

基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价

杨子桐¹,黄显峰¹,方国华¹,叶健²,陆承璇¹

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2.江苏省水利厅,江苏南京 210029)

摘要:根据云模型相关概念,针对南水北调东线工程效益评价结果单一、指标评价存在随机性和模糊性的问题,构建了基于组合权重和改进云模型的综合评价方法,并参照有限区间理论进行改进。该方法将 G1 和改进 CRITIC 赋权法组合得到的权重与改进梯形云模型求解得到的指标隶属度相结合,实现对南水北调东线工程效益的综合评价。以南水北调东线一期江苏段为例,从成本分析和效益分析两方面对工程效益评价影响因素进行分类,构建了工程效益评价指标体系,包括固定资产投资、年运行费、流动资金、经济效益、社会效益、生态效益这 6 个方面,共 20 个指标,确定了各项指标对应不同等级的标准,验证了提出的南水北调东线一期江苏段工程效益评价体系与评价方法的有效性与适用性。

关键词:南水北调;效益评价;改进 CRITIC 赋权法;改进云模型

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)04-0060-07

Benefit evaluation of Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model// YANG Zitong¹, HUANG Xianfeng¹, FANG Guohua¹, Ye Jian², LU ChengXuan¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the related concepts of cloud model and the limited interval theory, the comprehensive evaluation method based on combination weight and improved cloud model is adopted to solve the problems of single result of benefit evaluation, randomness and fuzziness of index evaluation of the Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project. The method combines the weight obtained by G1 and improved CRITIC weight method with the index membership degree obtained by the improved trapezoidal cloud model to realize the comprehensive evaluation of the project benefits. Taking the first phase of the Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu as an example, the influencing factors of project benefit evaluation were classified from cost analysis and benefit analysis, and the engineering benefit evaluation index system was constructed, including six aspects of fixed investment, annual operation cost, working capital, economic benefit, social benefit and ecological benefit, containing a total of 20 indexes with determined hierarchical standards. The effectiveness and applicability of the proposed evaluation system and method for the Eastern Route of South-to-North Water Transfer Project in Jiangsu were verified.

Key words: South-to-North Water Transfer Project; benefit evaluation; improved CRITIC weight method; improved cloud model

南水北调东线工程涵盖设计、施工、运行等各项成本的重要基础设施,承担着供水、防洪、除涝、生态、航运等各方面效益发挥的职能^[1]。因工程规划、建设和达效周期较长,投资规模较大,供水目标多样,影响范围较广等特点,有必要针对其成本消耗和效益发挥进行合理评价,以监督和改善项目运行和管理,并对国家制定投资计划和协调投资比例关系提供参考。

因此,考虑成本和效益两方面矛盾协调的综合评价,对于项目进一步决策显得十分重要^[2]。

调水工程的效益评价是包含定性和定量指标的多层次复杂指标系统评价的问题,国内外的研究主要分为 3 个方面:经济影响,如 Yu 等^[3]针对 59 个大型调水工程的时空特性进行深入研究,分析了建设成本、调水成本、总能源消耗等经济型指标对调水

工程的可持续性地影响;社会影响,如 Fu 等^[4]从多区域、多用水部门之间供水权衡问题出发,建立了模糊多区域水资源规划两阶段管理模型,以实际工程为例分析了调水工程对社会中水资源分配的重要保障能力;生态环境影响,如 Zhang 等^[5]利用“水龄”的相关理论,研究了滇池调水工程的湖泊富营养化的程度和引水工程有效性发挥的问题,定量评价了引水工程对滇池水质的影响。总结来看,南水北调工程的效益评价应在考虑工程经济的基础上,重视其受社会与生态环境的影响,在指标体系确定的广度和评价方法选取的深度契合上做进一步研究。

然而,分析调水工程效益发挥是否满足预期要求的相关研究却鲜有报道。鉴于南水北调东线工程实际运行中各项指标评价隶属关系的模糊性以及定量、定性概念转化随机性的问题,而主客观赋权法能够很好确定定性指标和定量指标权重,以及梯形云模型对于相邻等级之间的指标隶属度的求解特性,本文根据南水北调东线工程效益评价影响因素的特点,构建多层次、多指标包含定性指标和定量指标的评价指标体系,采用组合权重的改进云模型评价方法进行评价模型的求解,最后以南水北调东线一期工程江苏段作为研究实例,验证评价体系及评价模型的适用性。

