

# 基于多目标模糊优选模型的引嘉入汉工程调蓄方案优选

王晨晖<sup>1,2</sup>, 魏娜<sup>1,2</sup>, 解建仓<sup>1,2</sup>, 汪妮<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对跨流域调水工程水资源配置决策存在的多层次、多目标性、模糊性等特性, 采用多目标模糊优选方法原理, 确立跨流域调水工程调蓄方案评价指标体系, 考虑调水工程多管理主体的特点, 在原有权重计算基础上引入决策者权重, 建立多目标模糊优选模型, 综合评价获得各方案的群体相对优属度。将该方法应用于引嘉入汉调水工程调蓄方案分析和排序优选上, 得到工程调蓄最优方案。结果表明, 该模型计算简便, 具有较好的应用性和可操作性, 结果合理, 为工程可行性论证提供决策支撑, 对于加快区域水资源均衡配置有重要作用。

**关键词:** 方案优选; 多目标; 模糊优选理论; 群决策理论; 引嘉入汉工程

中图分类号: TV68

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0144-05

## Scheme optimization of Jialingjiang – to – Hanjiang River Water Transfer Project based on multi-objective fuzzy optimization model

WANG Chenhui<sup>1,2</sup>, WEI Na<sup>1,2</sup>, XIE Jiancang<sup>1,2</sup>, WANG Ni<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Since there are the facts of the multi-level, multi-objective and fuzziness in water resource allocation decision of inter-basin water transfer project, according to multi-objective fuzzy optimization theory, an appropriate evaluation index system of regulation and storage scheme was established. Meanwhile, considering the multi-management of inter-basin water transfer project, decision-maker weight was introduced on the basis of original weight calculation. A multi-objective fuzzy optimization model is established, consequently providing group relative optimal degree with comprehensive evaluation. The method is applied in analysis and optimization of Jialingjiang-to-Hanjiang River Water Transfer Project, thus the optimal scheme is acquired. The results obtained show that the model has strong applicability and flexibility, which provides a scientific method for scheme decision. It supplies decision support in demonstrating the project's feasibility and plays an important role in accelerating the balanced allocation of regional water resources.

**Key words:** program optimization; multi-objective; fuzzy optimization theory; group decision theory; Jialingjiang-to-Hanjiang River Water Project

随着工业化和城市化的发展, 水资源时空分布与区域用水需求不匹配的问题严重制约了区域经济社会的发展, 跨流域调水的需求日益迫切<sup>[1]</sup>。跨流域调水过程中, 由于工程调水段的来水和配水段的需水在时间以及流量上的不一致性和不同步性, 设置合理的工程调蓄措施, 生成相应的调蓄方案十分

必要。各调蓄方案之间并没有直接的优劣之分, 因此, 如何选择调蓄方案是调水工程能否顺利实施的关键所在。

目前, 工程方案优选方法有很多, 包括: 层次分析法、人工神经网络法、模糊综合评价、模糊综合指数法、投影寻踪法、主成分分析法等<sup>[2-7]</sup>。在对调蓄

收稿日期: 2017-09-11; 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401409); 国家自然科学基金项目(51709222); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ5076); 陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0558); 博士科研启动基金项目(104-451116012)

作者简介: 王晨晖(1993-), 女, 山东济南人, 在读硕士研究生, 研究方向为水利信息化与水资源管理。

通讯作者: 魏娜(1987-), 女, 陕西延安人, 博士, 讲师, 研究方向为水利信息化与水库调度。

方案进行决策时,不仅要考虑社会因素和工程效益问题,还要考虑由此带来的生态环境问题,调蓄方案的合理性是以各因素综合评价结果为依据,可见跨流域调水系统的水资源配置是一个典型的多层次、多目标的决策问题。同时目标的好与坏、方案的优与劣又具有一定的模糊性,因此,针对跨流域调水工程调蓄方案决策具有的复杂性和模糊性,本文基于模糊优选理论,以跨流域调水与社会经济、生态环境之间的协同配置为目标,建立多目标评价指标体系,通过构建多目标模糊优选群决策模型,着力解决引嘉入汉调水工程调蓄方案的决策问题。

