权重。利用直觉模糊集充分表达了决策中的犹豫度信息,进而根据组合模型计算相对贴近度对方案进行排序。实验数据证明该组合模型通过调整确定性系数,可以对不同时期的水库洪水进行有效和合理的调度决策。

**关键词:** 直觉模糊集;组合决策;犹豫度指数;线性规划模型

**中图分类号:** TP18,N945 **文献标志码:** A

## Multiple Attribute Decision Making Combination Method and Application of Intuition Fuzzy Set Reservoir Flood Dispatching

SHEN Hai[1,2], XIE Jiancang[1], LUO Jungang[1], LI Weiqian[1]

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

**Abstract:** With an aim at hard handling of "fuzzy conception" in reservoir flood dispatching making-decision and at the problems without fully considering uncertainty hesitance degree in decision-making and with one-sidedness in the optimization weighted determination, this paper suggests the hesitance degree weighted combination method: the optimal weight combination of attributes can be obtained thought solving linear programming and setting certainty coefficients; the intuition fuzzy set is used to fully express the hesitance degree information in decision-making, whereby the scheduling scheme is ranked in terms of calculating relative closeness degree by the combination method. The experiment dates indicate that the combination method can make the effective and rational scheduling decision of reservoir floods in different periods via regulating certainty coefficients.

**Key words:** intuitionistic fuzzy; combination decision; hesitate factor; linear programming model

水库洪水调度的多属性决策问题普遍存在于水利决策领域,是近年来洪水调度决策研究的热点之一[1]。在实际调度中调度方案的择优受到诸多不确定性因素的影响。为了更好地处理水库洪水调度中的不确定信息,陈守煜[2]将模糊理论应用于水库洪水调度中,提出了基于模糊集的洪水调度决策支持理论,但研究中没有充分考虑决策中不确定的犹豫度,使得最优权重的确定具有一定的片面性。同时,决策算法在应用于多属性决策问题时只是在多个备选方案中选择一种,决策者无法对已选出的方案进行带有偏好的修正。直觉模糊集与模糊集相比增加了一个新的属性参数-非隶属度函数,是对模糊集的一次扩展[3-4]。直觉模糊集同时考虑隶属度和非隶属度两方面的信息,在处理不确定信息时比模糊集有更强、更灵活的表达能力,能更加细腻地刻画现实世界的模糊性本质,适合水库洪水调度决策问

**收稿日期:** 2011-10-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51109175);公益性行业科研专项基金资助项目(201001011)。

**作者简介:** 申海(1978-),男,陕西西安人,博士生,研究方向为智能决策系统、GIS、计算机应用及水电信息化。E-mail: hai0709@sina.com。解建仓(1963-),男,陕西西安人,教授,博导,研究方向为水利信息化、GIS及智能决策系统。E-mail: jcxie@mail.xaut.edu.cn。

题，有巨大的应用前景[5]。

本研究针对目前水库洪水调度中存在的上述问题，提出了一种基于直觉模糊集的多属性组合决策方法。通过建立犹豫度指数加权组合模型，充分考虑犹豫度指数信息，通过调整确定性系数得到了满足多属性决策条件的方案集，决策者可以根据决策经验对已选出的方案集进行带偏好的修正，使得决策算法的柔性更强，提高了多属性决策的科学性和合理性。

## 1 水库洪水调度多属性直觉模糊决策模型

在对汛期水库进行洪水调度时，洪水调度决策支持系统拟定满足决策条件的调度方案有 $n$ 种，每个方案有 $m$ 个属性，设 $\mu_{ij}$ 表示备选调度方案 $x_j$ 相对于任意模糊概念的隶属度，$\nu_{ij}$ 表示备选调度方案 $x_j$ 相对于同一模糊概念的非隶属度，定义不确定指数 $\pi_{ij}=1-\mu_{ij}-\nu_{ij}$ 表示决策者对模糊概念的犹豫度。显然，犹豫度 $\pi_{ij}$ 越大，决策者关于方案属性相对模糊概念的犹豫边界就越高。决策者可以通过调整犹豫度指数来提高和降低其估计值。决策者对方案的估计值是一个闭区间 $[\mu_{ij}^l,\mu_{ij}^u]=[\mu_{ij}^l,1-\nu_{ij}]$，其中 $0\leqslant\mu_{ij}^l\leqslant\mu_{ij}^u\leqslant 1$。通过计算犹豫度指数 $\pi_{ij}$，可以确定决策中属性权重的最大值或最小值。利用上述犹豫度指数可将属性的权重表示为一个闭区间 $[w_i^l,w_i^u]$，满足 $0\leqslant w_i^l\leqslant w_i^u\leqslant 1$。