1 改进云模型理论

云模型是一种处理模糊问题的概念模型,已成功在多个领域得到应用^[6],而针对正态云的相关改进能更好地确定等级隶属关系^[7]。

1.1 云的基本概念

云模型根据样本的特性,主要通过云发生器的作用将样本转化 3 个数据特征,实现样本定性和定量之间的映射,但传统云模型对于存在多个元素肯定属于概念特性的描述不尽合理。根据南水北调东线工程效益评价的特点,其存在一定区间范围内的点肯定属于所属概念,且对于边界等级存在一定区间范围的点肯定隶属的情况,故本文在结合有限区间理论的基础上,对其隶属函数分布进行相应的改进^[8]。设 $U=\{x\}$ 是一个精确数值表示的定量集合, C 是 U 上的定性概念,在一定有限区间内,存在任意的定量元素组 $\{x\}$, 且 $\{x\}$ 存在 1 个稳定倾向的随机数 $\mu(x)=(0,1)$ 在定性概念 C 上的 1 次随机实现,其中^[9]:

$\mu:U\rightarrow[0,1],\forall \{x\}\in U,\{x\}\rightarrow\mu(x)$ (1)
 则 $\{x\}$ 在集合 U 上的分布称为云,每一个点 $(x,\mu$

$(x))$ 称为云滴,其云滴图像分布类似梯形,因而称为梯形云, $\{x\}$ 的区间则代表梯形云的期望区间 $[E_{x_1},E_{x_2}]$,正态云的本质为 $E_{x_1}=E_{x_2}$ 时特殊的梯形云。

1.2 数字特征

梯形云模型主要由期望区间 $[E_{x_1},E_{x_2}]$ ($E_{x_1}\leq E_{x_2}$)、熵 E_n 、超熵 H_e 这 4 个数字特征构成^[10]。 E_{x_1} 为定性概念的下边界位置, E_{x_2} 为定性概念的上边界位置; E_n 为定性概念描述论域区间的云滴取值范围; H_e 为熵的不确定性^[11]。

在南水北调东线工程效益评价过程中,为比较实际情况是否满足规划设计要求,常采用两者比值作为衡量是否满足的表述,如 $[C_{ij,\min},C_{ij,\max}]$ 具有双边约束的评价等级区间,其数字特征值可根据式(2)中梯形云模型的定义计算,而对于单边性质的边缘模糊区间形如 $[C_{ij,\max},+\infty)$ 和 $[0,C_{ij,\min}]$,其隶属度的表示已不再完全符合梯形云的分布特征,当评价值远离两端云的边缘值时,其概率分布应为确定度为 1 的均匀分布,以半升梯形云和半降梯形云描述表述^[12-13]。

$$\begin{cases} E_{x_1,j}=\frac{C_{ij,\max}+2C_{ij,\min}}{3} \\ E_{x_2,j}=\frac{2C_{ij,\max}+C_{ij,\min}}{3} \\ E_n=\frac{(C_{ij,\max}-C_{ij,\min})}{6} \\ H_e=k \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_{ij,\max},C_{ij,\min}$ 为第 i 个评价指标对应第 j 个评价等级的上限与下限; k 为根据经验给定的一个常数,可根据变量自身特点进行调整,本文取 0.000 1。

1.3 云发生器

云发生器是云模型实现定性和定量转变的关键,即利用数字特征 $N(E_{x_1},E_{x_2},E_n,H_e)$ 与云滴 $P(x_i,\mu_i)$ 进行互相转换的过程,分为正向云发生器和逆向云发生器 2 种^[14]。条件云模型作为一种特殊的正向云发生器,包括 X 云发生器和 Y 云发生器 2 种,可以根据已知特定条件来产生隶属度。根据有限区间理论概念,结合南水北调东线工程效益评价实际情况,当指标处于两端等级云均值之间的区间时,即效益发挥处于双边约束的评价等级区间,其隶属度计算满足梯形正态云分布;当指标远离两端等级云均值时,即效益发挥处于单边约束的评价等级区间,服从确定度为 1 的均匀分布,具体计算如式(3)。

$$\begin{cases} 1 & E_{x_1,ij} \leq x_i \leq E_{x_2,ij} \cup (0 \leq x_i \leq C_{ij,\min}) \cup (C_{ij,\max} \leq x_i \leq +\infty) \\ \mu_{ij}(x) = \exp\left[-\frac{(E'_{x_2} - E_{x_2})^2}{2E_n'^2}\right] & E_{x_2,ij} \leq x_i \leq C_{ij,\max} \\ \mu_{ij}(x) = \exp\left[-\frac{(E'_{x_1} - E_{x_1})^2}{2E_n'^2}\right] & C_{ij,\min} \leq x_i \leq E_{x_1,ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: μ_{ij} 为第*i*个评价指标对应第*j*个评价等级的隶属度; x_i 为第*i*个评价指标评价值; E'_n 为计算的正态随机数。

