

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 05. 009

基于系统层次模糊优化模型的工业用水定额合理性研究

刘曾美,陈斯达,冯斯安,蓝福鹏

(华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510640)

摘要:根据现行工业用水定额编制、修订和执行情况选取评估因子,构建评价层次结构,以江西省工业用水定额评估为例,基于系统层次模糊优化模型对现行工业用水定额合理性进行评估。结果表明:江西省工业用水定额的合理性评判等级为一般,评判等级隶属于一般、较差和较好的概率分别为 39.64%、16.7% 和 15.1%,主要原因是,与现状用水水平对比,一些高耗水行业的定额标准明显偏高,难以在水资源管理中发挥作用,迫切需要修订。

关键词:工业用水定额;系统层次模糊优化模型;合理性评估;江西省

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)05 - 0048 - 04

Study on rationality of industrial water use quota based on systematic hierarchical fuzzy optimal model // LIU Zengmei, CHEN Sida, FENG Sian, LAN Fupeng (*School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

Abstract: Taking the evaluation of industrial water use quota in Jiangxi Province as an example, the evaluation factors were selected according to the compilation, revision and implementation of the current industrial water use quota, and the hierarchical structure of the evaluation was constructed. The rationality of the current industrial water use quota was evaluated based on the systematic hierarchical fuzzy optimal model. The results show that the evaluation grade of rationality of industrial water use quota in Jiangxi Province is general. The probability of the evaluation grade subordinating to the general, the worse and the better is 39.64%, 16.7% and 15.1%, respectively. The main reason is that compared with the current level of water use, the quota standards of some high-water-consuming industries are obviously too high to play a role in water resources management, and need to be revised urgently.

Key words: industrial water use quota; systematic hierarchical fuzzy optimal model; rationality evaluation; Jiangxi Province

随着经济社会的发展、产业发展情况结构的调整以及节水工作的不断深入,现行用水定额逐渐与水资源条件、社会经济水平、技术发展情况以及节水型社会建设产生了不协调^[1-3]。对用水定额的合理性进行评估,及时掌握定额制定、修订、执行的情况,是不断规范并强化用水定额管理的重要手段^[4]。

目前,用水定额合理性评估的方法可大致归纳为 4 种:①通过典型调查,采用对比(类比)法以及定额分析法评估定额的合理性,如,黄燕等^[5]采用类比法和二次平均法对海南省城镇生活用水定额进行合理性评估;张丽等^[6]参照《海南省工业及城市生活用水定额(试行)》及国内其他地区工业用水定额标准,采用主观概率值法和横向比较法对三亚市

主要工业用水定额进行评估,分析三亚市现状工业用水节水潜力;韩云^[7]通过与国家定额标准以及松辽流域内辽宁省、黑龙江省用水定额进行对比,分析吉林省定额的完整性和先进性,研究定额的代表性和规范性。这类方法简单直观,便于摸底了解,适用于定性分析。②采用层次分析法评判用水定额的合理性,如施胜利^[8]运用层次分析法,以覆盖性、合理性、先进性、实用性、公平性为准则评判上海市用水定额的合理性。当指标太多时,这种方法的数据统计量大,权重也难以确定,并且出现一致性随机偏离的可能性也越大,此外,这种方法也没考虑合理性评判的模糊性。③将一些评价方法与层次分析法结合起来评判用水定额的合理性,如,刘紫薇^[9]采用多

层次灰色关联综合评判法从覆盖性、合理性、先进性、实用性 4 个方面对陕西省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区以及青海省的农业用水定额进行评估;焦军^[10]采用多层次灰色关联综合评判法计算黄河流域各省区现行的火电行业用水定额指标序列与最优指标集的相似程度,从而确定用水定额的相对优劣程度;赵博等^[11]基于层次分析法和模糊综合评判法评价辽宁省用水定额的合理性;李奎等^[12]通过云模型改进的模糊层次分析法构建黄河流域火电行业用水定额评估模型。这类方法考虑了合理性评判的模糊性,从整体角度更好地解决评估过程中的主观不确定性,但未进行模糊优化。

④基于投影寻踪法对用水定额的合理性进行评估,如邓敏慧等^[13]基于投影寻踪法对长江流域火电行业取水定额进行了多目标评价。投影寻踪计算量大,尤其当用水定额涉及的指标较多时,计算复杂,而且有些问题尚有待合理解决^[14-15],因此较少应用于用水定额评估。