定义1：在 $X$ 论域中的两个直觉模糊集分别为 $A$ 和 $B$，对于论域中的每一个备选决策方案 $x_j$，其最优广义值由式(1)确定，为：

$$\max\{z_j=\sum_{i=1}^{m}\beta_{ij}w_j\},(u_{ij}^l\leqslant\beta_{ij}\leqslant u_{ij}^u,$$
$$w_j^l\leqslant w_{ij}\leqslant w_j^u,i=1,2\cdots m;j=1,2,\cdots n)\quad(1)$$

定义2：若存在两个直觉模糊集 $A$ 和 $B$，其中 $A$ 表示为 $A=\{<x_j,\mu_A(x_j),\nu_A(x_j)>|x_j\in X\}$，$B$ 表示为 $B=\{<x_j,\mu_B(x_j),\nu_B(x_j)>|x_j\in X\}$，则 $A$ 和 $B$ 两个直觉模糊集的规范化海明距离[6]为：

$$D(A,B)=\frac{1}{2n}\sum_{j=1}^{n}(|\mu_A(x_j)-\mu_B(x_j)|+$$
$$|\nu_A(x_j)-\nu_B(x_j)|+|\pi_A(x_j)-\pi_B(x_j)|)\quad(2)$$

为了求解每个备选决策方案的最优广义值，将式(1)转化为(3)、(4)两个线性模型，即：

$$\min\{z_j^l=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^l w_i\},w_i^l\leqslant w_i\leqslant w_i^u,$$
$$i=1,2,\cdots m;\sum_{i=1}^{m}w_i=1\quad(3)$$
$$\max\{z_j^u=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^u w_i\},w_i^l\leqslant w_i\leqslant w_i^u,$$
$$i=1,2,\cdots m;\sum_{i=1}^{m}w_i=1\quad(4)$$

得到最优权重分别为：$\tilde{\boldsymbol{w}}=(w_1^j,w_2^j,\cdots,w_m^j)^{\mathrm{T}}$ 和 $\hat{\boldsymbol{w}}=(\hat{w}_1^j,\hat{w}_2^j,\cdots\hat{w}_m^j)$，$j=1,2,\cdots,m$。以此类推，对 $n$ 个洪水调度决策方案求解，必须求解 $2n$ 个线性模型。对于洪水调度的每一个决策方案 $x_j\in X$，最优广义值为一个区间值 $[z_j^l,z_j^u]$，其中：

$$z_j^l=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^l\tilde{\boldsymbol{w}}=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}\tilde{w}_i^j;\ z_j^u=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^u\hat{\boldsymbol{w}}=\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}\hat{w}_i^j$$

在实际洪水调度中鉴于专家思维表示的模糊性和洪水来水的不确定性，可将决策方案的最优广义值定义为直觉模糊集，即：

$$A^0=\{<x_j,z_j^{0l},1-z_j^{0u}>\}=$$
$$\{<x_j,\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}\tilde{\boldsymbol{w}},\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}\hat{\boldsymbol{w}}>\}\quad(5)$$

对于每一个决策方案 $x_j\in X$ 都可以通过公式(3)和公式(4)计算出方案的最优广义值。通常情况下鉴于模型的差异计算得到的最优广义值是不同的，即 $\tilde{\boldsymbol{w}}\neq\hat{\boldsymbol{w}}$。所以无法通过直接比较各方案的广义值来确定最优属性权重。为了确定最优属性权重 LI. D. F 利用犹豫度指数的加权平均最大化模型对方案的直觉模糊集进行集结[7]为：

$$\max\{z=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}(\mu_{ij}^u-\mu_{ij}^l)w_j\}\Leftrightarrow$$
$$\max\{z=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\pi_{ij}w_j\},$$
$$w_j^l\leqslant w_j\leqslant w_j^u,\sum_{i=1}^{m}w_i=1\quad(6)$$

通过求解犹豫度指数的加权平均最大化模型确定此模型下的最优权重为 $\boldsymbol{W}^0=(w_l^0,w_2^0,\cdots,w_m^0)^{\mathrm{T}}$，任意方案 $x_i\in X$ 的最优广义值是上限为 $z_j^{0u}$，下限为 $z_j^{0i}$ 的区间 $[z_j^{0l},z_i^{0u}]$，计算方法为：

$$z_j^{0l}=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}w_i^0=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}w_i^0,z_j^{0u}=$$
$$\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^u w_i^0=1-\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}w_i^0$$