2 南水北调东线工程效益评价模型

2.1 组合权重法确定指标权重

考虑到指标体系中定性指标的确定需要专家评判的特点,且各个专家受自身能力水平、熟悉程度、个人偏好等多重因素的影响^[15];同时,南水北调东线工程效益评价问题是多层次、多指标相互作用的结果^[16]。由于传统 CRITIC 法在考虑信息量时使用标准差会受到指标的数量级与量纲差异的影响,本文在指标判别性的确定过程中引入变异系数概念以反映指标信息量的大小,冲突性则利用相关系数加以衡量,正相关系数越大,则权重越大,反之越小。具体地,本文采用 G1 法^[17]确定指标主观权重 ω'_j ,结合考虑相关性与信息量的改进 CRITIC 法^[18]确定指标的客观权重 w''_j :

$$w'_j = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^n \prod_{j=k}^n r_j} \quad (4)$$

$$w''_j = \frac{h_j}{\sum_{q=1}^n h_j} = \frac{v_i \sum_{q=1}^n (1 - \rho_{qm})}{\sum_{q=1}^n h_j} \quad (5)$$

$$w_j = \frac{\sqrt{w'_j w''_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{w'_j w''_j}} \quad (6)$$

式中: r_j 为相邻指标 x_j 与 x_{j-1} 的重要性之比; v_i 为变异系数; $(1-\rho_{qm})$ 为指标间信息独立性的行向量; h_j 为指标所包含信息的综合度量; w_j 为组合权重。

2.2 改进云模型计算指标等级隶属度

南水北调东线工程效益评价中各定量与定性指标值与划分的等级之间的对应关系存在模糊性与随机性,针对这种不确定性的隶属关系,梯形云模型通过定性定量转换能够很好的解决。本文在参考传统正态云理论的基础上^[19],分析了各类等级数据和各个表的理想值可得到对应状态的梯形云隶属函数,通过 X 云发生器和 Y 云发生器组成的单规则单条件梯形云发生器(图 1),计算各等级对应的云滴图,其中根据各项指标的特性,针对效益型指标的“不

利”等级、成本型指标的“有利”等级采用右半梯形云模型描述;效益型指标的“有利”等级、成本型指标的“不利”等级采用左半梯形云模型描述^[20]。

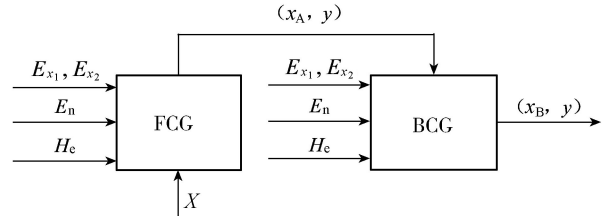


图 1 单条件单规则梯形云发生器

2.3 评价等级确定

南水北调东线工程效益评价等级确定需要结合指标权重与指标隶属度两方面确定:一方面根据改进云模型理论得到不同评价等级下的数字特征,读取各项指标值,得到南水北调东线工程中各项指标隶属于评价等级的隶属度;另一方面根据 G1 法和改进的 CRITIC 法确定各项指标的组合权重;最后由式(7)以级别特征值最大判定调水工程效益评价等级,具体流程如图 2 所示。

$$P = \sum_{i=j=1}^n \mu_{ij}(x) w_j \quad (7)$$

式中: P 为指标综合确定度; w 为指标组合权重。

3 南水北调东线一期江苏段效益评价

3.1 工程基本情况

南水北调东线工程是我国南水北调工程总体布局中的重要组成部分,自 2013 年一期工程通水以来,为经济社会发展发挥了巨大的作用。东线一期江苏段工程主要是利用、改造现有江水北调工程,并按规划要求开辟的新输水线路,通过 40 多年的努力,逐步建成了江都、淮安、淮阴、泗阳、刘老涧、皂河、刘山、解台、沿湖等 9 个梯级枢纽、16 座泵站,总装机容量 14.9 万 kW,总抽水能力 1 671 m³/s,总扬程 40 m,初步形成了工程体系,具有较强的代表性。工程为江苏省内供水、防洪、排涝、抗旱、环保等相关工作开展提供了坚实基础。由于东线一期江苏段工程实施阶段建设内容较可研阶段有所调整,调水沿线也陆续实施了水利、航运等其他工程,有关河道、蓄水湖泊的工程条件也发生了变化,工程沿线各县社会发展情况也有了重大变化,其社会经济发挥也有所变化,因此有必要进一步明确东线一期