## 1 多目标模糊优选群决策模型的建立

### 1.1 评价指标体系

指标体系是将多个互相关联、互相作用的指标按一定的层次结构连接成的有机整体,选择应遵循系统与综合性原则、代表性及独立性原则、科学性及可行性原则、简洁及实用性原则、定性指标与定量指标相结合的原则<sup>[8]</sup>。

按照本调蓄方案的内涵及其影响因素,考虑到跨流域调水工程建设面临的重要任务,并结合专家和当地相关部门的意见,针对不同方案的经济效益和投资费用及其所引发的社会效应、资源效应、生态环境效应,确定本研究调蓄方案评价指标体系分为 4 部分:社会影响、经济影响、生态环境影响、资源影响<sup>[9-10]</sup>。调蓄方案评价指标体系如表 1 所示。

表 1 调蓄方案评价指标体系

评价准则	评价指标	指标表征
社会合理性	区域缺水率↓	缺水程度
	旬供水保证率↑	旬用水满足程度
经济合理性	新增水利工程投资↓	新增施工费用
	产业增加值↑	受水区直接经济效益
生态环境合理性	生态环境缺水率↓	生态系统对水资源的需求
资源合理性	跨流域调水比例↑	对外区域水资源的利用

注:评价指标后标有↑符号,则其为越大越优型指标;评价指标后面标有↓符号,则其为越小越优型指标。

该指标体系共包含 6 项指标,其中 3 项指标属于越大越优型指标,3 项指标属于越小越优型指标。为消除各项评价指标量纲的不同,越小越优型指标按公式(1)对指标原始数据进行归一化处理,越大越优型指标按公式(2)进行归一化处理。

$$C_{ij} = \frac{\max C_{ij} - C_{ij}}{\max C_{ij} - \min C_{ij}} \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots)$

$$C'_{ij} = \frac{C_{ij} - \min C_{ij}}{\max C_{ij} - \min C_{ij}} \quad (2)$$

$(i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots)$

### 1.2 多目标模糊优选群决策模型

设在调蓄方案评价时有  $k$  个决策者参与方案评价,通过  $m$  个评价指标对  $n$  个方案进行评价,则有  $m \times n$  阶特征样本值矩阵  $X$ <sup>[11-12]</sup>。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

通过公式(1)、(2)矩阵实现归一化,将上述矩阵转化为指标相对优属度矩阵  $R$ 。

评价方案时决策者对于各评价指标有各自的偏好,指标权重也会有所不同,采用层次分析法、二元比较法、熵值法等方法对评价指标的权重进行计算。对于  $k$  个决策者给出的评价指标权重组成矩阵  $W$ 。

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{k1} & w_{k2} & \dots & w_{km} \end{bmatrix} = (w_{hi})$$

为了求解方案  $j$  相对优等方案的相对隶属度  $u_{gj}$  的最优值,建立如下函数:

$$\min \{ F_{u_{gj}} = D_{gj}^2 + D_{bj}^2 = u_{gj}^2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^m [w_{ih}(r_{gi} - r_{ij})]^p \right\}^{2/p} + u_{bj}^2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^m [w_{ih}(r_{ij} - r_{bi})]^p \right\}^{2/p} \} \quad (3)$$

对  $k$  个决策者而言,每一个决策方案  $j$  隶属于优等方案的隶属度为  $u_{gj}$ ,隶属于劣等方案的隶属度为  $u_{bj}$ ,且  $u_{gj} + u_{bj} = 1$ 。

解得方案  $j$  对优的相对隶属度  $u_{gj}$ ,令  $r_{gi} = 1, r_{bi} = 0$ ,得到决策相对优属度模型:

$$u_{jh} = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_{hi}(1 - r_{ij})]^p}{\sum_{i=1}^m w_{hi}r_{ij}} \right\}^{2/p}} \quad (4)$$

求得对于决策者  $h$  而言的各方案的相对优属度  $u_{jh}$ ,组成矩阵  $U$ 。设决策者的权重为  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)^T$ ,得到  $n$  个方案群决策优属度  $S$ :

