

# 基于模糊优选方法的雅砻江调水方案优化

王凌河<sup>1,2</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>, 周惠成<sup>1</sup>, 严登华<sup>2</sup>, 金鑫<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源所, 北京 100038; 3. 辽宁省水文水资源勘测局, 沈阳 110003)

**摘要:** 在工程建设中通常会面对多方案的选择, 平衡各方面的利益取得最佳方案是工程建设的重要工作。模糊优选方法是一种具有严密数学逻辑和哲学思维的方法, 能够用来对工程建设中的多方案进行优选。结合雅砻江流域内的调水工程, 考虑调水的生态环境影响, 选择多指标表征生态环境, 设置多种调水方案, 利用模糊优选方法对雅砻江调水方案进行优化选择。结果表明: 在调水规模一致和调水过程不同的前提下, 调水过程的变化对降低调水不利的影响很大; 在调水过程一致和调水规模不同的前提下, 调水规模的降低对生态环境的保护起积极作用; 在现有的基础上考虑生态环境的影响, 应该适当降低调水规模并尽可能在汛期调水。

**关键词:** 模糊优选; 雅砻江; 调水方案; 南水北调

**中图分类号:** TV213.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0990-05

## Scheme optimization of water transfer in the Yalong River based on fuzzy optimization method

WANG Ling-he<sup>1,2</sup>, WANG Hao<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui-Cheng<sup>1</sup>, YAN Deng-hua<sup>2</sup>, JIN Xin<sup>3</sup>

(1. School of Hydraulic Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Department of Water Resources, China Institution of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Liaoning Province Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Shenyang 110003, China)

**Abstract** Scheme selection is common in engineering construction, and the best scheme can balance the benefits from different aspects. Fuzzy optimization method is widely used in scheme selection of engineering projects due to its strict logic of mathematical and philosophical thinking. In this paper, fuzzy optimization method was used to select the best scheme for the water transfer in the Yalong River in consideration of the ecological impacts. The results showed (1) under the same water transfer scale and different water transfer process, variation of water transfer process can increase the adverse effects of water transfer; (2) under the same water transfer process and different water transfer scale, reduction of water transfer scale can benefit the ecological environment; and (3) water transfer is better conducted during the flood season and water transfer scale can be reduced in order to decrease its impacts on the ecological environment.

**Key words:** fuzzy optimization; Yalong River; water transfer scheme; South to North Water Transfer Project

## 1 研究概况

工程方案的选择是工程决策的重要环节, 关系到工程项目最终的成败。一般而言, 工程实施会带来有利和不利的影响, 有利与不利往往是共生的, 侧重目标的不同, 方案的选择也会不同, 通常采用方案比选来确定最终的实施方案, 这实际上是一种优化。优化是在众多解答中寻找最佳的解答, 在20世纪50年代后, 优化理论逐渐形成, 随之而产生的优化方

法也得到广泛的应用。工程方案优选的方法有很多, 也各有优劣, 主要采用的有层次分析法、主成分分析法、模糊综合评价法、功效评价法、综合指数法、最大兼容度法等<sup>[1-5]</sup>。

模糊优选方法是一种具有严密数学逻辑和哲学思维的方法, 通过隶属度这一概念对决策优劣进行定量化描述。目前, 模糊优选方法在水文水资源领域应用较为广泛, 如水资源的评价、冰凌预报、洪水调度、水库特征水位选择、水资源承载能力分析等<sup>[6-10]</sup>。

收稿日期: 2014-11-13    修回日期: 2015-08-17    网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2103.025.html>

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目“西线工程对调水区生态环境影响评估及综合调控技术”(2006BA B04 A08)

作者简介: 王凌河(1984), 男, 湖北当阳人, 博士生, 主要从事流域生态水文模拟研究。E-mail: wang-linghe@163.com

通讯作者: 周惠成(1958), 男, 吉林农安人, 教授, 主要从事水文预报调度和防洪减灾方面研究。E-mail: hczhou@dlut.edu.cn

雅砻江发源于青海,流经四川汇入金沙江,水量充沛,是金沙江的一条重要支流。南水北调西线工程前期规划将从雅砻江调水入黄河上游贾曲(见图1),其中一期工程调水规模为56.5亿m<sup>3</sup>[11]。目前工程仍未开工建设,其主要原因是目前的论证工作还难以取得广泛的共识。本次研究从生态环境的角度出发,利用模糊优选方法对设置的调水方案进行优选,以期在实际决策提供借鉴。