无论是工业用水定额、居民生活用水定额还是农业灌溉用水定额,从系统工程的观点,均可视为一个由不同层次组成的独立系统,故用水定额评价便成为一个具有多层次结构的评价问题,并且用水定额评估具有模糊性,因此可将系统层次与模糊优化理论有机结合起来的系统模糊优化理论^[16-17]引入解决用水定额的合理性评价问题,其隶属度通过优化得到,且隶属度函数概率化,具有数学理论严谨、物理概念清晰、评价结果避免均化等特点,更能客观地反映实际情况^[16-17]。鉴于此,本文以江西省工业用水定额为例,基于系统层次模糊优化模型^[17]对其合理性进行评估。

1 系统层次模糊优化模型

工业用水定额合理性评估要考虑实际用水水平、产业结构、节水工艺和水平衡测试等众多评估因子。设评估因子的集合为 M ,则可根据评估因子的不同属性将 M 分解为 m 个独立的子系统^[17],且每个子系统分别有 $a_1, a_2, \dots, a_m$ 个独立的评估因子。设第 i 子系统中第 j 个评估因子的评分值为 x_{ij} ,则第 i 子系统中 a_i 个评估因子的合理性评分情况可用向量 $\mathbf{x}_i$ 表示:

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ia_i})^T \quad (1)$$

根据用水定额合理性的优劣程度,设这一层次划分有 t 个评估等级。评估等级标准以向量 $\mathbf{v}$ 来表示:

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_t)^T \quad (2)$$

每个子系统分别以一定的隶属度 u 隶属于某一

评估等级,第 i 子系统的隶属度可用模糊向量 $\mathbf{u}_i$ 表示:

$$\mathbf{u}_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{it})$$

其中

$$\sum_{l=1}^t u_{il} = 1, u_{il} \geq 0 \quad (3)$$

由于每个工业用水定额合理性影响因子对评估结果的影响程度不同,因此需要根据其影响的相对重要性赋予不同的权重,以客观反映各评估的相对重要性。评估因子的权重向量 $\mathbf{w}_i$ 表示:

$$\mathbf{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ia_i})$$

其中

$$\sum_{j=1}^{a_i} w_{ij} = 1 \quad (0 \leq w_{ij} \leq 1) \quad (4)$$

于是第 i 子系统的评估因子的评分值向量 $\mathbf{x}_i$ 与第 l 等级的差异可用考虑了影响权重后的广义距离来表达:

$$d|\mathbf{x}_i, \mathbf{v}| = \sum_{j=1}^{a_i} |w_{ij}(x_{ij} - v_l)| \quad (5)$$

为了更好地表达第 i 子系统评估因子的分值与评估标准各等级之间的差异,在模糊理论中,可将隶属度定义为权重。为得到最优分级向量,取目标函数为第 i 子系统的评估因子分值向量与各等级标准之间的加权距离和最小,即以第 i 子系统与各等级标准之间的加权距离和最小为目标函数来优选第 i 子系统评估因子隶属于各等级的隶属度,即:

$$\begin{aligned} \min & \left(\sum_{l=1}^t u_{il} \cdot d|\mathbf{x}_i, \mathbf{v}| \right) = \\ & \min \left\{ \sum_{l=1}^t u_{il} \left[\sum_{j=1}^{a_i} (w_{ij} |x_{ij} - v_l|) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_{l=1}^t u_{il} = 1 \quad (u_{il} \geq 0)$$

线性优化求解得到第 i 子系统隶属于第 l 等级的隶属度:

$$u_{il} = \frac{1}{\left[\sum_{j=1}^{a_i} (w_{ij} |x_{ij} - v_l|) \right] \left[\sum_{l=1}^t \frac{1}{\sum_{j=1}^{a_i} (w_{ij} |x_{ij} - v_l|)} \right]} \quad (7)$$

最大隶属度 $\max(u_{il})$ 所对应的等级便为第 i 子系统的评估等级。这里隶属度 u_{il} 可以理解为概率数,即相当于第 i 子系统的合理性评分值 $\mathbf{x}_i$ 属于第 l 等级的概率。于是可求得 i 子系统的合理性评分期望值 x_{ia_i} :

$$x_{ia_i} = \sum_{l=1}^t u_{il} v_l \quad (8)$$

式中 t 为评判等级数。由式(8)便可以求得这一层次的 m 个子系统的合理性评分值。

这 m 个子系统便成为高一层次的评判对象,这

一层次的模糊优化等级评价方法完全与上相同,故可用式(7)求得这一层次各子系统隶属于各等级的隶属度。如果这一层为最高层次,取其隶属度向量中最大的那个隶属度所对应的等级便为用水定额合理性评估的等级。若这一层不为最高层,其隶属度向量便是更高一层次的模糊优化等级评价的依据,逐层类推,算到最高层次时隶属度向量中最大的隶属度所对应的等级即为用水定额合理性评估的等级。

2 实例分析

2.1 研究区概况

DB36/T 420—2011《江西省工业企业主要产品用水定额标准》包括 34 个工业大类,制订了 281 个工业产品用水定额标准,涵盖的工业类别用水量占工业总用水量的 90% 以上,覆盖范围较好。江西省主要工业用水行业包括高用水及高污染产业和地方特色产业两类。其中,高用水及高污染产业包括造纸、石化、纺织、金属冶炼及压延、火电、食品加工 6 类,用水量占工业总用水量的 86.7%;特色工业行业包括陶瓷和稀土 2 类,用水量占工业总用水量的 0.6%。

江西省工业用水占用水总量的 23.51%。随着技术水平的提升和产业结构的调整,工业用水量增加趋缓。江西省规模以上工业企业用水主要集中在重工业,特别是集中于钢铁、建材、化工、纺织、火电、造纸六大高耗水行业。各工业行业用水比例见图 1, 1999—2013 年地表水和地下水供用水量变化见图 2, 1999—2013 年水资源总量变化见图 3。

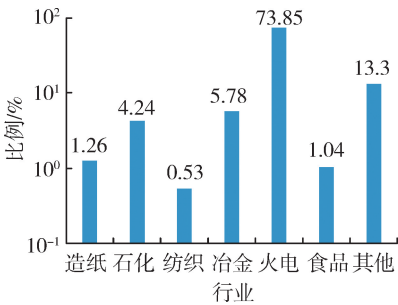


图 1 各工业行业用水比例

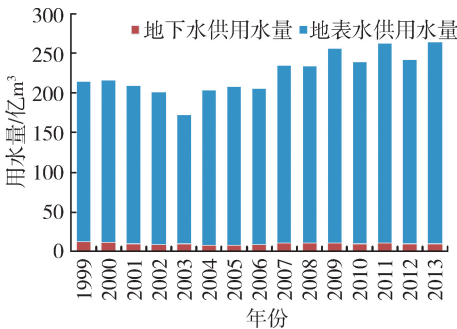


图 2 1999—2013 年供用水量变化

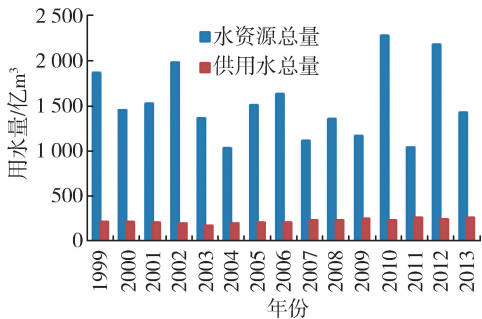


图 3 1999—2013 年水资源总量变化

2.2 层次结构

以江西省工业行业实际用水情况的调研资料为基础,结合《用水定额评估技术要求》和《项目节水评估技术导则》等相关标准的评估内容和标准,参考 2016 年最严格水资源管理制度考核内容、《重点工业行业用水效率指南》《江西省 2015 年水资源公报》等相关材料,分析其用水现状和水平,研究其影响和制约因素。以江西省工业用水定额合理性评估(T 层)为最高层次的评判对象,把行业划分和定额制(修)订情况、产业结构特点、工业企业规模和工艺情况以及与现状用水水平对比情况 4 个子系统作为第二层(C 层)评判对象,把第二层包含的各种因素(经筛选识别出)作为最低层(P 层)的评判对象,构建江西省现行工业用水定额合理性评估系统的层次结构,见表 1。