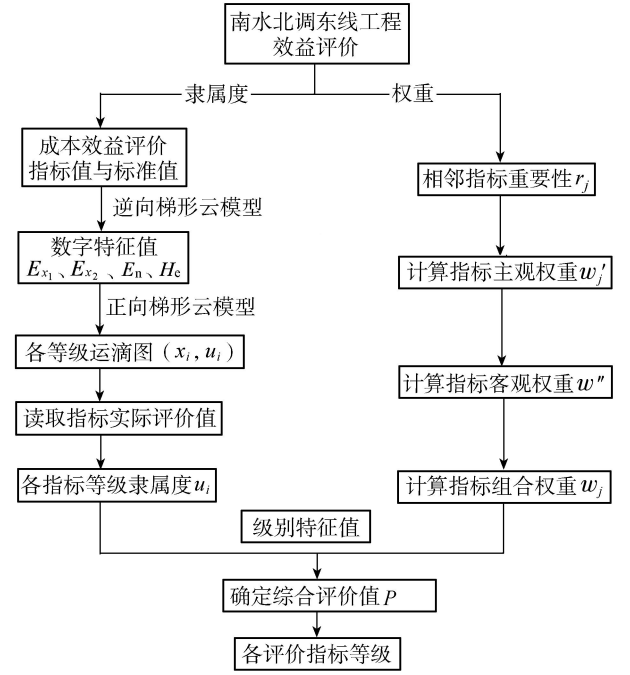


图2 改进云模型评价流程

江苏境内各项效益发挥,为南水北调后续工程规划决策水平和投资效益提供借鉴。

3.2 评价体系及评价标准

南水北调东线一期江苏段工程的效益评价体系的构建需从成本和效益两方面分别入手^[11],其中成本分析对照可行性研究报告中固定资产投资、年运行费和流动资金进行评价,效益分析依然按照调水工程效益评价的经济、社会和生态3个方面效益加以评价。为了增强对比性,采用实际情况与可研报告情况的比值作为定量指标;定性指标为社会保障效益C₁₇,辅助社会效益更准确地定量。

其中,实际成本消耗根据管理部门提供的相应资料,实际效益发挥按如下方法计算:生活供水效益由水价法计算得,总水价参考国家发改委制定的南水北调水单方水水价;工业供水效益、农业供水效益由分摊系数法计算得,每年工业万元产值取水量、实际灌溉面积、灌区内作物的增产量参考统计年鉴或者水资

源公报;航运效益由货运单价法计算得,通航后每年增加的货运量由江苏省南水北调办提供;防洪效益、除涝效益由减少损失法计算得,减淹面积、治理面积可按水利综合统计年报确定,综合单价采用灌溉效益计算中所分析的粮食、棉花及油料综合单价;生态效益采用能值分析法确定,能值货币比率采用6.98×10¹¹。

本文采用相对计量法(实际值/预测值),针对调水工程运行是否满足发展预期的角度,从而划分了5个等级,即不利、较不利、无影响、较有利、有利。参考《建设项目经济评价方法与参数》等相关规范及以南水北调东线一期江苏段工程运行实际情况^[12],指标的数值区间以可研报告中指标评价值的合理偏差范围划分。南水北调东线一期江苏段工程效益评价体系及等级标准如图3和表1所示,其中指标单位均为无量纲量。