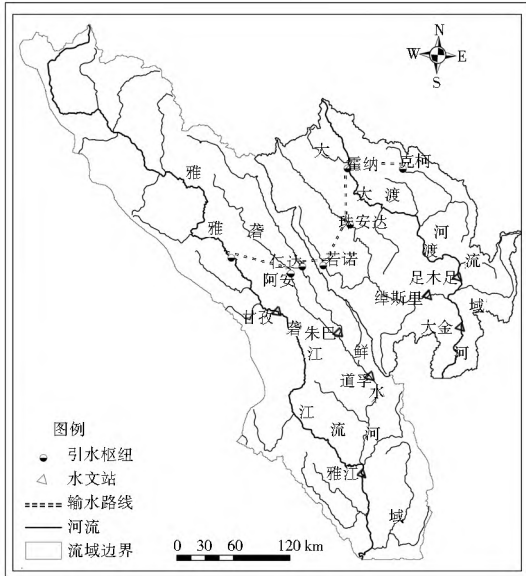


图1 雅砻江调水路线

Fig. 1 Water transfer route in the Yalong River

## 2 模糊优选方法

设有对生态环境影响进行评价的  $n$  个样本集合  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 每个样本按  $m$  个指标特征值来进行综合评价, 则有  $m \times n$  阶待评价样本特征值矩阵<sup>[12-13]</sup>

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} = (x_{ij}) \quad (1)$$

式中:  $x_{ij}$  为样本  $j$  指标  $i$  的特征值,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

评价样本集依据  $m$  个指标按  $c$  个级别的指标标准特征值进行识别, 则有  $m \times c$  阶指标标准特征值矩阵

$$Y = (y_{ih})_{m \times c} \quad (2)$$

式中:  $y_{ih}$  为级别  $h$  指标  $i$  的标准特征值,  $h = 1, 2, \dots, c$ 。

参照指标标准值矩阵, 确定可变集合的吸引(为主)域矩阵及范围域矩阵

$$I_{ab} = [a_{ih}, b_{ih}] \quad (3)$$

$$I_{cd} = [c_{ih}, d_{ih}] \quad (4)$$

结合实际特征, 确定吸引(为主)域  $[a_{ih}, b_{ih}]$  中  $\mu_A(x_{ij})_h = 1$  的点值  $M_{ih}$  的矩阵:

$$M = (M_{ih}) \quad (5)$$

判断样本特征值  $x_{ij}$  在  $M_{ih}$  点的左侧还是右侧。据此选用式(7)、式(8)计算指标对  $h$  级的相对隶属度  $\mu_A(x_{ij})_h$  矩阵

$$[U_h] = (\mu_A(x_{ij})_h) \quad (6)$$

其中, 当  $x$  点落入  $M$  点左侧时的相对隶属度为

$$\begin{cases} \mu_A(x_{ij})_h = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{x_{ij} - a_{ih}}{M_{ih} - a_{ih}}\right)^\beta & x_{ij} \in [a_{ih}, M_{ih}] \\ \mu_A(x_{ij})_h = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{x_{ij} - a_{ih}}{c_{ih} - a_{ih}}\right)^\beta & x_{ij} \in [c_{ih}, a_{ih}] \end{cases} \quad (7)$$

当  $x$  点落入  $M$  点右侧时的相对隶属度为

$$\begin{cases} \mu_A(x_{ij})_h = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{x_{ij} - b_{ih}}{M_{ih} - b_{ih}}\right)^\beta & x_{ij} \in [M_{ih}, b_{ih}] \\ \mu_A(x_{ij})_h = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{x_{ij} - b_{ih}}{d_{ih} - b_{ih}}\right)^\beta & x_{ij} \in [b_{ih}, d_{ih}] \end{cases} \quad (8)$$

