

基于毕达哥拉斯模糊云模型的大型灌区工程安全评价

岑威钧¹,王肖鑫²,李子阳³,翟来铮⁴,魏淑卿⁴,常东明⁴

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 长江水利水电开发集团(湖北)有限公司; 3. 南京水利科学研究院;
4. 河南省赵口引黄灌区二期工程建设管理局)

摘要:在综合分析灌区建筑物组成、运行特点等基础上,从渠道工程风险、其他建筑物工程风险、暴雨洪水风险、地震及冰冻风险、运行管理风险 5 个方面入手,构建了包括渠坡滑坡、主体失稳、消能破坏、建筑物震损、历史险情等 20 个指标的大型灌区工程安全评价指标体系。引入序关系分析法 and 变异系数法对评价指标进行主观和客观赋权,并基于博弈论进行组合赋权,有效提升了指标赋权的准确性和可靠性。同时,在传统云模型中引入毕达哥拉斯模糊数,建立了适用于复杂灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型,并对河南省某大型灌区工程进行了评价研究。结果表明,该灌区工程综合安全评价指数为 0.857,安全等级判定为安全,应用毕达哥拉斯模糊云模型得到的安全评价结果具有较高的稳定性,为大型灌区工程安全评价提供了新途径。

关键词:大型灌区;安全评价;云模型;毕达哥拉斯模糊数;组合赋权

中图分类号:TV698.2⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0074-07

Safety evaluation of large-scale irrigation district projects based on Pythagorean fuzzy cloud model//Cen Weijun¹, Wang Xiaoxin², Li Ziyang³, Zhai Laizheng⁴, Wei Shuqing⁴, Chang Dongming⁴ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group Co., Ltd.; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute; 4. Construction Management Bureau of the Phase II Project of Zhaokou Yellow River Diversion Irrigation District, Henan Province)

Abstract: Based on a comprehensive analysis of the structure composition and operational characteristics of irrigation districts, a safety evaluation indicator system for large-scale irrigation district projects was constructed from five aspects: channel engineering risk, risk of other structures, rainstorm and flood risk, earthquake and frost risk, and operation and management risk. The system includes 20 indicators, such as canal slope landslide, main structure instability, energy dissipation failure, structural seismic damage, and historical hazard events. The order relation analysis method and the coefficient of variation method were employed to calculate the subjective and objective weights of the evaluation indicators, respectively, and combined weighting was determined based on game theory, which effectively improved the accuracy and reliability of the indicator weighting. Furthermore, the Pythagorean fuzzy number was introduced into the traditional cloud model, and a Pythagorean fuzzy cloud model suitable for the safety evaluation of complex irrigation districts was established. Finally, the model was used to evaluate the safety of a large-scale irrigation district in Henan Province. The results show that the comprehensive safety index of the irrigation district is 0.857, classifying it as “safe”. The safety evaluation results derived from the Pythagorean fuzzy cloud model exhibit high stability, providing a novel method for safety evaluation of large-scale irrigation districts.

Key words: large-scale irrigation district; safety evaluation; cloud model; Pythagorean fuzzy number; combined weighting

根据水利部 2022 年公布的《全国大型灌区名录》,我国现有灌溉面积 2 万 hm² 及以上的大型灌区 449 处,有效灌溉面积达 1 640 万 hm²。大型灌区工程渠道线路长,灌区内建筑物数量众多且种类繁多,地质和环境条件复杂,加之现有大型灌区工程多建于 20 世纪 50—70 年代,灌区工程往往处于超期服役状态,其功能和效益难以充分发挥。因此,有必要

对大型灌区工程进行综合安全评价,以便及时掌握灌区工程的整体运行状况,为工程的维修加固、改建扩建及功能提升提供技术支撑。

灌区工程由水源、引输配水建筑物及沟渠系统构成,系统覆盖范围广。现有灌区评价研究侧重于水资源利用率、土地适宜性、灌区生态环境等方面^[1-2],而从工程角度开展灌区安全评价的研究相对