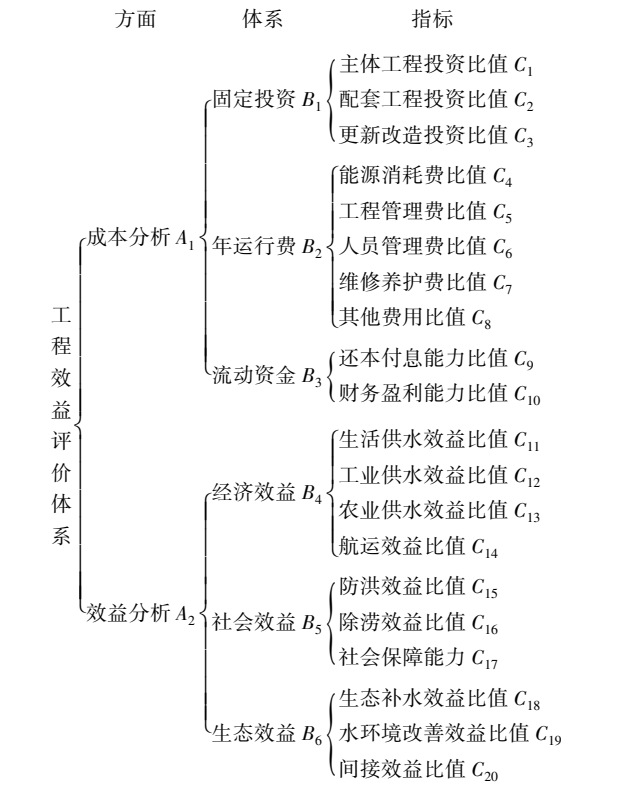


图3 南水北调东线一期江苏段工程效益评价体系

表1 南水北调东线一期江苏段工程效益评价指标等级标准

评价等级	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
不利	(1.10,+∞)	(1.10,+∞)	(1.10,+∞)	(1.15,+∞)	(1.04,+∞)	(1.04,+∞)	(1.07,+∞)	(1.06,+∞)	[0,0.98]	[0,0.96]
较不利	(1.05,1.10]	(1.05,1.10]	(1.05,1.10]	(1.07,1.15]	(1.02,1.04]	(1.02,1.04]	(1.04,1.07]	(1.02,1.06]	[0.98,0.99]	[0.96,0.98]
无影响	[0.98,1.05]	[0.95,1.05]	[0.95,1.05]	[0.96,1.07]	[0.99,1.02]	[0.99,1.02]	[0.98,1.04]	[0.98,1.02]	[0.99,1.01]	[0.98,1.02]
较有利	[0.95,0.98]	[0.90,0.95]	[0.90,0.95]	[0.92,0.96]	[0.97,0.99]	[0.97,0.99]	[0.96,0.98]	[0.94,0.98]	(1.01,1.02]	(1.02,1.04]
有利	[0,0.95)	[0,0.90)	[0,0.90)	[0,0.92)	[0,0.97)	[0,0.97)	[0,0.96)	[0,0.94)	(1.02,+∞)	(1.04,+∞)
评价等级	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
不利	[0,0.97)	[0,0.96)	[0,0.96)	[0,0.92)	[0,0.95)	[0,0.95)	[0,0.20)	[0,0.95)	[0,0.90)	[0,0.80)
较不利	(1.02,1.05]	(1.02,1.05]	(1.02,1.05]	(1.05,1.20]	(1.02,1.05]	(1.02,1.05]	[0.60,0.80]	(1.04,1.07]	(1.10,1.20]	(1.10,1.20]
无影响	[0.97,0.99]	[0.96,0.99]	[0.96,0.99]	[0.92,0.95]	[0.95,0.98]	[0.95,0.98]	[0.20,0.40]	[0.95,0.98]	[0.90,0.94]	[0.80,0.90]
较有利	[0.99,1.02]	[0.99,1.02]	[0.99,1.02]	[0.95,1.05]	[0.98,1.02]	[0.98,1.02]	[0.40,0.60]	[0.98,1.04]	[0.94,1.10]	[0.90,1.10]
有利	(1.05,+∞)	(1.05,+∞)	(1.05,+∞)	(1.20,+∞)	(1.05,+∞)	(1.05,+∞)	[0.80,1]	(1.07,+∞)	(1.20,+∞)	(1.20,+∞)

C_1 、 C_2 和 C_3 的区间根据物价水平波动、预留投资调整等实际情况确定; $C_4 \sim C_8$ 的区间可根据管理单位实际情况放缩,本文参照《水利建设项目经济评价规范》及同类调水工程资料中的相关系数进行确定; C_9 、 C_{10} 的区间在《建设项目经济评价方法与参数》的基础上进行提炼深化得到; $C_{11} \sim C_{14}$ 的区间由《调水工程供水价格管理办法》中的相关参数总结得出; C_{15} 、 C_{16} 的区间参考不同防洪除涝面积率乘以粮价得出; $C_{18} \sim C_{20}$ 的区间参考能值分析法中不同能值转换率进行设置^[14]; C_{17} 为定性指标,进行简单的区间划分便于专家评分。

3.3 确定指标权重

a. 收集 20 位专家对各指标权重的意见,确定评价指标重要性大小排序为 C_{11} 、 C_3 、 C_1 、 C_2 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_4 、 C_7 、 C_{19} 、 C_6 、 C_{18} 、 C_5 、 C_{16} 、 C_{15} 、 C_8 、 C_{14} 、 C_{17} 、 C_{20} 、 C_9 、 C_{10} ,计算相邻指标重要性之比 r_j 分别为 1.02、1.01、1.00、1.05、1.04、1.02、1.10、1.03、1.00、1.02、1.00、1.09、1.01、1.11、1.06、1.05、1.08、1.50、1.01,得到指标主观权重 w_j' 如表 2 所示。

b. 由优化后的组合权重来看,固定投资的权重一直是最高,其次则为经济效益,成本分析中权重最低为流动资金,效益分析中权重最低为社会效益。这主要由于固定投资占据了工程建设运行成本的很大一部分,而经济效益中各类供水效益和航运效益的发挥是工程调水的关键,由于南水北调工程为大型公益性项目的特点,其流动资金的要求并不是特别严格,相比较供水、航运、生态等效益,社会效益的发挥显得不是特别重要,这些与调水运行管理过程中对各方面的重视程度基本吻合。

3.4 计算指标隶属度

在确定的南水北调东线一期江苏段工程效益评价体系的基础上,分析各指标对于不同评价等级的隶属度。需要注意的是,对于只有单边界限的变量,需要根据资料数据中的最大上限或者最小下限确定边界参数。通过单规则单条件梯形云发生器,生成指标隶属于评价等级的云滴图,如图 4 所示。云图中横

坐标为指标的取值,纵坐标为指标隶属于评价等级的隶属度, $C_2 \sim C_8$ 指标云图与图 4(a) 展示的 C_1 指标云图相似,其中评价等级顺序相同,从左到右依次为有利、较有利、无影响、较不利、不利; $C_{10} \sim C_{20}$ 指标云图与图 4(b) 展示的 C_9 指标云图相似,其中评价等级顺序则相反。其中各指标云滴图可以得出指标的取值隶属于评价等级的情况,数据点有所交叉现象,不仅反映了云滴离散程度大,也体现出指标值转化为评价隶属度时的模糊性与不确定性。

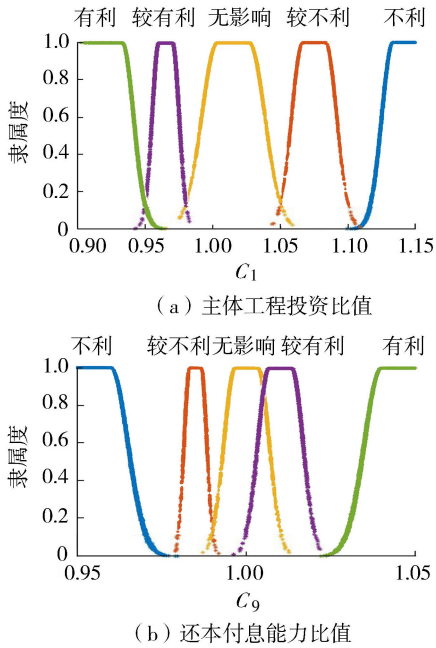


图 4 评价指标隶属于各级别的云滴图

本文选取 2017 年南水北调东线一期江苏段工程实际数据与预测数据进行隶属度计算,并结合传统云模型评价方法进行对比,结果如表 3 所示。

根据表 3 中计算结果,改进云模型相较于传统云模型能对各项指标的等级隶属度有较好地反映,其中大多数指标对于某一等级的隶属度为 1,较少存在指标等级隶属争议情况,对处于等级阈值相邻处的指标对应等级隶属度计算能够更为精确。从 2017 年南水北调东线一期江苏段调水情况来看,成本分析中的各项指标大部分集中于“较不利”等级,

表 2 各指标权重

指标	主观权重	客观权重	组合权重	指标	主观权重	客观权重	组合权重
C_1	0.065 7	0.067 8	0.067 1	C_{11}	0.067 6	0.037 3	0.055 7
C_2	0.065 7	0.052 9	0.059 5	C_{12}	0.062 6	0.039 6	0.055 3
C_3	0.066 4	0.046 1	0.055 9	C_{13}	0.060 2	0.054 6	0.057 9
C_4	0.059 0	0.059 5	0.059 8	C_{14}	0.039 4	0.068 3	0.052 4
C_5	0.051 1	0.043 1	0.047 4	C_{15}	0.046 4	0.034 2	0.040 2
C_6	0.052 1	0.053 8	0.053 5	C_{16}	0.046 8	0.033 8	0.040 2
C_7	0.053 6	0.040 8	0.047 2	C_{17}	0.037 5	0.037 2	0.037 7
C_8	0.041 8	0.059 5	0.050 4	C_{18}	0.051 1	0.049 1	0.050 6
C_9	0.023 2	0.069 5	0.040 5	C_{19}	0.052 1	0.048 4	0.050 7
C_{10}	0.022 9	0.050 7	0.034 4	C_{20}	0.034 8	0.053 9	0.043 7