应用文献[13]构建的可变模糊评价模型为

$$\mu'_h = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [W_i (1 - \mu_A(x_{ij})_h)]^p}{\sum_{i=1}^m (w_i \mu_A(x_{ij})_h)^p} \right\}^{\alpha/p}} \quad (9)$$

式中:  $\mu'_h$  为综合隶属度;  $\alpha$  为优化准则参数,  $\alpha = 1$  为最小一乘方准则,  $\alpha = 2$  为最小二乘方准则;  $w_i$  为指标权重;  $p$  为距离参数,  $p = 1$  为海明距离,  $p = 2$  为欧式距离。该模型通常有4种组合: (1)  $\alpha = 1, p = 1$ ; (2)  $\alpha = 1, p = 2$ ; (3)  $\alpha = 2, p = 1$ ; (4)  $\alpha = 2, p = 2$ 。

据此得到非归一化的综合相对隶属度矩阵

$$U' = (j\mu'_h) \quad (10)$$

归一化后, 得到相对隶属度矩阵

$$U = (j\mu_h) \quad (11)$$

其中,  $j\mu_h = j\mu'_h / \sum_{h=1}^c \mu'_h$ 。

## 3 基于模糊优选方法的调水方案选择

### 3.1 方案的设定

南水北调西线工程初期研究时曾把西线工程划分为三期, 其中一、二期的调水量合计为90亿m<sup>3</sup>, 在雅砻江和大渡河分别调水65亿m<sup>3</sup>和25亿m<sup>3</sup>。方案设定时主要考虑调水总量和调水过程的变化, 其中调水过程考虑汛期和非汛期的比例变化。最终设定的方案如下(表1)。

表1 雅砻江流域调水工程设定方案集

方案	调水规模/亿 m <sup>3</sup>	汛期与非汛期调水比例
初始方案	56.5	均一过程
方案一	56.5	6: 4
方案二	56.5	7: 3
方案三	65	均一过程
方案四	50	均一过程

初始方案, 调水规模不变, 调水量为56.5亿m<sup>3</sup>, 调水过程为均一过程。

方案一, 调水规模不变, 调水过程变化。调水规模仍为56.5亿m<sup>3</sup>, 但考虑汛期和非汛期的比例变化, 汛期设为5月-9月, 汛期与非汛期的调水比例设为6: 4。

方案二, 调水规模不变, 调水过程变化, 汛期与非汛期的调水比例为7: 3。

方案三, 调水规模变大, 调水过程不变, 西线工程一、二

期总调水规模最初研究中的总量 90 亿 m<sup>3</sup>, 其中雅砻江调水为 65 亿 m<sup>3</sup>。

方案四, 调水规模变小, 调水过程不变, 现有一期调水为 80 亿 m<sup>3</sup>, 设定减小后为 70 亿 m<sup>3</sup>, 其中雅砻江调水为 50 亿 m<sup>3</sup>。

### 3.2 指标集的计算

在模型计算的辅助下, 选择与水力、水文、生态相关的指标来构建五种方案下的目标体系, 对不同月份的过程值取平均值。选择热巴、阿安、仁达、甘孜、道孚、雅江六处断面作为计算断面, 其中热巴、阿安、仁达为调水坝址, 甘孜、道孚、雅江为水文站。计算河段分别为热巴- 甘孜段、阿安- 道孚段、仁达- 道孚段、甘孜- 雅江段、道孚- 雅江段、雅江以下河段, 对各断面的指标平均值采用汛期和非汛期的加权平均值来计算, 数据采用年限为 1956 年- 2005 年。其中水深、河宽、流量和流速的计算采用笔者已构建的生态水文模型在不同方案下的计算值<sup>[14]</sup>, 生态保证率是在文献 14 的基础上通过整合生态需水的计算模块计算各月平均值<sup>[15]</sup>, 然后再进行计算生态流量的保证率, 生境面积的计算采用物理栖息地模拟计算获得, 计算方法见文献 14, 计算结果见表 2- 表 6。