作者简介:岑威钧(1977—),男,教授,博士,主要从事工程渗流分析与土石坝安全评价研究。E-mail:hhucwj@163.com

较少。杨道富^[3]从安全性和耐久性方面剖析了灌区建筑物安全影响因素,提出了建筑物完好率这一评价指标以反映灌区工程安全状态。游黎等^[4]根据粗糙集理论和集成分析法建立了基于组合赋权的大型灌区工程运行状况评价模型。为了科学评价灌区工程安全性,可借鉴水闸、泵站、渠道等工程安全评价模型和评价方法。例如:李家田等^[5]根据水闸工程安全评价指标之间的关联性,建立了基于物元理论的水闸安全综合评价模型,为类似工程的安全评价和运行管理提供了新思路;武慧芳等^[6]结合泵站建筑物开裂、失稳等风险因素,构建了涵盖建筑物变形破坏程度、整体稳定性等维度的泵站安全评价指标体系,并给出了不同安全等级的维修养护标准;贡力等^[7]基于系统方法论构建了寒冷地区明渠安全评价模型,并采用熵权法确定指标权重,进而验证了评价模型的科学性与合理性。此外,一些新型的评价算法和评价模型也不断涌现并应用于实际工程中,例如云模型评价方法等。Zhang 等^[8]综合考虑了评价指标的随机性和空间异质性,提出了一种多维相似云模型评价方法,并将其应用于青藏高原的河流健康评价。Deng 等^[9]构建了基于云模型的城市道路拥堵评价模型,能较好地识别出路段的拥堵程度。Liao 等^[10]建立了基于云模型的电力变压器风险评估模型,可有效识别电力变压器故障的不确定性。

相比单一建筑物安全评价,灌区工程因建筑物类型众多且相互影响,传统云模型评价方法难以综合考量灌区不同建筑物的差异性,以及多风险因素引发的评价结果模糊性。为此,本文依托河南省某大型灌区工程,将可反映多因素不确定性的云模型和表征模糊性的毕达哥拉斯模糊集相结合,提出适用于大型灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型,并通过实例应用验证模型的科学性,以期为大型灌区工程安全评价提供一种切实可行的新途径。

1 大型灌区工程安全评价指标体系

首先,在梳理分析内蒙古河套灌区、山西汾河灌区、陕西洛惠渠灌区等国内多个大型灌区工程案例的基础上,研究灌区工程安全影响因素和风险成因。同时,依托河南省某大型灌区工程,通过实地调研、现场检测、计算分析及资料梳理,对大型灌区工程主要运行模式进行深入分析,归纳总结了影响大型灌区工程安全的各类风险因素。其次,针对灌区建筑物自身进行考察,以渠道为例,其作为灌区主要输水结构,常见的工程风险主要有渠坡滑坡、渠顶损毁、渗漏破坏等。对于灌区其他建筑物,如渡槽、倒虹吸、节制闸、分水闸等,虽然存在各自的结构特点和

运行条件,但其主要安全问题可以归纳为主体失稳、进出口段破坏、不均匀沉降、接触渗漏、老化剥蚀等。除了渠道工程风险、其他建筑物工程风险以外,灌区还可能遭遇暴雨洪水、地震、冰冻等自然灾害,且灌区的运行管理疏漏也可能引发灌区工程安全风险。综上,最终建立大型灌区工程安全评价指标体系(图1),包括渠道工程风险、其他建筑物工程风险、暴雨洪水风险、地震及冰冻风险、运行管理风险这5个一级评价指标,以及渠坡滑坡、主体失稳、消能破坏、建筑物震损、历史险情等20个二级评价指标。