表 3 传统云模型与改进云模型评价结果对比

指标	2017 年 指标值	不同评价等级隶属度									
		传统云模型					改进云模型				
		不利	较不利	无影响	较有利	有利	不利	较不利	无影响	较有利	有利
C_1	1.017	0	0.0006	0.9991	0.0003	0	0	0	1	0	0
C_2	1.030	0	0.0099	0.9900	0.0001	0	0	0.0001	0.9999	0	0
C_3	1.071	0.0015	0.9942	0.0043	0	0	0	1	0	0	0
C_4	1.107	0.0001	0.9994	0.0005	0	0	0	1	0	0	0
C_5	1.030	0.0210	0.9511	0.0277	0.0002	0	0	1	0	0	0
C_6	1.015	0.0065	0.2568	0.7295	0.0070	0	0	0.0054	0.9946	0	0
C_7	1.018	0	0.0063	0.9933	0.0004		0	0	1	0	0
C_8	1.045	0.0182	0.9785	0.0033	0	0	0	1	0	0	0
C_9	1.001	0.0037	0.0401	0.7319	0.2187	0.0062	0	0	1	0	0
C_{10}	1.021	0	0.0005	0.2473	0.7182	0.0107	0	0	0.2963	0.7037	0
C_{11}	0.984	0.0317	0.8920	0.0759	0.0005	0	0	0.9950	0.0050	0	0
C_{12}	0.993	0.0104	0.3606	0.6239	0.0050	0	0	0.0350	0.9650	0	0
C_{13}	0.976	0.1283	0.8495	0.0220	0.0001	0	0.0011	0.9989	0	0	0
C_{14}	1.177	0	0	0	0.9787	0.0028	0	0	0	1	0
C_{15}	1.056	0	0	0.0020	0.1481	0.8499	0	0	0	0.0159	0.9841
C_{16}	1.059	0	0	0.0009	0.2107	0.7884	0	0	0	0.0015	0.9985
C_{17}	0.821	0	0	0	0.9311	0.0689	0	0	0	0.0770	0.9230
C_{18}	1.084	0	0	0.0002	0.0144	0.8968	0	0	0	0	1
C_{19}	1.148	0	0	0.0002	0.9997	0.0001	0	0	0	1	0
C_{20}	0.870	0	0.9963	0.0037	0	0	0	0.9850	0.0150	0	0

而效益分析中除经济效益发挥不太理想之外,其他各项指标的发挥都趋于“较有利”等级,主要因为通水以来,实际调水量虽稳步提升但距离规划设计调水量还有一定差距,同时建设运行阶段内容相较于规划时期有所调整,导致整体成本略有上升。

3.5 评价结果及分析

为反映南水北调东线一期江苏段工程效益发挥的逐年变化趋势,根据确定的指标组合权重和等级隶属度的情况,按照最大隶属度原则,确定相应的评价等级,如表 4 所示。

由表 4 可以看出,2013—2017 年南水北调东线一期工程江苏段效益评价主要为“不利”及“较不利”两种评价等级,暂时还未达到规划设计的各项指标要求,但整体效益发挥往有利方向发展。其中,变化最大的是对于“不利”等级的隶属度由 0.61067 下降为 0.00006,对于“较不利”等级的隶属度呈先增后减趋势,对于其他等级的隶属度基本呈上升趋势。结合实际情况来看,江苏段工程作为南水北调东线一期工程的重要组成部分,主要承担向江苏省

和山东省供水任务,一方面因为工程主要发挥的各类供水效益的发挥逐年递增,供送总水量也在稳定上升,促进的航运、防洪、除涝等方面效益也在逐年增加,且从 2013 年通水以来水环境得到不断改善,沿线水质达标且稳定,促进了一定程度效益的发挥;另一方面工程实际调水量目前虽然逐年上升,但尚未达到规划设计的要求,且实际建设管理内容在规划设计基础上有所增加,相应的工程管理、人员管理、维修养护等环节费用也有所上升,导致了最终评价等级尚未满足规划设计要求。

4 结 论

a. 从评价体系来看,构建包含成本与效益分析 2 个方面、6 个子体系、20 个定量与定性评价指标的评价体系,将实际情况与预测情况进行对比,划分了 5 个评价等级,可为研究调水工程效益评价体系提供一定参考。

b. 从评价方法来看,合理考虑了指标信息量、冲突性、人为主观判断等因素的影响,采用 G1 法与

表 4 南水北调东线一期工程江苏段效益评价等级结果及对比

评价年份	不同评价等级综合确定度					本文方法 评价结果	组合权重云模型 评价结果
	不利	较不利	无影响	较有利	有利		
2013 年	0.61067	0.33752	0.05162	0.00015	0.00004	不利	不利
2014 年	0.49319	0.34287	0.08471	0.07833	0.00090	不利	不利
2015 年	0.27839	0.43988	0.14221	0.13814	0.00138	较不利	不利
2016 年	0.24337	0.40808	0.30249	0.13339	0.08267	较不利	不利
2017 年	0.00006	0.37203	0.33200	0.13091	0.16510	较不利	不利

改进 CRITIC 赋权法结合的方法得到指标的主客观组合权重,具有一定说服力;改进云模型方法对调水工程效益评价中指标阈值变化较小、一定区间范围内的点完全从属关系判断的问题有很好的求解特性。目前应用改进云模型理论于调水工程效益评价问题中的研究尚少,而针对云模型数字特征值选取的理论指导较少,对于数字特征的进一步研究有利于提高评价结果的精度。

c. 从评价结果来看,南水北调东线一期工程江苏段工程效益得到逐步发挥,对于有利等级的隶属度逐年上升,虽然目前东线一期泵站规模达到设计要求,但供水量与设计供水量还有一定差距,存在进一步提升的空间,未来应在合理增加南水北调东线工程供水量的基础上,加强工程成本控制,保障河湖生态水位和生态流量,保持工程效益发挥。

参考文献:

[1] 刘寒青,刘静,赵建世,等. 基于水资源系统可持续性的南水北调进京规模分析[J]. 水资源保护,2020,36(6):99-105. (LIU Hanqing, LIU Jing, ZHAO Jianshi, et al. Analysis of water transfer scale of South-to-North Water Diversion Project based on sustainability of water resources system[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):99-105. (in Chinese))

[2] 肖宜,邵东国,张华兴. 基于灰关联投影法的水利工程项目后评价研究[J]. 人民黄河,2013,35(4):74-77. (XIAO Yi, SHAO Dongguo, ZHANG Huaxing. Post evaluation analysis of water project based on grey relation projection method[J]. Yellow River, 2013, 35(4):74-77. (in Chinese))

[3] YU M , WANG C , LIU Y , et al. Sustainability of mega water diversion projects: experience and lessons from China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620:721-731.

[4] FU Z H, WANG Y Q, LU W T, et al. An inexact stochastic optimization model for multi-conflict regional water resources allocation in the south-to-north water benefited area [J]. Journal of Hydro Informatics, 2018, 20(4):946-959.

[5] ZHANG X L , ZOU R , WANG Y , et al. Is water age a reliable indicator for evaluating water quality effectiveness of water diversion projects in Eutrophic lakes? [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542:281-291.

[6] 唐新玥,唐德善,常文倩,等. 基于云模型的区域河长制考核评价模型[J]. 水资源保护,2019,35(1):41-46. (TANG Xinyue, TANG Deshan, CHANG Wenqian, et al. Evaluation model of regional river chief system based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):41-46. (in Chinese))

[7] 李晓英,江崇秀,张琛. 基于云模型的城市资源水价研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):215-

221. (LI Xiaoying, JIANG Chongxiu, ZHANG Chen. Study on city resource water price based on cloud model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3):215-221. (in Chinese))

[8] 张彪,戴兴国. 基于有限区间云模型和距离判别赋权的岩体质量分类模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5):150-157. (ZHANG Biao, DAI Xingguo. A classification model of rock mass based on finite interval cloud model and distance discrimination weighting [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5):150-157. (in Chinese))

[9] 王加闯,黄明健,过江. 基于 CRITIC-有限区间云模型的边坡稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019(6):113-119. (WANG Jiachuang, HUANG Minjian, GUO Jiang. Evaluation of slope stability based on CRITIC-finite interval cloud model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019(6):113-119. (in Chinese))

[10] 蒋建兵,梁家荣,江伟,等. 梯形云模型在概念划分及提升中的应用[J]. 计算机工程与设计,2008(5):1235-1237. (JIANG Jianbin, LIANG Jiarong, JIANG Wei, et al. Application of trapezium-cloud model in conception division and conception exaltation [J]. Computer Engineering and Design, 2008(5):1235-1237. (in Chinese))

[11] 宋人杰,丁江林,白丽,等. 基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(14):1-8. (SONG Renjie, DING Jianglin, BAI Li, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of distribution network based on cooperative game theory and trapezoidal cloud model [J]. Power System Protection and Control, 2017,45(14):1-8. (in Chinese))

[12] 高玉琴,陈鸿玉,刘云苹. 基于云模型的自然灾害灾情等级评估[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):38-43. (GAO Yuqin, CHEN Hongyu, LIU Yunping. Study of grade assessment of natural disaster situation based on cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(6):38-43. (in Chinese))

[13] 张润来,罗周全. 基于组合赋权与有限区间云模型的巷道冒顶预测研究[J]. 矿冶工程,2019,39(4):11-14. (ZHANG Runlai, LUO Zhouquan. Prediction of roadway roof-fall risk based on combination weighting and finite interval cloud model [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(4):11-14. (in Chinese))

[14] 陈晓楠,段春青,崔晓峰,等. 基于可变云模型的南水北调中线供水效益综合评价探析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(3):32-38. (CHEN Xiaonan, DUAN Chunqing, CUI Xiaofeng, et al. Analysis on comprehensive evaluation of water supply benefits in middle route of South-to-North Water Diversion Project based on variable cloud model [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(3):32-38. (in Chinese))

(下转第 80 页)