表 2 初始方案下指标集

Tab. 2 The index set under the initial schem

断面	水深 /m	河宽 /m	流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	流速 / (m · s <sup>-1</sup> )	生态流量 保证率 (%)	生境面积 / (m <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup> m)
热巴	1.12	76.7	85.2	0.6	72	37 456.2
阿安	1.24	46.8	12.3	0.9	64	10 324.8
仁达	0.95	54.8	15.2	1	69	11 031.9
甘孜	1.1	104.2	134	1.1	79	54 382.1
道孚	1.4	72.6	94	0.8	78	36 941.6
雅江	3.1	121.9	480	2.1	84	52 951.6

表 3 方案一指标集

Tab. 3 The index set under the first scheme

断面	水深 /m	河宽 /m	流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	流速 / (m · s <sup>-1</sup> )	生态流量 保证率 (%)	生境面积 / (m <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup> m)
热巴	1.23	78.4	90.3	0.7	78	39 548.3
阿安	1.36	49.8	13.8	1	72	10 928.5
仁达	1.02	58.2	16.4	1.1	75	12 182.1
甘孜	1.3	108.4	157	1.2	85	56 913.2
道孚	1.45	73.4	104	0.9	82	37 832.6
雅江	3.31	126.5	498	2.3	87	53 928.5

表 4 方案二指标集

Tab. 4 The index set under the second scheme

断面	水深 /m	河宽 /m	流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	流速 / (m · s <sup>-1</sup> )	生态流量 保证率 (%)	生境面积 / (m <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup> m)
热巴	1.27	81.2	97.4	0.8	80	40 974.2
阿安	1.41	52.5	14.3	1	78	11 564.2
仁达	1.09	63.2	17.3	1.1	81	13 283.1
甘孜	1.35	112.3	162	1.2	88	57 893.2
道孚	1.53	73.8	109	1	85	38 291.3
雅江	3.39	129.4	503	2.3	90	55 218.3

表 5 方案三指标集

Tab. 5 The index set under the third scheme

断面	水深 /m	河宽 /m	流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	流速 / (m · s <sup>-1</sup> )	生态流量 保证率 (%)	生境面积 / (m <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup> m)
热巴	0.98	72.3	72.2	0.5	70	35 741.2
阿安	1.02	43.1	9.8	0.7	62	9 765.3
仁达	0.89	50.2	11.3	0.9	65	10 768.3
甘孜	0.97	107.2	117	1	73	52 319.5
道孚	1.22	68.4	85.9	0.7	74	33 452.8
雅江	2.85	117.5	442	1.9	79	51 094.3

表 6 方案四指标集

Tab. 6 The index set under the fourth scheme

断面	水深 /m	河宽 /m	流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	流速 / (m · s <sup>-1</sup> )	生态流量 保证率 (%)	生境面积 / (m <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup> m)
热巴	1.32	82.3	108	0.8	81	40 876.5
阿安	1.43	53.1	15.5	1.1	76	11 438.5
仁达	1.12	64.2	16.3	1.2	79	12 985.4
甘孜	1.37	114.3	174	1.2	83	56 946.8
道孚	1.59	74.1	113	1	80	37 856.4
雅江	3.42	131.2	513	2.3	86	54 328.5

### 3.3 调水方案的选择

先计算各河段的不同方案下选择, 然后再根据不同河段的重要性权重比例计算整体的方案选择情况。以热巴- 甘孜河段计算为例说明, 以热巴断面为计算断面。不同方案下, 热巴断面处六个指标构成的特征值矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 1.12 & 76.7 & 85.2 & 0.6 & 72 & 37456.2 \\ 1.23 & 78.4 & 90.3 & 0.7 & 78 & 39548.3 \\ 1.27 & 81.2 & 97.4 & 0.8 & 80 & 40497.4 \\ 0.98 & 72.3 & 72.2 & 0.5 & 70 & 35741.2 \\ 1.32 & 82.3 & 108.3 & 0.8 & 81 & 40876.5 \end{bmatrix}$$