将加权平均最大化模型下的最优广义值表示为直觉模糊集为：

$$A_j^0=\{<x_j,z_j^{0l},1-z_j^{0u}>\}=$$
$$\{<x_j,\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}w_i^0,\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}w_i^0>\}\quad(7)$$

部分学者根据犹豫度指数的加权平均最大化模型，提出了犹豫度指数的加权平均最小化模型，只需利用较少的犹豫度指数信息，就可得到比最大化模型更小的广义区间值，从而确定更为精确的直觉模糊集。

$$\min\{z=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}(\mu_{ij}^{u}-\mu_{ij}^{l})w_j\}\Leftrightarrow$$

$$\min\{z=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\pi_{ij}w_j\},$$

$$w_j^l\leqslant w_j\leqslant w_j^u,\sum_{i=1}^{m}w_i=1 \quad (8)$$

求解模型(8)得到加权平均最小化模型下的最优权重为 $\boldsymbol{W}^1=(w_1^1,w_2^1,\cdots,w_m^1)^{\mathrm{T}}$,任意方案 $x_i\in X$ 的广义值为区间 $[z_j^{1l},z_j^{1u}]$,其中 $z_j^{1l}=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}w_i^1$ 表示广义区间值的下限,$z_j^{1u}=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^{u}w_j^1=1-\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}w_i^1$ 表示广义区间值的上限。将加权平均最小化模型下的最优广义值表示为直觉模糊集为:

$$A_j^1=\{<x_j,z_j^{1l},1-z_j^{1u}>\}=$$
$$\{<x_j,\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}w_i^1,\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}w_i^1>\} \quad (9)$$

## 2 水库洪水调度多属性决策优化及组合

### 2.1 最优权重值的确定

对于水库洪水调度这一类多属性决策问题,属性初始权重的确定一般是由专家直接给出,具有直接、便于计算的优点,但同时也具有一定的盲目性。本研究利用加型一致性模型确定属性初始权重,使得专家确定初始权重时避免了盲目性和随意性。首先,根据加型一致性定义可知[8],当 $\boldsymbol{B}=(b_{ij})_{n\times n}$ 为直觉判断矩阵,$b_{ij}$ 为 $[\mu_{ij},1-\nu_{ij}]$,$i=1,2,\cdots m$, $j=1,2,\cdots,n$ 时存在向量 $\boldsymbol{w}=(w_1,w_2,\cdots w_n)^{\mathrm{T}}$, 使得 $\mu_{ij}\leqslant 0.5(w_i-w_j+1)\leqslant 1-\nu_{ij}$ 成立($w_j\geqslant 0,\sum_{j=1}^{n}w_j=1$)。由于直觉模糊矩阵的得分值 $\boldsymbol{S}=(s(r_{ij}))_{n\times m}$ 能够度量直觉模糊集的大小[9],所以将 $\mu_{ij}\leqslant 0.5(w_i-w_j+1)\leqslant 1-\nu_{ij}$ 转化为得分矩阵的表示形式,即:

$$\mu_{ij}\leqslant 0.5(\bar{s}(r_i)-\bar{s}(r_j)+1)\leqslant 1-\nu_{ij},$$
$$w_j\geqslant 0,\sum_{j=1}^{n}w_j=1 \quad (10)$$

$$\mu_{ij}\leqslant 0.5\left|\sum_{k=1}^{m}w_k(\bar{s}(r_{ik})-\bar{s}(r_{jk}))+1\right|\leqslant$$
$$1-\nu_{ij},i=1,2,\cdots,n-1;j=i+1,\cdots,n \quad (11)$$

其中 $s(r_{ij})$ 表示方案 $A_i$ 对属性 $C_j$ 关于模糊概念的隶属度 $\mu_{ij}$ 和非隶属度 $\nu_{ij}$ 之差,即 $s(r_{ij})=\nu_{ij}-\mu_{ij}$。$\bar{\boldsymbol{S}}=(\bar{s}(r_{ij}))_{n\times m}$ 表示规范化以后的得分矩阵,规范方法为:

$$\bar{s}(r_{ij})=[s(r_{ij})-\min_i[s(r_{ij})]]/[\max_i[s(r_{ij})]-$$
$$\min[s(r_{ij})]],i=1,2,\cdots n;j=1,2,\cdots,m \quad (12)$$