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T = U \cdot \mu \quad (5)$$

式中最大情景  $S_1^* = \max(s_1, s_2, \dots, s_n)$  是对于  $k$  个决策者而言的最优方案  $j$ 。

### 1.3 决策者权重计算

在此模型中,指标权重的确定采用熵值法,方法较为普遍因此不再赘述;而如何确定决策者的权重占有重要的地位,目前研究多重视决策者主观权重确定,一般多采用层次分析法、TOPSIS法、专家咨询法等方法<sup>[13]</sup>。但由于不同决策者存在各自偏好,客观赋权法能有效避免这一问题,结果具有较强的可信度。因此,本文采用客观赋权法确定决策者权重。

假设对于方案 $j$ ,其群决策优属度最大时决策者权重用 $\Omega_j = (\omega_{1j}, \omega_{2j}, \dots, \omega_{kj})$ 表示,并将权重向量 $\Omega_j$ 单位化( $\sum_{h=1}^k \omega_{hj}^2 = 1$ ),建立目标函数:

$$\max \sum_{h=1}^k (\omega_{hj} u_{gj})$$

利用拉格朗日乘数法求解得到对于方案 $j$ 而言最优决策者权重:

$$\omega_{kj} = \frac{u_{gj}}{\sqrt{\sum_{h=1}^k u_{gj}^2}} \quad (6)$$

组成决策者权重矩阵 $\Omega$ ;决策者权重则为 $\mu = \Omega \cdot \alpha$ ,那么上述公式(5)可进行进一步计算:

$$S_j(\alpha) = \sum_{h=1}^k (\mu_h \cdot u_{gj}) = U \cdot \Omega \cdot \alpha \quad (7)$$

在选择向量 $\alpha$ 时,应使 $n$ 个方案的群决策优属度都尽可能大。为此构造下列目标函数:

$$\max(S_1(\alpha), S_2(\alpha), \dots, S_n(\alpha))$$

对于每个方案的群决策优属度并不存在主观偏好,因此上述多目标优化求解可转化为等权的平方和函数的单目标优化问题:  $\max(S_\alpha^T \cdot S_\alpha)$ 。

设 $f(\alpha) = S_\alpha^T \cdot S_\alpha = \alpha^T (U \cdot \Omega)^T (U \cdot \Omega) \alpha$ ,那么就转化为求解 $f(\alpha)$ 最大值问题,解得最大特征向量 $\lambda$ ,即为上述公式中的 $\alpha$ ,带入求得决策者权重 $\mu$ 。

将求出的决策者权重 $\mu$ 带入公式(5)中,解得 $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ ,其中的最大值 $s_n$ 对应的方案 $j$ 即为对于 $k$ 个决策者而言的最优方案。

以上为本文构建的多目标模糊优选群决策模型的原理,它是解决工程方案评价优选的一种科学算法,利用相对优属度原则对评价指标和方案优劣进行描述,避免决策的“主观性”,能够应对决策所涉及的多目标问题。

## 2 实例应用

### 2.1 工程概况

关中地区地处陕西省中部,是省内经济发展中

心,区域内人口密集、工业集中、农业发达、教育科研产业资源丰富,但关中地区人均水资源短缺,人均和亩均水量仅为 $317 \text{ m}^3$ 和 $280 \text{ m}^3$ ,相当于全国平均水平的13.8%和17.7%,属于资源型缺水<sup>[14-15]</sup>。陕西省决定实施引汉济渭工程以缓解关中地区水资源供需矛盾,引汉济渭工程2020年设计调水量为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,远期在国家南水北调中线后期水源工程建成后,多年平均调水量 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。但目前保证引汉济渭受水区按期收益较为困难,考虑到嘉陵江具有向外流域调水的条件,从嘉陵江调水补充引汉济渭工程水源是目前现实可行的选择。