表 1 工业用水定额合理性评判的层次结构

江西省工业用水定额合理性评估 T	行业划分和定额制(修)订情况 C ₁	与工业行业划分标准适应程度 P ₁
		符合国家标准的定额数量与占比 P ₂
		相关节水政策出台情况 P ₃
		主要工业产品定额制(修)订情况 P ₄
	产业结构特点 C ₂	经济发展状况 P ₅
		产业供给因素 P ₆
		产业需求因素 P ₇
		环境影响 P ₈
	工业企业规模和工艺情况 C ₃	工业整体布局情况 P ₉
		工业企业资产、产值和人员数 P ₁₀
		企业用水重复使用率 P ₁₁
		工业企业用水管理水平 P ₁₂
		工业企业节水工艺投入使用情况 P ₁₃
	与现状用水水平对比情况 C ₄	水资源开发利用现状 P ₁₄
		企业水平衡测试技术与方法 P ₁₅
		企业水平衡测试成果 P ₁₆
		与国家取水定额标准要求对比 P ₁₇
		与典型企业实际定额值对比 P ₁₈
		与其他省份用水定额标准对比 P ₁₉
		重点工业产品用水水平 P ₂₀

2.3 合理性评估

根据评估的特性将用水定额的合理性划分为 7 个评估等级:极差、差、较差、一般、较好、好、极好,相应取值分别为 0、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.0。结合

江西省用水现状和 2016 年最严格水资源管理制度考核自查报告,根据 17 位参与 2016 年最严格水资源管理制度考核的专家和工作人员给出的 20 个评判因子的评分值和权重以及 4 个评价指标的权重,计算得到各位专家评判的平均值见表 2。

表 2 专家评分值及权重

C 层评价指标	权重	P 层评判因子	权重	评分值
C ₁	0.167 4	P ₁	0.375 8	23
		P ₂	0.223 9	64
		P ₃	0.107 2	87
		P ₄	0.293 1	54
C ₂	0.166 2	P ₅	0.154 6	72
		P ₆	0.154 0	65
		P ₇	0.458 8	75
		P ₈	0.232 6	38
C ₃	0.331 9	P ₉	0.052 6	63
		P ₁₀	0.053 2	60
		P ₁₁	0.226 9	52
		P ₁₂	0.233 9	43
C ₄	0.334 5	P ₁₃	0.433 4	68
		P ₁₄	0.038 4	64
		P ₁₅	0.142 5	27
		P ₁₆	0.258 0	25
		P ₁₇	0.088 7	65
		P ₁₈	0.150 8	17
		P ₁₉	0.062 6	42
		P ₂₀	0.259 0	29

根据评判因子层的评分值向量、权重向量和等级向量,求得 C 层各子系统(即各评价指标)的隶属度向量分别为: $\boldsymbol{u}_1 = (0.091\ 8, 0.115\ 8, 0.188\ 9, 0.239\ 8, 0.173\ 1, 0.105\ 5, 0.085\ 1)$ 、 $\boldsymbol{u}_2 = (0.057\ 0, 0.0674, 0.106\ 7, 0.183\ 6, 0.339\ 1, 0.1432, 0.1030)$ 、 $\boldsymbol{u}_3 = (0.057\ 3, 0.069\ 2, 0.118\ 9, 0.298\ 5, 0.274\ 0, 0.103\ 3, 0.078\ 8)$ 、 $\boldsymbol{u}_4 = (0.110\ 1, 0.162\ 0, 0.377\ 9, 0.152\ 7, 0.088\ 7, 0.058\ 5, 0.050\ 0)$ 。计算得到 C 层次 4 个评估指标的等级期望值分别为 0.489 4、0.599 8、0.555 4、0.370 7。

由此可见,行业划分和定额制(修)订情况 C₁ 的最大隶属度为 0.239 8,所属等级为一般,其期望值为 0.489 4,介于一般和较差之间;产业结构特点 C₂ 的最大隶属度为 0.339 1,所属等级为较好,其期望值为 0.599 8,介于一般和较好之间;工业企业规模和工艺情况 C₃ 的最大隶属度为 0.298 5,所属等级为一般,其期望值为 0.555 4,介于一般和较好之间;现状用水水平对比情况 C₄ 的最大隶属度为 0.377 9,所属等级为较差,其期望值为 0.370 7,接近较差等级值。