基于模型(11)和已知的权重不确定信息 $L$ 建立线性规划,计算得到的初始权重在区间范围 $[w_j^l,w_j^u]$ 内,可作为属性权重的初始值。

$$w_j^i=\min\boldsymbol{w}\times$$
$$0.5\left|\sum_{k=1}^{m}w_i(\bar{s}(r_{ik})-\bar{s}(r_{jk}))+1\right|\leqslant$$
$$1-\nu_{ij},i=1,2,\cdots,n-1;j=i+1,\cdots,n \quad (13)$$
$$0.5\left|\sum_{k=1}^{m}w_i(\bar{s}(r_{ik})-\bar{s}(r_{jk}))+1\right|\geqslant\mu_{ij} \quad (14)$$
$$\boldsymbol{w}=(w_1,w_2,\cdots,w_m)^{\mathrm{T}}\in\boldsymbol{L},w_i\geqslant 0,$$
$$i=1,2,\cdots,n,\sum_{i=1}^{n}w_i=1$$

$$w_j^u=\max\boldsymbol{w}$$
$$0.5\left|\sum_{k=1}^{m}w_i(\bar{s}(r_{ik})-\bar{s}(r_{jk}))+1\right|\geqslant$$
$$\mu_{ij},i=1,2,\cdots,n-1;j=i+1,\cdots,n \quad (15)$$
$$0.5\left|\sum_{k=1}^{m}w_i(\bar{s}(r_{ik})-\bar{s}(r_{jk}))+1\right|\leqslant 1-\nu_{ij} \quad (16)$$
$$\boldsymbol{w}=(w_1,w_2,\cdots,w_m)^{\mathrm{T}}\in\boldsymbol{L},w_i\geqslant 0,$$
$$i=1,2,\cdots,n,\sum_{i=1}^{n}w_i=1。$$

公式(13)~(16)确定了水库洪水调度决策各个属性的初始权重。文献[6]利用犹豫度指数的加权平均最大化模型对方案进行集结后可以对最优广义值进行比较,但最优权重向量区间比较大,无法满足洪水调度决策的要求。本研究对最优权重的确定方法进行改进,利用犹豫度加权组合得到新的最优属性权重,同时将专家意见通过参数引入决策模型中,可使集结后的决策模型更加适合水库洪水调度决策的实际环境。

对于得到的直觉模糊集 $A$,可令组合模型的最优权重为 $\boldsymbol{w}^*$,$\boldsymbol{w}^*$ 可通过犹豫度指数加权平均最大化模型和犹豫度指数加权平均最小化模型的组合加以确定,即 $\boldsymbol{w}^*=\alpha\boldsymbol{w}^0+\beta\boldsymbol{w}^1$,其中 $\alpha+\beta=1$,$\alpha$、$\beta$ 称为确定性系数,由决策专家通过个人经验给出。根据公式(6)和公式(8)可知:

$$\boldsymbol{w}^*=\alpha\boldsymbol{w}^0+\beta\boldsymbol{w}^1=$$
$$\alpha(w_1^0,w_2^0,\cdots,w_m^0)^{\mathrm{T}}+\beta(w_1^1,w_2^1,\cdots,w_m^1)^{\mathrm{T}}=$$
$$(\alpha w_1^0+\beta w_1^1,\cdots,\alpha w_m^0+\beta w_m^1)^{\mathrm{T}}=(w_1^*,w_2^*,\cdots,w_m^*)^{\mathrm{T}} \quad (17)$$

组合最优权重 $\boldsymbol{w}^*$ 确定的方案 $x_i\in X$ 的最优广义值的区间为 $[z_j^{*l},z_j^{*u}]$,其中 $z_j^{*l}=\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^{l}(\alpha w_i^0+\beta w_i^1)=\alpha z_j^{0l}+\beta z_j^{1l}$ 表示广义区间值的下限,$z_j^{*u}=$

$\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^{u}(\alpha w_i^0+\beta w_i^1)=1-\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}w_i^*=\alpha z_j^{0u}+\beta z_j^{1u}$ 表示广义区间值的上限。将犹豫度加权组合模型下的最优广义值表示为直觉模糊集，即：

$$A_j^*=\{<x_j,z_j^{*l},1-z_j^{*u}>\}=\{<x_j,\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}w_i^*,\sum_{i=1}^{m}\nu_{ij}w_i^*>\} \quad (18)$$

根据得到的最优广义值，利用相对贴近度[10]计算每个决策方案的方案值为[10]：

$$\psi_j=\frac{D(A_j^*,P)}{D(A_j^*,P)+D(A_j^*,Q)} \quad (19)$$

$P=\{<p,1,0>\}$ 表示正理想方案的直觉模糊集，$Q=\{<q,0,1>\}$ 表示负理想方案的直觉模糊集。$D(A_j^*,P)$ 则是组合模型下的最优广义值距离正理想方案的海明距离，$D(A_j^*,Q)$ 为组合模型下的最优广义值距离负理想方案的海明距离。

$$D(A_j^*,P)=\frac{1}{2}(|z_j^{*l}-0|+|1-z_j^{*u}-1|+|1-z_j^{*l}-(1-z_j^{*u})-0|)=z_j^{*u}$$

$$D(A_j^*,Q)=\frac{1}{2}(|z_j^{*l}-1|+|1-z_j^{*u}-0|+|1-z_j^{*l}-(1-z_j^{*u})|)=1-z_j^{*u} \quad (20)$$