引嘉入汉工程规划从嘉陵江干流上游略阳县城以上约2 km处调水,采用低坝引水的方式,以30 km输水隧洞穿越嘉陵江与汉江分水岭,引水至汉江上游支流沮水,规划年调水量 $6.7 \times 10^8 \sim 10.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (约占略阳断面平均年径流量的20%~30%,约占嘉陵江出省水量的7%~10.8%)。将略阳站1955-2006年长系列逐旬实际可调水量和受水区1955-2006年长系列逐旬需水缺口作为调蓄边界,根据调蓄节点设置在输水隧洞前后的不同情景,分为上游调蓄,下游调蓄,上下游联合调蓄。上游调蓄是在上游调水区选取调蓄工程进行调蓄,调蓄后的水经过输水隧洞输送至汉江;下游调蓄是从嘉陵江干流将水通过输水隧洞输送至汉江,再经过下游受水区调蓄工程进行调蓄;上下游联合调蓄是在上游和下游分别选取调蓄工程,通过整体规划计算,将嘉陵江来水在输水隧洞前后分别进行调蓄,以达到整体最优效果。

在以上3种调蓄情景下,根据引嘉入汉可调水量大小、引汉济渭受水区需水缺口以及调蓄节点布设,共设置以下10个调蓄方案,其中上游调蓄方案3个,下游调蓄方案3个,上下游联合调蓄方案4个,各方案的评价指标值见表2。

### 2.2 模型应用

根据跨流域调水工程管理体系的分析,将引嘉入汉调水工程调蓄问题的决策者分为三者:一是政府行政部门A,其主要任务是保证调蓄工程的社会效益和生态效益;二是项目投资建设者B,其主要是保证工程的经济效益;三是最高决策机构C,其兼顾工程的各个方面,以水资源的可持续利用和区域可持续发展为目标,保证调蓄方案的合理性。

本文根据熵值法确定指标权重,3个决策者对6个指标有不同的偏好,其权重结果如下:

$$A: a = (0.183, 0.196, 0.148, 0.142, 0.192, 0.139)$$

B:  $b = (0.154, 0.166, 0.143, 0.223, 0.150, 0.164)$

根据公式(1)和(2)对方案指标体系进行标准

C:  $c = (0.157, 0.162, 0.170, 0.164, 0.180, 0.167)$

化,得到指标的相对优属度矩阵  $R$ 。

表 2 调蓄方案评价指标数据

指标	上游调蓄			下游调蓄			上下游联合调蓄			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
区域缺水率/%	9.40	8.70	7.80	10.80	9.30	8.60	9.18	8.98	8.59	7.47
旬供水保证率/%	85.74	86.86	88.57	85.36	87.71	88.73	86.81	87.18	87.98	90.06
新增水利工程投资/ $10^8$ 元	1.50	1.61	1.68	1.60	1.87	2.01	1.78	2.03	1.87	2.15
产业增加值/ $10^8$ 元	895.84	903.11	911.41	881.81	896.35	903.60	897.98	899.98	903.84	914.85
生态环境缺水率/%	1.20	1.12	1.03	1.10	1.03	0.96	0.80	0.78	0.73	0.71
跨流域调水比例/%	8.70	8.77	8.85	11.68	11.70	11.69	13.87	14.13	13.98	13.87

注:表中数据出自《陕西省水资源开发利用规划》(2012)、《陕西省水资源公报》(2012)、《关中-天水经济区发展规划(2009-2020)》、《引嘉入汉工程上下游调蓄工程作用与影响研究报告》。

$$R = \begin{bmatrix} 0.420 & 0.631 & 0.901 & 0 & 0.450 & 0.661 & 0.486 & 0.547 & 0.664 & 1 & \\ 0.081 & 0.319 & 0.683 & 0 & 0.500 & 0.717 & 0.309 & 0.387 & 0.557 & 1 & \\ 1 & 0.831 & 0.723 & 0.846 & 0.431 & 0.215 & 0.569 & 0.185 & 0.431 & 0 & \\ 0.425 & 0.645 & 0.896 & 0 & 0.440 & 0.660 & 0.489 & 0.550 & 0.667 & 1 & \\ 0 & 0.163 & 0.347 & 0.204 & 0.347 & 0.490 & 0.816 & 0.857 & 0.959 & 1 & \\ 0 & 0.013 & 0.028 & 0.549 & 0.552 & 0.551 & 0.952 & 1 & 0.972 & 0.952 & \end{bmatrix}$$

3个决策者对各指标进行权重分析得到评价指标权重矩阵  $W$ :

$$W = \begin{bmatrix} 0.183 & 0.154 & 0.157 \\ 0.196 & 0.166 & 0.162 \\ 0.148 & 0.143 & 0.170 \\ 0.142 & 0.223 & 0.164 \\ 0.192 & 0.150 & 0.180 \\ 0.139 & 0.164 & 0.167 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} 0.2293 & 0.2581 & 0.2775 \\ 0.3738 & 0.4235 & 0.3898 \\ 0.6349 & 0.6804 & 0.6152 \\ 0.1612 & 0.1634 & 0.2253 \\ 0.3969 & 0.4129 & 0.4029 \\ 0.6188 & 0.6369 & 0.5728 \\ 0.6364 & 0.6412 & 0.6855 \\ 0.6290 & 0.6414 & 0.6418 \\ 0.8160 & 0.8178 & 0.8197 \\ 0.8697 & 0.8782 & 0.8236 \end{bmatrix}$$

根据多目标模糊优选模型求得对决策者  $h$  而言的各方案的相对优属度,组成矩阵  $U$ :

采用模型求解得到对应于方案  $j$  的最优决策者权重,组成矩阵  $\Omega$ :

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.5177 & 0.5436 & 0.5691 & 0.5012 & 0.5668 & 0.5856 & 0.5599 & 0.5697 & 0.5761 & 0.5855 \\ 0.5827 & 0.6175 & 0.6099 & 0.5081 & 0.5897 & 0.6027 & 0.5660 & 0.5809 & 0.5773 & 0.5913 \\ 0.6265 & 0.5684 & 0.5515 & 0.7005 & 0.5753 & 0.5421 & 0.6051 & 0.5813 & 0.5787 & 0.5545 \end{bmatrix}$$

计算向量  $\alpha$ :

$$\alpha = (0.3159, 0.3166, 0.3167, 0.3124, 0.3168, 0.3167, 0.3166, 0.3168, 0.3169, 0.3168)^T$$

利用公式解得决策者权重,归一化后得到  $\mu = (0.3226, 0.3371, 0.3403)^T$ 。代入公式(5)计算得各方案的群决策优属度:

$$S = (0.2554, 0.3957, 0.6435, 0.1838, 0.4043, 0.6092, 0.6540, 0.6375, 0.8179, 0.8569)^T$$

根据模糊优选的最大优属度原则,上述方案优劣排序结果为:方案 10 > 方案 9 > 方案 7 > 方案 3 > 方案 8 > 方案 6 > 方案 5 > 方案 2 > 方案 1 >

方案 4,见表 3。

通过模型分析结果可知,根据隶属度“越大越优”的原则,方案 10 为最优方案。对比引嘉入汉工程调蓄前后各项指标,可以看出:(1)调蓄前受水区缺水量为  $1.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,缺水程度为 30%,采用调蓄方案 10 后,受水区缺水量为  $0.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,缺水程度仅为 8.59%,供水过程在时空分布上符合用水需要,可以较好地改善受水区用水不足的问题;(2)

调蓄前受水区旬供水保证率为 65.4%，调蓄后的受水区旬供水保证率达到 90.06%，满足受水区生产生活的需要，与区域生产力发展相适应；(3)调蓄方案 10 新增投资数额为  $2.15 \times 10^8$  元，是工程实施调蓄所需要追加的投资，此投资金额大小适中，在经济合理范围之内；(4)调水带来丰富水资源会改善和加快区域经济发展，产生一定的经济效益，调蓄方案 10 估计为受水区关中地区带来  $914.85 \times 10^8$  元产业增加值，推动区域快速发展，实现水资源与社会生产力相适应，满足方案综合效益最大化要求；(5)调蓄前汉江武侯站(生态基流为  $3.89 \text{ m}^3/\text{s}$ )和洋县站(生态基流为  $18.3 \text{ m}^3/\text{s}$ )生态环境缺水率分别为 26.3% 和 12.3%，调蓄后分别减少至 0.8% 和 6.5%，有效改善了汉江水量枯竭导致的生态恶化问题，更好发挥了汉江资源和维护河流生态系统良性循环的生态功能；(6)调蓄方案 10 向受水区供水  $4.962 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，作为补充水源缓解关中平原缺水局面。从各项指标情况来看，方案 10 在社会、经济、生态环境、资源等方面均处于合理水平，在实际工程应用中，可采取上下游联合调蓄的方式，上游调蓄库容为  $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，下游调蓄库容为  $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，根据《陕西省引嘉入汉工程规划》中对引嘉入汉上下游调蓄节点选址分析，工程上游可形成调蓄库容约  $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，下游可形成调蓄库容约  $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，满足调蓄需求。因此，方案 10 可作为引嘉入汉调水工程的最佳推荐方案，各项指标能反映引嘉入汉工程调蓄的作用，与调水实际情况相符合。

表 3 计算结果及排序

方案	评价结果	排序
1	0.2554	9
2	0.3957	8
3	0.6435	4
4	0.1838	10
5	0.4043	7
6	0.6092	6
7	0.6540	3
8	0.6375	5
9	0.8179	2
10	0.8569	1

### 3 结 论

为使得引嘉入汉工程调蓄方案优选过程更加科学合理，本文采用多目标模糊优选模型对引嘉入汉调水工程调蓄方案进行优选，得到以下结论：

(1)加入决策者权重，减少主观经验因素。权重的确定很大程度上受制于评价主体的认知和偏好，为尽可能削弱指标权重中出现的主观因素，考虑调水工程多管理主体的特点，在决策过程中引入了决策者的客观权重因子，对各决策者的评价结果进行权衡，从而获得公平合理的方案。

(2)采用多目标模糊优选模型计算各方案的相对优属度，并根据相对优属度大小排序得到方案 10 为最佳推荐方案。该方案符合工程实际情况，方案实施后对于引嘉入汉工程的供水保障作用显著。结果表明本文所建模型可行、有效，提高了决策的严谨性和有效性，且操作简单直观，能达到较好的效果。

### 参考文献：

- [1] 赵 静,史淑娟,李怀恩. 跨流域调水方案优选方法初步研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):214-218+248.
- [2] 解阳阳,赵梦龙,王义民,等. 榆林近期供水网络方案的多方法综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(3):219-228.
- [3] 隋彩虹,徐宗学. 人工神经网络模型在渭河下游洪水预报中的应用[J]. 水文,2006,26(2):38-42.
- [4] 穆 征,王方勇,李 静,等. 基于模糊综合评价模型的河流水质综合评价[J]. 水力发电,2009,35(4):11-13.
- [5] 耿雅妮. 基于模糊综合指数法的渭河宝鸡段水质评价[J]. 人民黄河,2011,33(9):36-37+40.
- [6] 陈亮亮,刘风华,龚 程. 投影寻踪模型在区域水资源承载力综合评价中的应用[J]. 节水灌溉,2010(1):13-15.
- [7] 王晓玮,邵景力,崔亚莉,等. 基于 DPSIR 和主成分分析的阜康市水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(3):37-42+48.
- [8] 屈国栋. 区域水资源合理配置及方案综合效益评价研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [9] 王 壬. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建和评价方法研究[D]. 福州:福建师范大学,2015.
- [10] 徐瑛丽. 区域水资源配置方案评价研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [11] ZHAO R, CHEN S. Fuzzy pricing for urban water resources: model construction and application[J]. Journal of Environmental Management,2008,88(3):458-466.
- [12] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,2009.
- [13] 谭跃进. 系统工程原理[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [14] 赵佐平,闫 莎,同延安,等. 汉江流域上游生态环境现状及治理措施[J]. 水土保持通报,2012,32(5):32-36.
- [15] 张利平,夏 军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.