在做归一化处理前, 结合雅砻江流域的现实状况, 认为在调水前这些指标的原始值为属优的指标, 不同方案下的指标应越接近原始值越趋向优。六个指标中唯有流速在从小增大的过程中会影响到优劣的转化, 另外五个指标属越大越优指标, 考虑流速目前为较小值, 其增大范围也可认定为越大越优指标。以调水前各指标的优属度为 1, 以调水后的指标值除以调水前各指标平均值确定规格化后矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.718 & 0.860 & 0.445 & 0.667 & 0.720 & 0.452 \\ 0.788 & 0.879 & 0.471 & 0.788 & 0.780 & 0.477 \\ 0.814 & 0.910 & 0.508 & 0.889 & 0.800 & 0.495 \\ 0.628 & 0.811 & 0.337 & 0.556 & 0.700 & 0.432 \\ 0.846 & 0.923 & 0.656 & 0.889 & 0.810 & 0.494 \end{bmatrix}$$

利用二元比较法<sup>[13]</sup> 确定权重, 得到通过检验的指标重要性排序一致性标度矩阵

$$F = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

各指标的重要性排序依次为流量、生态流量保证率、水深、河宽、流速、生境面积,其中流量和生态流量保证率同等重要,其值均为5;其次为水深和河宽,计算值为3;最后为流速和生境面积,值为1。根据重要性语气算子和相对隶属度的关系<sup>[16]</sup>,可得到各指标重要性相对隶属度向量

$$\omega' = [0.667 \quad 0.667 \quad 1 \quad 0.538 \quad 1 \quad 0.538]$$

归一化后,得到各指标权重

$$\omega = [0.151 \quad 0.151 \quad 0.227 \quad 0.122 \quad 0.227 \quad 0.122]$$

$\alpha = 1, \rho = 2$ 时,评价模型变为TOPSIS理想点模型,在四种模型中更符合对最优解的解答,选择此种模型的相关参数代入,计算得到综合相对隶属度矩阵

$$U = [0.620 \quad 0.660 \quad 0.689 \quad 0.570 \quad 0.714]$$

根据热巴断面在五中方案下获得相对隶属度值分析可知,在56.5亿m<sup>3</sup>调水方案下,汛期承担的调水比例越大,隶属度值越大,表明方案越好。隶属度值最大为方案四,值为0.714,其调水为50亿m<sup>3</sup>。

采用同样的计算方式,计算另外五个断面的综合隶属度矩阵,结果见表7。分析表明,在某一种方案下,热巴、阿安、仁达相较于甘孜、道孚、雅江断面的相对隶属度小,这说明调水对这三处河段的影响要大,这也与事实相符;不同方案下,对于某一特定断面的相对隶属度,最大值为方案四,最小值为方案一,整个河流最终的相对隶属度要根据各河段的重要性来计算。

表7 雅砻江综合相对隶属度

Tab. 7 The integrated relative membership degree in the Yalong River

方案	热巴	阿安	仁达	甘孜	道孚	雅江
初始方案	0.620	0.464	0.483	0.536	0.553	0.590
方案一	0.660	0.650	0.673	0.740	0.777	0.813
方案二	0.689	0.677	0.707	0.759	0.807	0.826
方案三	0.570	0.532	0.568	0.628	0.680	0.736
方案四	0.714	0.691	0.698	0.766	0.804	0.822

采用二元比较确定权重,结合研究区域特征及调水工程对下游生态环境的影响,认为大坝以下河段(热巴、阿安、仁达)较甘孜、道孚河段略微重要,较雅江河段重要,重要性相对隶属度向量为

$$\omega' = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0.667 \quad 0.667 \quad 0.538]$$

归一化处理后,得到各河段权重

$$\omega = [0.205 \quad 0.205 \quad 0.205 \quad 0.137 \quad 0.137 \quad 0.110]$$

评价模型参数选择 $\alpha = 1, \rho = 2$ ,将相关参数代入,计算获得综合相对隶属度矩阵:

$$U = [0.644 \quad 0.690 \quad 0.717 \quad 0.589 \quad 0.725]$$

由此得到调水方案的优属度排序为:方案四、方案二、方案一、初始方案、方案三,即方案四最优。

## 4 结论

(1) 调水规模一致,调水过程不同,初始方案、方案一、方案二表现出明显不同,其中在相对隶属度值的变化上,方案一比初始方案增大38.83%,方案二比初始方案增大44.27%,方案二比方案一增大了3.9%。结果表明调水过程