$\psi_j$ 表示相对贴近度，本研究利用相对贴近度的大小对决策方案进行排序，得到各个方案的相对贴近度，根据从大到小的顺序排序择优，为：

$$\psi_j=\frac{z_j^{*u}}{1+z_j^{*u}-z_j^{*l}}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\mu_{ij}^{u}w_i^*}{1+\sum_{i=1}^{m}(\mu_{ij}^{u}-\mu_{ij}^{l})w_i^*} \quad (21)$$

### 2.2 组合择优算法

通过组合计算得到了 $n$ 个决策方案的最优广义值 $A_j^*$，利用各直觉模糊决策方案与正负直觉模糊理想集的距离，计算每一个方案相对于正负直觉模糊理想集的相对贴近度。根据相对贴近度的大小对方案进行排序。具体步骤为：

1）根据水库洪水调度决策的特点，提取水库决策方案的各个属性值，针对不同的属性值估计出相对于某一个模糊概念的估计区间值$[\mu_{ij}^{l},\mu_{ij}^{u}]$，得到直觉模糊矩阵。

2）根据提取的水库决策属性，按照加型一致性模型对各个属性进行初始权重的计算，得到初始权重模糊区间$[w_j^l,w_j^u]$。

3）根据公式(6)和(8)求解加权平均最大化和加权平均最小化模型所构成的线性规划。通过求解线性规划得到在犹豫度指数加权平均最大化模型下的最优权重值 $\boldsymbol{w}^0$ 和犹豫度指数加权平均最小化模型下的最优权重 $\boldsymbol{w}^1$。

4）对加权最大化模型和最小化模型进行组合，得到组合模型的最优化权重 $\boldsymbol{w}^*$。设立确定性系数 $\alpha$、$\beta$，有专家根据水库洪水调度属性的差异来确定 $\alpha$、$\beta$ 的值，即 $\boldsymbol{w}^*=\alpha\boldsymbol{w}^0+\beta\boldsymbol{w}^1$，令 $\alpha+\beta=1$。

5）通过最优权重 $\boldsymbol{w}^*$ 得到组合模型下最优广义值的直觉模糊集 $A^*$。

6）利用海明距离计算直觉模糊集 $A^*$ 与正理想方案的直觉模糊集的距离，同时计算 $A^*$ 与负理想方案的模糊集的距离。通过相对贴近度使得决策方案距离正理想最近，同时距离负理想方案最远。

7）根据贴近度值的大小对方案 $A_i(i=1,2,\cdots,n)$ 进行排序。

8）调整确定性系数 $\alpha$、$\beta$，得到满足约束条件的一组决策结果，决策者根据自身经验对得到的一组方案集进行带偏好的二次决策，择优得出相应的方案值。

## 3 应用实例

陕西某水库位于安康市，以发电为主，兼有防洪、航运等功能。本研究实例针对2009年8月该水库洪水来水进行实际决策调度，对防洪决策系统生成的8个方案进行择优，各方案的属性包括最大下泄流量 $C_1$、水库最高洪水位 $C_2$、调洪末水库水位 $C_3$、弃水量 $C_4$。水库洪水调度方案的属性特征值如表1所示。

表1 水库洪水调度方案的特征值表

Tab.1 The characteristics of flood scheduling solution table value

| 方案 | $C_1/(m^3/s)$ | $C_2/m$ | $C_3/m$ | $C_4/(10^8m^3)$ |
|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | 9 760 | 313.14 | 317.92 | 2.07 |
| $A_2$ | 11 200 | 313.01 | 317.27 | 2.65 |
| $A_3$ | 12 000 | 312.91 | 316.32 | 3.74 |
| $A_4$ | 11 400 | 313.11 | 317.13 | 2.83 |
| $A_5$ | 11 700 | 312.97 | 316.86 | 3.26 |
| $A_6$ | 14 000 | 312.60 | 315.00 | 4.38 |
| $A_7$ | 12 500 | 312.82 | 316.05 | 4.08 |
| $A_8$ | 13 400 | 312.68 | 315.15 | 4.26 |