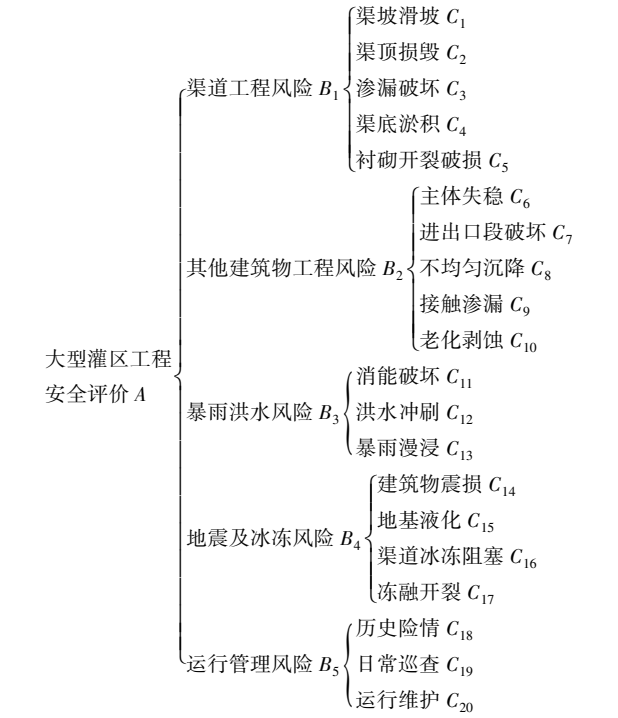


图1 大型灌区工程安全评价指标体系

对部分二级评价指标补充说明如下:考虑到河套平原、宁夏平原、黄河冲积平原等地区的灌区所引水源含沙量较高,长时间泥沙沉积造成渠道底部发生淤积,因此将渠底淤积 C_4 纳入评价指标体系中;衬砌开裂破损 C_5 针对的是采用混凝土或浆砌石等材料衬砌的渠道,若渠道未采取衬砌防护,则不考虑该评价指标;主体失稳 C_6 用于评价灌区建筑物的抗滑、抗浮、抗倾覆等失稳风险;在采用接触渗漏 C_9 进行安全评价时,灌区内不同建筑物的评价侧重点有所不同,以倒虹吸为例,应重点关注进出口闸室段的基底渗流以及建筑物外围结合带的异常渗流现象^[11];日常巡查 C_{19} 主要指对灌区建筑物开展必要的巡查工作,同时进行隐患记录和资料分析;运行维护 C_{20} 是指对灌区建筑物的金属结构和机电设备进行检查和维修,包括查看闸门是否锈蚀、卡阻以致无法正常启闭,检查电器控制设备是否失效等。

由于目前尚无灌区安全等级划分的相关规定,为了清晰描述灌区的具体安全状态,参照水闸、堤防

等工程的安全评价导则,同时结合灌区评价方面已有相关研究,将灌区工程安全评价等级划分为5类,分别为安全、较安全、基本安全、较危险和危险,相应的评分区间为(85,100]、(70,85]、(60,70]、(50,60]和(0,50]。

2 大型灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型

2.1 建模思路

图2为本文改进的大型灌区工程安全评价模型框架,涉及云模型、毕达哥拉斯模糊云模型、主客观赋权等关键内容,包含以下几个要点。

a. 建立毕达哥拉斯模糊云模型。考虑到云模型的3个云参数(期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e)反映了评价指标的模糊性与随机性,以及毕达哥拉斯模糊数的隶属度 $\mu_p(x)$ 和非隶属度 $v_p(x)$ 具有表征评价指标模糊性的特点,将云模型的3个云参数和毕达哥拉斯模糊数的隶属度和非隶属度相结合,建立了包含5个参数的毕达哥拉斯模糊云模型,所建模型能够表征安全评价的随机性和模糊性,进而采用安全评价指数对大型灌区工程进行安全评价。

b. 组合赋权确定评价指标权重。在构建大型灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型中,选取序关系分析法作为主观赋权方法。这是因为传统层次分析法难以构造判断矩阵且需要进行一致性检验,相较而言,序关系分析法无需构建判断矩阵及进行一致性检验,计算过程更为清晰简捷,因此更适用于评价指标较多的大型灌区工程安全评价体系^[12],其具体计算方法见文献[12]。选取变异系数法为客观赋权方法,该方法基于统计学原理计算系统内各指标的变化程度,通过变异系数来衡量评价指标的不确