的变化对降低调水不利的的影响很大,同时在汛期和非汛期考虑6:4或7:3的比例降水,二者差别并不是很大。

(2) 调水规模不一致,调水过程相同,初始方案、方案三、方案四比较结果显示,方案四优于初始方案和方案三,初始方案优于方案三。事实上,调水过程的均一化在现实中是不太可能采用的调度规则。总体而言,调水过程一致,调水规模越小,对调水区生态环境的保护程度越大。

(3) 雅砻江调水规模的确定要由调水区的可承受能力 and 受水区的需求程度来决定。目前的调水规模占三个断面多年平均径流量的60%~70%,适当的减少调水规模尚有一定的空间。若是不减小调水规模,则应考虑多在汛期调水,可考虑方案二;若调水规模可以适度的减小,可考虑方案四。

## 参考文献(References):

[1] 陈衍泰,陈国宏,李美娟.综合评价方法分类及研究进展[J].管理科学学报,2004,7(2):69-79.(CHEN Yan tai, CHEN Guo hong, LI Mei juan. Classification & research advancement of comprehensive evaluation methods[J]. Journal of Management Science in China, 2004, 7(2): 69-79. (in Chinese))

[2] 秦寿康.评价方案优化系统[J].系统工程学报,2002,17(2):143-149.(QIN Shou kang. Optimization system of evaluation schemes[J]. Journal of Systems Engineering, 2002, 17(2): 143-149. (in Chinese))

[3] 王浙明,史惠祥,苏雨生,等.灰色关联模型用于工程方案优化[J].中国给水排水,2002,18(1):81-84.(WANG Zhe ming, SHI Huo xiang, SU Yu sheng, et al. Grey relation model applied in engineering schemes optimization[J]. China Water & Waste Water, 2002, 18(1): 81-84. (in Chinese))

[4] 金菊良,刘永芳,丁晶,等.投影寻踪模型在水资源工程方案优选中的应用[J].系统工程理论方法应用,2004,13(1):81-84.(JIN Ju liang, LIU Yong fang, DING Jing, et al. Application of projection pursuit model to optimal choice of water resources engineering schemes[J]. Systems Engineering Theory Methodology Applications, 2004, 13(1): 81-84. (in Chinese))

[5] 吴书悦,杨雨曦,彭宜嵩,等.区域用水总量控制模糊综合评价研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):92-97.(WU Shu yue, YANG Yu xi, PENG Yi song, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of regional total water consumption control[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 92-97. (in Chinese))

[6] 韩宇平,阮本清,解建仓.多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J].资源科学,2003,25(4):37-42.(HAN Yu ping, RUAN Ben qing, XIE Jian cang. Multi objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation[J]. Resources Science, 2003, 25(4): 37-42. (in Chinese))

[7] 陈守煜,冀鸿兰.冰凌预报模糊优选神经网络BP方法[J].水利学报,2004,35(6):114-118.(CHEN Shou yu, JI Hong lan. Fuzzy optimization neural network BP approach for ice forecasting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(6): 114-118. (in Chinese))

[8] 王本德,周惠成,程春田.梯级水库群防洪系统的多目标洪水调度决策的模糊优选[J].水利学报,1994,25(2):31-40.(WANG Ben de, ZHOU Hui cheng. Fuzzy optimizing approach to flood operation of multiobjective cascade reservoirs[J]. Journal of