在汛期对于水库洪水调度最大下泄流量 $C_1$ 越大越好，为效益型指标。由于要调节上游洪水来水，汛期水库最高洪水位 $C_2$ 表示水库预留防洪库容大小，即大坝安全程度。$C_2$ 为成本型指标，越小越好。在考虑发电、灌溉和综合利用的前提下，弃水量 $C_4$ 表示洪水资源浪费程度，$C_4$ 越少越理想。调洪末水库水位 $C_3$，因为水库要兼顾汛后兴利供水和后期防洪，所以调洪末水位越接近汛限水位315.0 m越理

想，属性 $C_3$ 与其它属性指标稍有差异。决策属性指标的信息权重为：$\boldsymbol{L} = \{w_3 - w_2 \geqslant w_4 - w_1, w_1 \leqslant 0.2, w_3 \leqslant 0.3, 0.2 \leqslant w_3 \leqslant 0.5\}$。

## 3.1　计算步骤

使用统计方法，由专家估计得到方案 $A_i$ 对属性 $C_j$ 关于模糊概念“好”的隶属度 $\mu_{ij}$ 和非隶属度 $\nu_{ij}$ 的估计区间。根据水库历年汛期调度的实际情况，专家首先确定了 4 个属性指标关于模糊概念“好”的定义区间如表 2 所示。

表 2　模糊概念的定义区间

Tab. 2　Fuzzy concept definition interval

| 定义 | 属　性 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $C_1/(\mathrm{m^3/s})$ | $C_2/\mathrm{m}$ | $C_3/\mathrm{m}$ | $C_4/(10^8\,\mathrm{m}^3)$ |
| 定义模糊概念“好” | [9 000,11 400] | [310,313] | [314.6,316.5] | [0,2] |

针对专家给出的 4 个属性指标关于模糊概念“好”的定义区间，利用语言评估标度[11] 对水库洪水调度方案的特征值表进行相对隶属度 $\mu_{ij}$ 和非隶属度 $\nu_{ij}$ 的区间估计，得到直觉模糊矩阵。水库洪水调度特征值和模糊概念定义的区间差距越大，那么可接受的程度越差。

将直觉模糊矩阵通过公式 $s(r_{ij}) = \nu_{ij} - \mu_{ij}$ 转化为直觉模糊决策矩阵的得分矩阵 $\boldsymbol{S}$，如表 3 所示。用公式(12)将直觉模糊决策矩阵的得分矩阵 $\boldsymbol{S}$ 规范化，得到规范化的得分矩阵 $\bar{\boldsymbol{S}}$，如表 4 所示。

表 3　得分矩阵

Tab. 3　Score matrix

| 方案 | $C_1/(\mathrm{m^3/s})$ | $C_2/\mathrm{m}$ | $C_3/\mathrm{m}$ | $C_4/(10^8\,\mathrm{m}^3)$ |
|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | 0.95 | -1.00 | 0.15 | 0.70 |
| $A_2$ | 0.60 | -0.85 | 0.35 | 0.55 |
| $A_3$ | 0.15 | 0.60 | 0.60 | 0.15 |
| $A_4$ | 0.35 | -1.00 | 0.40 | 0.60 |
| $A_5$ | -0.15 | 0.60 | 0.63 | 0.10 |
| $A_6$ | -0.40 | 0.80 | 0.95 | -0.40 |
| $A_7$ | -0.05 | 0.70 | 0.75 | -0.05 |
| $A_8$ | -0.4 | 0.80 | 0.80 | -0.45 |

表 4　规范化得分矩阵

Tab. 4　Standardized score matrix

| 方案 | $C_1/(\mathrm{m^3/s})$ | $C_2/\mathrm{m}$ | $C_3/\mathrm{m}$ | $C_4/(10^8\,\mathrm{m}^3)$ |
|---|---|---|---|---|
| $A_1$ | 2.455 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| $A_2$ | 1.818 | 0.083 | 0.250 | 0.870 |
| $A_3$ | 1.000 | 0.889 | 0.563 | 0.522 |
| $A_4$ | 1.364 | 0.000 | 0.313 | 0.913 |
| $A_5$ | 0.455 | 0.889 | 0.600 | 0.478 |
| $A_6$ | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 0.043 |
| $A_7$ | 0.636 | 0.944 | 0.750 | 0.348 |
| $A_8$ | 0.000 | 1.000 | 0.813 | 0.000 |