将 C 层各评估指标的等级期望值作为其评分值,根据评估指标层的评分值向量、权重向量和等级向量,求得江西省工业用水定额合理性评估总体的

隶属度向量为 $\boldsymbol{u} = (0.064\ 7, 0.081\ 3, 0.167\ 0, 0.396\ 4, 0.151\ 0, 0.077\ 3, 0.062\ 2)$,进而求得江西省工业用水定额合理性的总期望值为 0.494 0。

由此可见,江西省工业用水定额总体评价的最大隶属度为 0.396 4,所属等级为一般,数学期望值小于 0.5,表明江西省现行工业用水定额的合理性属于一般,稍偏向较差。由于隶属度向量在该模型研究中的数学意义是各等级的概率分布,则江西省现行工业用水定额的合理性属于一般的概率为 39.64%,属于较好的概率为 15.10%,属于较差的概率为 16.70%,属于好的概率为 7.73%,属于差的概率为 8.13%。

江西省现行工业用水定额的合理性一般,稍偏向较差,主要表现在与现状用水水平对比,江西省现行工业用水定额值与典型企业实际定额值对比明显偏高,其评分值仅为 17。表 3 为江西省部分工业用水定额与典型企业实际用水定额值对比情况,可见与企业实际用水水平对比,这些定额标准明显偏高,其中,江西省定额标准远大于啤酒制造、普通钢、电解铝、包装纸和原油加工等产品的实际用水定额,浮动均超过了 40%,合理性较差,难以在水资源管理中发挥作用,与本文研究结果相一致。

表 3 江西定额标准与典型企业实际定额值对比

行业	产品(指标)	单位	江西省标准 (用水定额)	企业实际用水定额	实际与标准对比/%
火电、循环冷却	≥600MW	m ³ /MWh	3.84	1.9	-50.31
啤酒制造	啤酒	m ³ /kL	9.5	5.1	-46.32
钢铁联合	普通钢	m ³ /t	16	4.65	-70.94
金属冶炼、	电解原铝液、	m ³ /t	127	18.5	-85.4
电解铝	重熔用铝锭				
造纸	包装纸	m ³ /t	50	16.9	-66.2
石化、 石油炼制	原油加工	m ³ /t	1.7 (燃料型)	0.48	-71.18
			2.0		
			(润滑型)		

3 结 语

本文基于系统层次模糊优化模型评估江西省工业用水定额的合理性,结果表明将系统层次模糊优化模型用于用水定额的合理性评估是一条可行的途径。

参考文献:

[1] 孙婷,张雨,邵芳,等.我国工业用水定额理论与应用初探[J]. 中国水利, 2015 (23): 46-48. (SUN Ting, ZHANG Yu, SHAO Fang, et al. Theory and application on quota of industrial water use in China [J]. China Water Conservancy, 2015 (23): 46-48. (in Chinese))

(下转第 77 页)

aqueous phenanthrene and mercury removal [J].
 Bioresource Technology,2015 ,196:355.

[38] TANG J C,LYU H H,GONG Y Y,et al. Preparation and characterization of a novel graphene /biochar composite for aqueous phenanthrene and mercury removal [J].
 Bioresource Technology,2015 ,196:355-363.

[39] MISHRA A K, AROCKIADOSS T, RAMAPRABHU S. Study of removal of azo dye by functionalized multi walled carbon nanotubes [J]. Chemical Engineering Journal, 2010,162(3) :1026-1034.

(收稿日期:2018-09-21 编辑:彭桃英)

(上接第 51 页)

[2] 周申蓓,刘亚灵,郑士鹏,等. 工业用水量测算方法及应用[J]. 水利经济,2017,35(1) :40-44. (ZHOU Shenbei, LIU Yaling,ZHENG Shipeng,et al. Calculating method for amount of industrial water use and its application [J]. Journal of Economics of Water Resources,2017,35(1) :40-44. (in Chinese))

[3] 彭岳津,卞荣伟,邢玉玲,等. 我国用水总量确定的方法与结果[J]. 水利经济,2018,36(2) :36-43. (PENG Yuejin,BIAN Rongwei,XING Yuling,et al. Method for determining total water consumption in China and discussion about its results [J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(2) :36-43. (in Chinese))