定性,能够客观反映数据的变化程度,进而合理确定灌区工程各评价指标的相对重要程度^[13],具体计算方法见文献[13]。由序关系分析法和变异系数法分别得到主、客观权重后,引入博弈论理论进行灌区工程安全评价指标的组合赋权。该方法在兼顾多种赋权方法权重一致性的同时,实现了各指标组合权重与单一赋权方法所得权重之间的偏差最小化,从而有效提升灌区工程安全评价指标赋权的准确性和可靠性。

c. 根据计算结果确定灌区工程安全状态。求得各评价指标的组合权重后,采用逼近理想解法计算各层级指标的评价结果,并结合指标层的毕达哥拉斯模糊云参数,最终计算得出大型灌区工程安全评价结果。将5个安全等级(安全、较安全、基本安全、较危险、危险)对应的安全评价指数与大型灌区工程的安全评价指数进行对比,并结合相关检验指标评估灌区工程安全评价结果的可行性和稳定性,从而判断灌区工程的安全等级。

2.2 云模型

云模型能够刻画定量数值的随机不确定性,目前已广泛应用于多领域安全评价研究^[14-15]。设 U 为一个用数值表示的定量论域, C 为论域 U 上的定性概念,若定量值 x 为 C 的一次随机实现($x \in U$), x 对 C 的确定度 $\mu(x)$ 为具有稳定倾向的随机数($\mu(x) \in [0,1]$),则 x 在论域 U 上的分布称为云模型,记作 $C(x)$;每一个 x 称为一个云滴。

云模型包含期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 等3个云参数,其中 E_x 为云滴在论域空间分布的中心值,用于反映灌区工程安全状态的预期; E_n 为定性概念随机性的度量,反映了能够代表这一定性概念的云滴的离散程度,用于评判评价结果的可信水平; H_e 为熵的不确定性度量,由熵的随机性和模糊性共同决定,

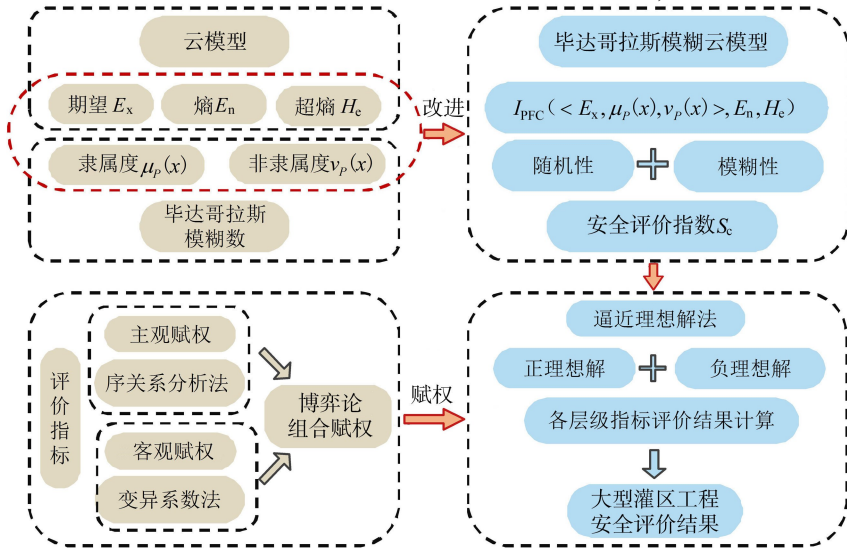


图2 大型灌区工程安全评价模型框架

用于描述评价结果的稳定程度。

2.3 毕达哥拉斯模糊集

毕达哥拉斯模糊集由 Yager^[16] 于 2014 年提出, 该集合放宽了直觉模糊集中隶属度和非隶属度之和必须小于或等于 1 的约束条件, 可以有效处理复杂系统中的不确定性和模糊性问题。毕达哥拉斯模糊集的定义如下:

$$P = \{ \langle x, \mu_p(x), v_p(x) \rangle \mid x \in U \} \quad (1)$$

式中: $\mu_p(x)$ 、 $v_p(x)$ 分别为 x 隶属于集合 P 的隶属度和非隶属度, $0 \leq \mu_p(x) \leq 1, 0 \leq v_p(x) \leq 1$, 且 $\mu_p^2(x) + v_p^2(x) \leq 1$ 。

序对 $(\mu_p(x), v_p(x))$ 称为毕达哥拉斯模糊数, 在实际应用中, 通常根据指标间的隶属度和非隶属度对评价对象进行评价。

2.4 毕达哥拉斯模糊云模型

云模型采用云发生器实现定量数值与定性描述的相互转换, 通过 3 个云参数表征评价过程中的不确定性, 从而更为直观地表示评价结果。在安全评价时, 部分评价指标的熵 E_n 和超熵 H_e 值过大可能会导致云滴出现较大程度离散, 即出现“雾化”现象。毕达哥拉斯模糊数 $(\mu_p(x), v_p(x))$ 中 $\mu_p(x)$ 和 $v_p(x)$ 分别表示不同评价指标与对应评价等级间的隶属度和非隶属度, 能够有效解决灌区评价指标的复杂模糊性。将能够考虑随机性的云模型和反映模糊性的毕达哥拉斯模糊集相结合, 构建毕达哥拉斯模糊云模型, 毕达哥拉斯模糊云可定义为 $C(\langle E_x, \mu_p(x), v_p(x) \rangle, E_n, H_e)$, 则第 i 个评价指标对应的毕达哥拉斯模糊云即可表示为 $C_i(\langle E_{xi}, \mu_{pi}(x), v_{pi}(x) \rangle, E_{ni}, H_{ei}) (i = 1, 2, \dots, m)$, 其中 m 为评价指标数量。采用逼近理想解法^[17] 对毕达哥拉斯模糊数进行求解, 通过计算各指标的毕达哥拉斯模糊数正、负理想解来判断指标间的相对重要程度, 具体步骤如下:

步骤 1 确定各指标层的毕达哥拉斯模糊云 $C_i(\langle E_{xi}, \mu_{pi}(x), v_{pi}(x) \rangle, E_{ni}, H_{ei}) (i = 1, 2, \dots, m)$, 引入序关系分析法和变异系数法对评价指标进行主观和客观赋权, 并基于博弈论实现组合赋权, 以确定各指标权重 w_i , 依次计算准则层和目标层的毕达哥拉斯模糊云, 计算公式如下:

$$I_{PFC}(\cdot) = \left(\langle \sum_{i=1}^m w_i E_{xi}, \frac{\sum_{i=1}^m w_i \mu_{pi} E_{xi}}{\sum_{i=1}^m w_i E_{xi}}, \frac{\sum_{i=1}^m w_i v_{pi} E_{xi}}{\sum_{i=1}^m w_i E_{xi}} \rangle, \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i E_{ni}^2}, \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i H_{ei}^2} \right) \quad (2)$$

式中: $I_{PFC}(\cdot)$ 为毕达哥拉斯模糊云聚合算子。

步骤 2 计算评价指标的正、负理想解:

$$C^+ = (\langle E_x^+, \mu_p^+, v_p^+ \rangle, E_n^+, H_e^+) = (\langle \max_{1 \leq i \leq m} E_{xi}, \max_{1 \leq i \leq m} \mu_{pi}, \max_{1 \leq i \leq m} v_{pi} \rangle, \max_{1 \leq i \leq m} E_{ni}, \max_{1 \leq i \leq m} H_{ei}) \quad (3)$$

$$C^- = (\langle E_x^-, \mu_p^-, v_p^- \rangle, E_n^-, H_e^-) = (\langle \min_{1 \leq i \leq m} E_{xi}, \min_{1 \leq i \leq m} \mu_{pi}, \min_{1 \leq i \leq m} v_{pi} \rangle, \min_{1 \leq i \leq m} E_{ni}, \min_{1 \leq i \leq m} H_{ei}) \quad (4)$$