- Hydraulic Engineering, 1994, 25(2): 31-40. (in Chinese))
- [9] 王文川, 徐冬梅, 邱林. 水库正常蓄水位选取的多目标可变模糊优选方法[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 53-55. (WANG Wen chuan, XU Dong mei, Qiu Lin. Multi objective variable fuzzy optimization method for selection of normal water level of reservoir[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2): 53-55. (in Chinese))
- [10] 陈洁荣, 郭瑜. 区域水资源承载能力的模糊优选评判分析及其在张掖地区的应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 1-5. (CHEN Jie rong, GUO Yu. Analysis on fuzzy optimized judgment of regional water resources carrying capacity and its application in Zhang ye District[J]. Water Resources and Hydro power Engineering, 2012, 43(3): 1-5. (in Chinese))
- [11] 崔荃, 曹海涛, 高媛媛. 南水北调西线调水对生态环境影响的宏观分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5-6): 495-500. (CUI Quan, CAO Hai tao, GAO Yuan yuan. Macroscopic analysis on eco environmental impact of the western line of the South to North water transfer project[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2009, 45(5-6): 495-500. (in Chinese))
- [12] ZHAN Ran hang, CHEN Shou yu. Fuzzy pricing for urban water resources: Model construction and application[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(3): 458-466.
- [13] 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. (CHEN Shou yu. Theory and model of variable fuzzy sets and its application[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [14] WANG Ling he, YAN Deng hua, WANG Hao, et al. Impact of the Yalong Yellow River water transfer project on the environment in Yalong River Basin[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(4): 831-842.
- [15] 金鑫, 严登华, 王浩, 等. 面向流域系统的生态需水整合研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(12): 1658-1667. (JIN Xin, YAN Deng hua, WANG Hao, et al. Study on integrated calculation of ecological water demand for basin system[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 41(12): 1658-1667. (in Chinese))
- [16] 陈守煜. 多目标决策系统模糊优选理论、模型与方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3): 136-140. (CHEN Shou yu. A fuzzy optimum theory, model and approach for multiobjective decision making systems[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2001, 22(3): 136-140. (in Chinese))

(上接第 967 页)

- [12] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. (CHEN Jing sheng. Aquatic Environmental Chemistry[M]. Beijing: High Education Press, 1993. (in Chinese))
- [13] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988. (CHEN Mo xiang. Huabei Geothermal[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese))
- [14] 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1999. (SHEN Zhao li, ZHU Wan hua, ZHONG Zuo shen. Introduction to Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [15] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1988, 52: 2749-2765.
- [16] 文东光. 用环境同位素论区域地下水资源属性[J]. 地球科学, 中国地质大学学报, 2002, 27(2): 141-147. (WEN Dong guang. Groundwater resources attribute based on environmental isotopes[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 141-147. (in Chinese))
- [17] 吕金波, 车用太, 王继明, 等. 京北地区热水水文地球化学特征与地热系统的成因模式[J]. 地震地质, 2006, 28(3): 419-429. (LYU Jin bo, CHE Yong tai, Wang Ji ming. Hydrogeochemical characteristics of thermal water and genetic model of geothermal system in north Beijing[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(3): 419-429. (in Chinese))
- [18] 卫克勤, 林瑞芬. 氚在年代学研究中的应用[A]. 年轻地质体系的年代测定[C]. 北京: 地震出版社, 1991: 174-186. (WEI Ke qin, LIN Rui fen. Application of tritium on chronology research[A]. Chronological Dating on Young Geological System[C]. Seismological Press, Beijing, 1991: 174-186. (in Chinese))
- [19] 马致远, 钱会. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2004. (MA Zhi yuan, QIAN Hui. Environmental Isotope and Geohydrology[M]. XIAN: Shanxi Science and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [20] 钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (QIAN Hui, MA Zhi yuan. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [21] 马致远, 余娟, 李清, 等. 关中盆地地下水环境同位素分布特征及其水文地质意义[J]. 地球科学环境学报, 2008(6): 396-401. (MA Zhi yuan, YU Juan, LI Qing, et al. Environmental isotope distribution and hydrologic geologic sense of Guanzhong basin geothermal water. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008(6): 396-401. (in Chinese))
- [22] 李娟. 地下热水中 D、<sup>18</sup>O、<sup>34</sup>S 和 <sup>13</sup>C 稳定同位素特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008. (LI Juan. A study of D, <sup>18</sup>O, <sup>34</sup>S and <sup>13</sup>C stable isotope in geothermal water[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese))