

基于模糊层次分析法的大型水利枢纽效益评估

于永强¹, 沙晓军², 刘俊¹, 徐慧¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江阴市水资源管理办公室, 江苏 江阴 214400)

摘要: 选定20项效益相关指标, 基于模糊层次分析法构建大型水利枢纽效益评估模型。以南水北调东线工程江都水利枢纽为例, 考虑强调生态环境情景下和正常情景下的江都水利枢纽综合效益情况。研究结果表明: 江都水利枢纽经济效益、社会效益、生态环境效益和综合效益的级别特征值都在4.2以上, 效益显著。在冲淤保港、提高绿化覆盖率、提高当地知名度、防治自然灾害方面的效益尤为突出。对准则层权重分配进行扰动, 综合效益特征值仅相差1.3%, 表明准则层权重分配对综合效益评估结果影响较小。

关键词: 模糊层次分析法; 综合效益评估; 评价模型; 江都水利枢纽

中图分类号: TV61 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)03-0154-06

Benefit assessment of large hydro – junction project based on improved FAHP

YU Yongqiang¹, SHA Xiaojun², LIU Jun¹, XU Hui¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098;

2. Jiangyin Water Management Office, Jiangyin 214400, China)

Abstract: The paper selected 20 benefit indicators relating to economy, society, and ecology. It used improved FAHP to build a comprehensive evaluation model for large hydro – junction project. Taking Jiangdu hydro – junction for example, it thought the comprehensive benefit situation of Jiangdu hydro – junction project under the scenarios of ecological environment and normal situation. The results show that Jiangdu hydro – junction has notable benefit, all of the level eigenvalues of economy, society and ecology environment benefits are above 4.2. The benefits in protecting port, improving green coverage, increasing local visibility and preventing natural disaster are especially outstanding. The eigenvalues of comprehensive benefit only changes by 1.3% through disturbing perturbing layer weight distribution, which indicated that the weight distribution of rule layer has little effect on the assessment results of comprehensive efficiency.

Key words: FAHP; comprehensive benefits evaluation; evaluation model; Jiangdu hydro – junction

1 研究背景

随着社会经济的发展, 大型水利枢纽不仅带来了经济效益, 还产生越来越重要的生态环境效益和社会效益。越来越多的专家学者开始对其综合效益进行探讨分析, 鉴于影响水利工程综合效益的因素很多, 这些因素又没有统一的衡量标准, 对水利工程综合效益进行评价是一项复杂的工作。国内外很多专家学者对大型水利工程的社会、经济和生态影响进行了较多研究探讨, 但对于大型水利枢纽效益评

价研究成果较少, 且大多只针对其中某一方面展开^[1-5]。目前对于大型工程经济效益评价常见的评价方法有: 功效评分法、综合指数法、层次分析法、模糊层次分析法等, 模糊层次综合评价法在应用中从兼容度和差异度的角度来说具有最好的代表性和评价效果^[6]。传统1~9级判断矩阵标度赋值与语言习惯不协调, 易导致一致性错误和结论矛盾。将具有良好判断传递性和评价合理性的指数标度法引入模糊层次分析法, 有利于给出更准确的评价^[7-8]。利用模糊层次分析法(FAHP)对江都大型水利枢纽

收稿日期: 2016-01-22; 修回日期: 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471015)

作者简介: 于永强(1992-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向为城市防洪与排水。

通讯作者: 刘俊(1968-), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市防洪与排水。

工程进行综合效益评估不仅可以摸清江都水利枢纽效益情况,还可以论证 FAHP 法对于大型水利枢纽效益评估的适用性,对充实水利工程效益评估理论体系有一定研究意义。

2 模糊层次综合评价法

模糊层次分析法将研究对象看作一个系统整体,既不拘泥于复杂的数学推导,又不被行为、逻辑、推理所约束,而是灵活地将定性和定量的方法有机结合起来^[9]。对解决庞大复杂的、难以量化的模糊工程评估问题有很好的效果。其一般性运用步骤如下:

步骤 1:确定指标集和评价集。指标集指影响评价对象的各种指标所构成的集合,也称作因素集,表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。其中,各指标因素 u_i 通常具有不同程度的模糊性^[3]。评价集即为不同评价等级的集合,用 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 表示,例如 $T = \{\text{差, 低, 中, 良, 优}\}$ 。

步骤 2:确定判断矩阵及其特征向量。由于不同指标对评估目标有不同的影响程度,因而需要在不同指标之间两两对比。传统的矩阵标度在传递性和合理性上存在不足,可能导致一致性检验的错误,本次研究采用的指数形式矩阵标度可以减少不同层传递过程中的偏差^[9]。改进的判断矩阵标度如表 1 所示。

表 1 判断矩阵标度及其含义^[10]

标度	含义
a^0	1 表示两个目标相比,同等重要
a^2	1.7321 表示两个目标相比,一个目标比另一个稍微重要
a^4	3 表示两个目标相比,一个目标比另一个目标明显重要
a^6	5.1966 表示两个目标相比,一个目标比另一个目标强烈重要
a^8	9 表示两个目标相比,一个目标比另一个目标极端重要

通过同层指标之间的两两对比,可以得到该层的判断矩阵 A_{ij} 如下:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j-1} & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j-1} & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{i-11} & a_{i-12} & \cdots & a_{i-1,j-1} & a_{i-1j} \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij-1} & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

将判断矩阵各行求算数平均值,然后进行归一化处理,求出特征向量,即模糊子集 $\bar{\omega}_i$,和判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 。由于判断矩阵是同层指标之间两两比较相对重要性得到的,人类认知的有限性和客观世界的复杂性以及缺乏可靠参照物可能会导致判断矩阵缺乏一致性。需对判断矩阵的一致性进行检验^[11]。

步骤 3:确定隶属度。依据客观实际情况,建立具有模糊性的隶属度函数及相应的隶属度评价标准。将大型水利枢纽的评价基本数据资料代入评价标准,得出各个指标的隶属度。将各个指标的隶属度整合可得到模糊矩阵 $R^{[12]}$ 。

步骤 4:进行层次模糊综合评价。按照准则层将指标集分成若干个子集,针对每个子集进行层次模糊综合评价。由于模糊子集 $\bar{\omega}_i$ 和模糊矩阵 R_i 均已知时,即可作模糊变换进行综合评价^[13-14],如式(2)所示:

$$\begin{aligned} B_i &= \bar{\omega} \times R_i \\ &= (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n) \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \\ &= (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}) \end{aligned} \quad (2)$$

步骤 5:进行效益分级评价。整合不同准则层的层次评价模型得到综合评价矩阵 W 如式 3:

$$W = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

将综合效益进行分级,级别取 5 级,即 $h = (\text{非常大, 很大, 一般, 较小, 非常小}) = (5, 4, 3, 2, 1)^T$,根据式(4)求得综合效益的级别特征值并对大型水利枢纽综合效益加以分析。

$$H = W \times h \quad (4)$$

3 江都水利枢纽效益评估

江都水利枢纽自建成以来发挥了巨大的灌溉、排涝、泄洪、通航、发电等综合效益。为摸清项目效益情况,提高工程管理水平,充实水利工程综合效益评价理论体系,对江都水利枢纽进行效益评估是必要的。

在江都水利枢纽工程效益综合评价中,涉及的影响因素和指标较多,且这些指标间通常又分为不

同的类别和层次,关系比较复杂。对比国内外各种评价方法,模糊层次分析法能较好处理多层次、各类别间的复杂关系^[3],因此本次采用模糊层次分析法进行评价。

3.1 江都水利枢纽概况

江都水利枢纽工程位于中国江苏省扬州市江都区境内,是中国南水北调东线工程和江苏省江水东引北调工程的起点,同时也是治淮工程的重要节点。江都水利枢纽工程位于京杭大运河、新通扬运河和淮入江尾闾芒稻河的交汇处,于1963年投入运行,接着又投资 1.7×10^8 元兴建了二、三、四站及其配套工程,是南水北调工程的第一站。4座抽水站共装有大型立式轴流泵机组33台套,装机容量55 800 kW,设计抽水能力 $400 \text{ m}^3/\text{s}$,最大抽水能力 $508 \text{ m}^3/\text{s}$,是目前我国乃至远东地区规模最大的电力排灌工程。截至2013年,江都水利枢纽工程累计抽引江水 $2\,300 \times 10^8 \text{ m}^3$,安全泄洪排涝 $9\,300 \times 10^8 \text{ m}^3$,共抽引江水北送 $1\,200 \times 10^8 \text{ m}^3$,抽排涝水 $350 \times 10^8 \text{ m}^3$,自流引江水东送 $1\,100 \times 10^8 \text{ m}^3$,泄洪 $9\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,为当地国民经济和社会事业的发展以及人民生命财产的安全做出了巨大贡献。