[4] 贾绍凤,张士锋,王浩. 用水合理性评价指标探讨[J]. 水科学进展,2003(3) :260-264. (JIA Shaofeng,ZHANG Shifeng,WANG Hao. Study on water rationality evaluation index [J]. Advances in Water Science,2003(3) :260-264. (in Chinese))

[5] 黄燕,马志鹏,肖淳. 海南省城镇生活用水定额合理性评估[J]. 人民珠江,2015,36(5) :126-130. (HUANG Yan,MA Zhipeng,XIAO Chun. Assessment of the rationality of urban domestic water consumption quota in Hainan Province [J]. Pearl River,2015,36(5) :126-130. (in Chinese))

[6] 张丽,张云,武亚菊,等. 三亚市工业用水定额评估与修订分析[J]. 人民珠江,2011,32(1) :70-72. (ZHANG Li,ZHANG Yun,WU Yaju,et al. Assessment and revision analysis of industrial water quota in Sanya [J]. Pearl River,2011,32(1) :70-72. (in Chinese))

[7] 韩云. 基于多指标综合评价方法的吉林省用水定额应用研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2015.

[8] 施胜利. 上海市用水定额体系评估初步研究[D]. 上海:华东师范大学,2017.

[9] 刘紫薇. 六省区农业用水定额分析及评估[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.

[10] 焦军. 黄河流域火电行业用水定额合理性评估应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.

[11] 赵博,李趋,张勤,等. 基于层次分析与模糊综合评价的辽宁省《行业用水定额》评价机制[J]. 水利水电科技进展,2013,33(1) :45-48. (ZHAO Bo,LI Qu,ZHANG Qin,et al. Evaluation of industry water quota in Liaoning Province based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(1) :45-48. (in Chinese))

[12] 李奎,邢玉玲,谭炳卿,等. 基于云模型的黄河流域火电行业用水定额评估[J]. 人民黄河,2017,39(5) :64-68. (LI Kui,XING Yuling,TAN Bingqing,et al. Evaluation of thermal power industry water quota in the Yellow River basin based on cloud model [J]. Yellow River,2017,39(5) :64-68. (in Chinese))

[13] 邓敏慧,周研来,桑连海. 长江流域火电工业取用水定额多目标评价分析[J]. 长江科学院院报,2016,33(5) :23-27. (DENG Minhui,ZHOU Yanlai,SANG Lianhai. Multi-objective evaluation of water intake quantity and quota for fossil-fuel power stations in Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2016,33(5) :23-27. (in Chinese))

[14] 李祚泳. 投影寻踪技术及其应用进展[J]. 自然杂志,1997(4) :224-227. (LI Zuoyong. Projection pursuit technology (PPT) and its progress of application [J]. Journal of Nature,1997(4) :224-227. (in Chinese))

[15] 李如意,束龙仓,鲁程,等. 济宁市水资源承载能力评价方法的应用与对比[J]. 水资源保护,2018,34(6) :65-70. (LI ruyi,SHU Longcang,LU Chengpeng,et al. Application and comparison of water resources carrying capacity evaluation methods in JING City [J]. Water Resources Protection,2018,34(6) :65-70. (in Chinese))

[16] 陈守煜,赵瑛琪. 系统层次分析模糊优选模型[J]. 水利学报,1988(10) :1-10. (CHEN Shouyu,ZHAO Yingqi. The fuzzy optimum selecting model of system hierarchy analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988(10) :1-10. (in Chinese))

[17] 刘曾美,陈兰. 水电工程环境影响评价系统层次模糊优化模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),1998(8) :86-90. (LIU Zengmei,CHEN Lan. A system hierarchy fuzzy optimization model for hydropower project EIA [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science),1998(8) :86-90. (in Chinese))

[18] 史珍,吴凤平,张陈俊. 基于 PVAR 模型和 VAR 模型的工业用水与工业经济增长关系研究[J]. 水利经济,2018,36(4) :7-13. (SHI Zhen,WU Fengping,ZHANG Chenjun. Relation between industrial water use and economic growth based on PVAR model and VAR model [J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(4) :7-13. (in Chinese))

(收稿日期:2018-10-04 编辑:王 芳)