$$
[\mu_{ij}^l, \mu_{ij}^u] = [\mu_{ij}^l, 1 - \nu_{ij}] = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{array} \left( \begin{array}{cccc} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ [0.95, 1.00] & [0.00, 0.00] & [0.50, 0.65] & [0.80, 0.90] \\ [0.75, 0.85] & [0.00, 0.15] & [0.60, 0.75] & [0.75, 0.80] \\ [0.50, 0.65] & [0.75, 0.85] & [0.75, 0.85] & [0.50, 0.65] \\ [0.60, 0.75] & [0.00, 0.00] & [0.65, 0.75] & [0.75, 0.85] \\ [0.50, 0.65] & [0.75, 0.85] & [0.75, 0.88] & [0.50, 0.60] \\ [0.20, 0.40] & [0.85, 0.95] & [0.95, 1.00] & [0.20, 0.40] \\ [0.40, 0.55] & [0.80, 0.90] & [0.80, 0.95] & [0.40, 0.55] \\ [0.20, 0.40] & [0.85, 0.95] & [0.85, 0.95] & [0.20, 0.35] \end{array} \right)
$$

根据得到的规范化得分矩阵和已知的各属性权重信息，利用公式(13)～(16)分别计算得初始权重的上限和下限，所组成属性权重的初始值区间为：$([w_j^l, w_j^u])_{1\times4} = ([0.089, 0.132\ 5][0.174, 0.302][0.313, 0.393][0.192, 0.217])$。由公式(6)、(8)联立建立线性方程组为：

$$
\begin{cases} \max d/\min d = (1.15w_1 + 0.65w_2 + \\ \quad 0.93w_3 + 1.1w_4)/4 \\ 0.089 \leqslant w_1 \leqslant 0.1325;\ 0.174 \leqslant w_2 \leqslant 0.302 \\ 0.313 \leqslant w_3 \leqslant 0.393;\ 0.192 \leqslant w_4 \leqslant 0.217 \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \end{cases}
$$

求解得犹豫度指数加权平均最大化模型下最优权重值 $\boldsymbol{w}^0 = (0.132\ 5, 0.257\ 5, 0.393, 0.217)$，犹豫度指数加权最小化模型下的最优权重值 $\boldsymbol{w}^1 = (0.089, 0.302, 0.393, 0.216)$。利用公式(17)可得到相应的组合模型的最优化权重 $\boldsymbol{w}^*$。令 $\alpha = 0.5$，$\beta = 0.5$ 时，$\boldsymbol{w}^* = (0.112\ 0, 0.279\ 8, 0.393\ 0, 0.216\ 5)$，利用公式(21)计算可得：$\psi_1 = 0.517\ 68$，$\psi_2 = 0.528\ 68$，$\psi_3 = 0.703\ 42$，$\psi_4 = 0.522\ 18$，$\psi_5 = 0.703\ 67$，$\psi_6 = 0.709\ 77$，$\psi_7 = 0.685\ 59$，$\psi_8 = 0.677\ 03$。根据相对贴近度的大小关系对决策方案进行排序：

$$A_6 > A_5 > A_3 > A_7 > A_8 > A_2 > A_4 > A_1$$

所以在 $\alpha = 0.5$，$\beta = 0.5$ 时，最佳方案为 $A_6$。

## 3.2　结果分析

为了验证犹豫度加权组合模型应用于水库洪水调度多属性决策的正确性和合理性，表 5 给出了分别利用多属性模糊决策法和多属性熵权决策方案的

决策结果[12-13]，通过表5中排序结果可以得出犹豫度加权组合模型与其他两种方法的计算择优结果基本一致，说明了将犹豫度加权组合模型应用于水库洪水调度决策是合理可行的。

表5 决策结果对比

Tab. 5 Decision results contrast

| 方 法 | 排 序 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 加权组合法 | $A_6$ | $A_5$ | $A_3$ | $A_7$ | $A_8$ | $A_2$ | $A_4$ | $A_1$ |
| 模糊决策法 | $A_6$ | $A_5$ | $A_3$ | $A_8$ | $A_7$ | $A_2$ | $A_4$ | $A_1$ |
| 熵权决策法 | $A_6$ | $A_5$ | $A_3$ | $A_7$ | $A_8$ | $A_4$ | $A_2$ | $A_1$ |

为了检验设置的确定性系数$\alpha$,$\beta$因子对决策结果的影响，分别取不同$\alpha$,$\beta$的值，重复4.1节计算过程，结果如表6所示。