3.2 效益评估指标体系

根据江都水利枢纽实际发挥的功能功效,遵从综合性、科学性、可操作性的原则,采用定性与定量相结合的方法,从经济效益、生态环境效益、社会效益为主要评价对象。综合考虑到资料的可靠性、可量化性及可比性,本次共选取20类指标作为大型水利枢纽效益评估依据。具体指标体系结构如图1所示。



图1 指标体系结构

3.3 判断矩阵及特征向量

各个指标的权重采用层次分析法来确定,通过不同的隶属关系,分为3个层次,需要准则层和指标层判断矩阵将层与层之间的评价关系联系起来。

(1)准则层判断矩阵及其特征向量。选用层次分析法确定各层的权重,权重大小能够反映不同指标在评价体系中的相对重要程度。本文准则层判断矩阵的确定分两种情景考虑:

权重情景一:随着近年来江都水利枢纽工程生态环境效益越来越重要,设定生态环境效益比经济效益稍微重要,经济效益与社会效益、生态环境效益与社会效益同等重要,目标层指标经济效益,生态环境效益和社会效益的权重分别为0.2613,0.4124,0.3309。

权重情景二:考虑到江都水利枢纽工程自建成以来发挥了重要的经济、生态环境和社会效益,设定目标层指标集A中的经济效益、生态环境效益和社会效益的权重分别为0.3333,0.3333,0.3333。

(2)指标层判断矩阵及其特征向量。指标层的权重确定采用层次分析法,构建判断矩阵。再求解矩阵的特征向量后,获得各指标权重计算结果见表2-4。

对表2~表4中结果的一致性检验采用CR(判断矩阵的随机一致性比率)指标,当 $CR < 0.1$ 时,认为各指标相对上级指标具有较满意的一致性并接受该分析结果,否则要对各指标的权重系数重新修正。计算出的CR值分别为0.0432,0.0058和0.0473,均满足一致性的要求,可以认为各评价因子的权重取值较为合适^[6-7]。

3.4 隶属度及模糊运算

本文确定综合评价结果的评语集时,将综合效益进行分级,级别取5级,即 $h = (\text{非常大}, \text{很大}, \text{一般}, \text{较小}, \text{非常小}) = (5, 4, 3, 2, 1)^T$ 。对各个指标进行评价打分时,依据客观实际情况,选用半梯形分布函数建立相应的隶属度评价标准。将江都水利枢纽的评价基本数据资料代入评价标准,得出各个指标的隶属度,2012年江都水利枢纽效益评估基本数据如表5所示。

将之前得到的指标层权重与指标层隶属度进行一级模糊运算,得到准则层的隶属度,详情如表6所示。

根据设定的权重情景和准则层隶属度进行二级模糊运算,得到目标层隶属度如表7所示。

表2 经济效益指标权重

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	指标层权重
C_1	1.0000	1.3161	1.7321	1.3161	0.5773	2.2796	3.0000	3.9486	0.1900
C_2	0.7598	1.0000	2.2796	1.7321	0.7598	3.0000	3.9486	5.1966	0.1965
C_3	0.5773	0.4387	1.0000	0.7598	0.3333	1.3161	1.7321	2.2796	0.0718
C_4	0.7598	0.5773	1.3161	1.0000	0.4387	1.7321	2.2796	3.0000	0.1074
C_5	1.7321	1.3161	3.0000	2.2796	1.0000	3.9486	5.1966	6.8395	0.3305
C_6	0.4387	0.3333	0.7598	0.5773	0.2533	1.0000	1.3161	1.7321	0.0483
C_7	0.3333	0.2533	0.5773	0.4387	0.1924	0.7598	1.0000	0.7598	0.0277
C_8	0.2533	0.1924	0.4387	0.3333	0.1462	0.5733	1.3161	1.0000	0.0277

表3 生态环境效益指标权重

B_2	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	指标层权重
C_9	1.0000	1.3161	1.0000	1.0000	1.7321	1.3161	0.2252
C_{10}	0.7598	1.0000	0.5773	0.7598	1.0000	1.0000	0.0983
C_{11}	1.0000	1.7321	1.0000	1.0000	1.7321	1.7321	0.2577
C_{12}	1.0000	1.3161	1.0000	1.0000	1.7321	1.7321	0.2409
C_{13}	0.5773	1.0000	0.5773	0.5773	1.0000	1.0000	0.0859
C_{14}	0.7598	1.0000	0.5773	0.5773	1.0000	1.0000	0.0919

表4 社会环境效益指标权重

B_3	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}	指标层权重
C_{15}	1.0000	1.0000	0.7598	0.7598	1.3161	0.7598	0.1125
C_{16}	1.0000	1.0000	0.5773	0.7598	1.3161	0.3333	0.0902
C_{17}	1.3161	1.7321	1.0000	1.7321	1.7321	1.0000	0.2756
C_{18}	1.3161	1.3161	0.5773	1.0000	1.7321	0.4398	0.1418
C_{19}	0.7598	0.7598	0.5773	0.5773	1.0000	0.5773	0.0650
C_{20}	1.3161	3.0000	1.0000	2.2796	1.7321	1.0000	0.3149

表5 2012年江都水利枢纽效益评估基本数据

指标名称	指标值	指标名称	指标值
灌溉效益/ 10^8 m^3	25.4	水生生物多样性	1.96
供水效益/ 10^8 m^3	20.6	增加就业/(人 $\cdot 10^{-8}$ 元)	579
发电效益/ 10^8 m^3	0.57	每千人医生数/(人 $\cdot 10^{-3}$ 人)	4.88
航运效益/ 10^8 m^3	4.10	每千人病床数/(张 $\cdot 10^{-3}$ 人)	3.66
防洪排涝效益/ 10^8 m^3	34.5	每千人教师数/(人 $\cdot 10^{-3}$ 人)	7.61
水产养殖效益/ 10^8 m^3	5.59	提高当地知名度/%	98
旅游效益/ 10^4 元	2344	项目支持率/%	100
土地增值效益/(元 $\cdot \text{m}^{-2}$)	300	公众参与度/%	0.64 - 0.81
保障流域河道水位/m	0.82	人均可支配收入/元	22452
净化水体/ 10^4 元	2455.2	城市化率/%	52.9
冲淤保港/ 10^8 m^3	28.432	人均全社会用电量/(kW $\cdot \text{h}\cdot \text{人}^{-1}\cdot \text{a}^{-1}$)	2830.06
提高绿化覆盖率/%	90	恩格尔系数/%	36.2
保证地下水位/%	1.83	防治自然灾害/(a $\cdot \text{次}^{-1}$)	7.0

表6 江都水利枢纽综合效益评估一级模糊运算结果

准则层	指标层	指标层隶属度	指标层权重	准则层隶属度
B_1	C_1	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.1900	(0.72,0.06,0.05,0.07,0.10)
	C_2	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.1965	
	C_3	(0.00,0.00,0.00,0.14,0.86)	0.0718	
	C_4	(0.00,0.55,0.45,0.00,0.00)	0.1074	
	C_5	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.3305	
	C_6	(0.00,0.00,0.12,0.88,0.00)	0.0483	
	C_7	(0.00,0.00,0.00,0.65,0.35)	0.0277	
	C_8	(0.00,0.00,0.00,0.00,1.00)	0.0277	
B_2	C_9	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.2252	(0.85,0.05,0.10,0.00,0.00)
	C_{10}	(0.46,0.54,0.00,0.00,0.00)	0.0983	
	C_{11}	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.2577	
	C_{12}	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.2409	
	C_{13}	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.0859	
	C_{14}	(0.00,0.00,0.96,0.04,0.00)	0.0919	
B_3	C_{15}	(0.00,0.00,0.57,0.43,0.00)	0.1125	(0.78,0.09,0.08,0.05,0.00)
	C_{16}	(0.52,0.48,0.00,0.00,0.00)	0.0902	
	C_{17}	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.2756	
	C_{18}	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.1418	
	C_{19}	(0.00,0.68,0.32,0.00,0.00)	0.0650	
	C_{20}	(1.00,0.00,0.00,0.00,0.00)	0.3149	

表7 江都水利枢纽综合效益评估二级模糊运算结果

目标层	准则层	准则层隶属度	准则层权重	目标层隶属度
权重情景1 情况下 的 A_1	B_1	(0.72,0.06,0.05,0.07,0.10)	0.1900	(0.80,0.07,0.08,0.03,0.02)
	B_2	(0.85,0.05,0.10,0.00,0.00)	0.1965	
	B_3	(0.78,0.09,0.08,0.05,0.00)	0.0718	
权重情景2 情况下 的 A_1	B_1	(0.72,0.06,0.05,0.07,0.10)	0.2252	(0.78,0.07,0.08,0.04,0.03)
	B_2	(0.85,0.05,0.10,0.00,0.00)	0.0983	
	B_3	(0.78,0.09,0.08,0.05,0.00)	0.2577	

根据式4,求得江都水利枢纽综合效益、经济效益、生态环境效益和社会效益各自的级别特征值,如表8所示。

表8 江都水利枢纽效益特征值

江都水利枢纽效益	效益隶属度向量	级别特征值
权重情景1下综合效益	(0.80,0.07,0.08,0.03,0.02)	4.59
权重情景2下综合效益	(0.78,0.07,0.08,0.04,0.03)	4.53
经济效益	(0.72,0.06,0.05,0.07,0.10)	4.22
生态环境效益	(0.85,0.05,0.10,0.00,0.00)	4.75
社会效益	(0.78,0.09,0.08,0.05,0.00)	4.59

3.5 效益评估结果分析

江都水利枢纽的综合效益级别特征值在生态环境效益稍微重要的权重方案和等权重方案下分别为4.59,4.53,二者结果均高于4.5,介于效益非常大与效益很大之间,表明江都水利枢纽工程的综合效益是非常可观的。在两种权重情景下,综合效益特征值相差1.3%。

准则层经济效益、生态环境和社会效益的级别特征值分别为4.22、4.75和4.59,表明江都水利枢纽工程各单项效益也很高。其中江都水利枢纽发挥

的生态环境效益最高,其次是社会效益,最后是经济效益。

结合现状和未来趋势设定了2种权重情景,对经济、生态环境和社会效益进行了综合评估。对可以具体量化的经济效益进行了定量计算。根据2012年江都水利枢纽经济效益(由表5中前7项累加得出,为 117.2×10^8 元)和经济效益占综合效益的不同权重(0.2613和0.3333),得出江都水利枢纽综合效益分别为 351.5×10^8 元(强调生态环境情景下)和 272.8×10^8 元(正常情景下)。

4 结 论

(1)应用模糊层次分析法对江都水利枢纽综合效益进行评估,2012年综合效益在 $272.8 \times 10^8 \sim 351.5 \times 10^8$ 元,研究表明其各项效益特征值均在4.2以上,综合效益显著。

(2)江都水利枢纽发挥的生态环境效益最显著,其次是社会效益和经济效益。生态环境效益中保障流域河道水位、冲淤保港、提高绿化覆盖率和社会效益中提高当地知名度、项目支持率与公众参与度、防治自然灾害的效果尤为突出。

(3)对目标层的两个权重情景进行计算的结果表明,江都水利枢纽的综合效益特征值分别为4.59和4.53,表明准则层的权重分配对综合效益的评估结果影响较小。

参考文献:

- [1] 江高. 模糊层次综合评价法及其应用[D]. 天津:天津大学,2005.
- [2] 陈午,许新宜,王红瑞,等. 基于序关系法的北京市水资

源可持续利用模糊综合评价[J]. 水利经济,2014(2):19-24.

- [3] 李敏. 基于AHP-DEA与多级模糊综合的提水灌溉工程效益评价[J]. 陕西水利,2012(3):165-167.
- [4] Naghadehi M Z, Mikaeil R, Ataei M. The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran[J]. Expert Systems with Applications, 2009,36(4):8218-8226.
- [5] 罗阳青. 基于模糊层次分析法的服役石拱桥健康评估研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [6] 李永,胡向红,乔箭. 改进的模糊层次分析法[J]. 西北大学学报(自然科学版),2005,35(1):11-12.
- [7] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学,2000,14(2):80-88.
- [8] 徐英俊,周一鸣. 探究城乡道路客运一体化评价指标[J]. 交通建设与管理,2011(6):76-77.
- [9] Li Bin. Evaluation on the risks of agricultural industrial chain based on FAHP: A case of regions inhabited by ethnic groups in Wuling Mountain [J]. Asian Agricultural Research, 2011,3(8):27-31.
- [10] 郑艳影. 改进的模糊层次分析法的研究及应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [11] 殷焕武,张宝柱. 城市投资环境综合评价方法研究[J]. 城市问题,2006(8):54-57.
- [12] 叶鲁彬,石向荣,梁军. 复杂故障判定的基于结构化残差的多层次分析法(英文)[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2011,19(3):462-472.
- [13] 黄文杰,傅砾,肖盛. 采用改进模糊层次分析法的风速预测模型[J]. 电网技术,2010(7):164-168.
- [14] 周巍. 区域低碳经济评估指标体系构建及应用研究[J]. 电脑知识与技术,2011,7(17):4239-4242.