表6 确定性系数对决策结果的影响

Tab. 6 Coefficient of certainty influence results of decision

| $\alpha$值 | $\beta$值 | 决策方案排序结果 |
|---|---|---|
| 0 | 1 | $A_6 > A_7 > A_5 > A_3 > A_8 > A_2 > A_4 > A_1$ |
| 0.2 | 0.8 | $A_6 > A_7 > A_5 > A_3 > A_8 > A_4 > A_2 > A_1$ |
| 0.4 | 0.6 | $A_6 > A_7 > A_5 > A_3 > A_8 > A_2 > A_4 > A_1$ |
| 0.5 | 0.5 | $A_6 > A_5 > A_3 > A_7 > A_8 > A_2 > A_4 > A_1$ |
| 0.6 | 0.4 | $A_7 > A_6 > A_3 > A_8 > A_5 > A_4 > A_2 > A_1$ |
| 0.8 | 0.2 | $A_7 > A_6 > A_5 > A_3 > A_8 > A_2 > A_4 > A_1$ |
| 1 | 0 | $A_7 > A_5 > A_6 > A_3 > A_8 > A_2 > A_4 > A_1$ |

由表6可得结论为汛期水库洪水调度，上游来水量较大可设置确定性系数$\alpha \geqslant \beta$，选择决策方案中最大泄洪量相对较大的方案。枯水期洪水调度，由于水库要兼顾农田灌溉用水和发电，此时设置确定性系数$\alpha < \beta$，选择最大泄洪流量相对较小的方案更为合适。通过对确定性系数$\alpha$、$\beta$的调整，可以得到两类不同的决策排序结果，决策者可以在得到加权组合排序择优结果后再根据自身的经验和水库特点对决策方案进行带有偏好的修正，其本质是对决策方案进行二次决策。与传统决策模型相比，犹豫度加权组合模型不仅能对方案属性进行集结，还可以利用确定性系数的调整。避免传统模型只输出一个排序结果而无法对方案进行二次修正的问题。所以，犹豫度加权组合模型可以对不同时期的水库洪水来水进行合理的决策调度。

## 4 结 论

本研究基于直觉模糊集理论，采用犹豫度加权组合模型对水库洪水调度方案进行比较、择优，提供了一组从定性到定量的量化解决方案。实验表明，犹豫度加权组合模型能够更好的表示事件发生的可能性，科学合理地确定最优权重，通过对确定性系数$\alpha$,$\beta$因子的控制，避免传统模型只输出一个排序结果而无法对方案进行二次修正的问题，并且得到比传统决策方法更加符合现实的决策模型。为水库洪水调度这一类复杂多属性决策问题地解决提供了新的思路。

## 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, 21(4):437-441.
Zhang Jianyun. Review and reflection on China's hydrological forecasting techniques[J]. Advances in Water Sciences, 2010, 21(4):437-441.

[2] 陈守煜. 可变模糊决策理论及其在水库防洪调度决策中应用[J]. 大连理工大学学报,2008, 48(3):259-262
Chen Shouyu. Variable fuzzy decision-making theory and its application to decision-making supporting system for reservoir flood control operation [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(3):259-262.

[3] 王洪凯, 管延勇, 史开泉. 基于直觉模糊集的粗交流[J]. 系统工程理论与实践, 2008,l7(1):144-149.
Wang Hongkai, Guan Yanyong , Shi Kaiquan. Rough communication based on intuitionistic fuzzy set [J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2008,l7(1):144-149.

[4] Szmidt E, Kacprzyk J. Distances between intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems,2001, 114(3):505-518.

[5] Hong D H, Chou C H. Multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory [J]. Fuzzy Sets and Systems,2000, 114(5):103-113.

[6] Atnanssov K. Intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems,2008, 20(1):87-96.

[7] Li D F. Multi-attribute decision making models and methods using intuitionistic fuzzy sets [J]. Computer and System Science, 2005,70(1):73-85.

[8] 徐泽水. 直觉模糊偏好信息下的多属性决策途径[J]. 系统工程理论与实践, 2007,11(11):62-71.
Xu Zeshui. Approaches to multiple attribute decision making with intuitionistic fuzzy preference information [J]. Systems Engineering Theory Practice, 2007, 11(11):62-71.

[9] Bustince H, Herrera F. Fuzzy sets and their extensions: representation, aggregation and models [M]. Heidelberg: PhysicaVerlag, 2007.

[10] 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 Shuping. Survey on intuitionist fuzzy multi-attribute decision making approach [J]. Control and Decision, 2010, 25(11):1601-1604.

[11] 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 Zeshui. 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.

[12] 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.

[13] 周晓光. 基于熵权的模糊物元决策[J]. 系统管理学报,2009, 18(4):454-458.
Zhou Xiaoguang. Research on method of vague matter-element decision making based on entropy weight [J]. System Engineering Theory Methodology Application, 2009, 18(4):454-458.


（责任编辑 李虹燕）