式中: C^+ 、 C^- 分别为评价指标的正理想解和负理想解。

步骤 3 计算各评价指标 C_i 与正、负理想解的距离 d_i^+ 和 d_i^- , 计算方法见文献[18], 表达式为:

$$\begin{cases} d^{\pm} = d(C_i, C^{\pm}) = |(1 - \xi_1)\rho_i E_{xi} - (1 - \xi_2)\rho^{\pm} E_x^{\pm}| \\ \xi_1 = \frac{\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2}}{\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2} \sqrt{(E_n^+)^2 + (H_e^+)^2}} \\ \xi_2 = \frac{\sqrt{(E_n^+)^2 + (H_e^+)^2}}{\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2} \sqrt{(E_n^+)^2 + (H_e^+)^2}} \\ \rho_i = \min\{\mu_{pi}, \sqrt{1 - v_{pi}^2}\} \\ \rho^{\pm} = \min\{\mu_p^{\pm}, \sqrt{1 - (v_p^{\pm})^2}\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ξ_1 、 ξ_2 分别为指标隶属系数和理想解隶属系数; ρ_i 、 $\rho^{\pm}$ 分别为指标偏离系数和理想解偏离系数。其他物理量符号含义见文献[18]。

基于各评价指标 C_i 与正、负理想解的距离 d_i^+ 和 d_i^- , 构建灌区工程安全评价指数 S_c 、 S_e 值越大, 表明该评价指标的安全状况越好, 据此可判定各评价指标的相对安全水平。 S_e 计算公式如下:

$$S_e = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (6)$$

3 实例应用

某引黄灌区二期工程位于河南省黄河南岸, 灌区设计灌溉面积为 1 470 km², 总土地面积为 2 174 km², 范围涉及郑州、开封、周口、商丘 4 个设区市, 包括中牟、通许、杞县、太康、柘城等 5 个县及开封市城乡一体化示范区、鼓楼区、祥符区 3 个区。灌区内包含渠道、渡槽、倒虹吸、节制闸、分水闸等水工建筑物。其中, 渠道 31 条(包括总干渠 1 条、干渠 9 条、分干渠 6 条和支渠 15 条)、渡槽 1 座、倒虹吸 9 座、路涵 41 座、节制闸 104 座、分水闸 49 座、退水闸 26 座。

本文收集了 56 项关键控制工程(包括渠道 10 条、渡槽 1 座、倒虹吸 5 座、路涵 10 座、水闸

30 座)的现场勘查与检测资料,主要数据来源于工程建设及管理单位。邀请 11 位行业权威专家对灌区工程安全评价体系中的 20 个评价指标进行打分,根据评分结果计算得到各指标对应的毕达哥拉斯模糊云参数。采用序关系分析法确定灌区工程安全评价指标的主观权重,采用变异系数法确定灌区工程安全评价指标的客观权重,根据博弈论计算得到主、客观权重的博弈权系数分别为 0.56 和 0.44,最终计算得到该灌区工程各评价指标的组合权重及毕达哥拉斯模糊云,结果见图 3 和表 1。

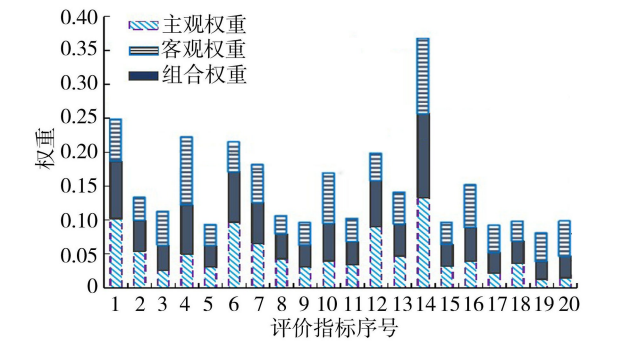


图 3 灌区工程安全评价指标权重

表 1 灌区工程安全评价指标毕达哥拉斯模糊云

评价指标	毕达哥拉斯模糊云
C_1	($\langle 88.3, 0.66, 0.52 \rangle, 1.554, 0.812$)
C_2	($\langle 83.8, 0.61, 0.52 \rangle, 1.955, 0.357$)
C_3	($\langle 78.7, 0.62, 0.48 \rangle, 2.306, 0.618$)
C_4	($\langle 81.6, 0.59, 0.51 \rangle, 2.156, 0.391$)
C_5	($\langle 84.5, 0.62, 0.49 \rangle, 1.504, 0.699$)
C_6	($\langle 80.9, 0.68, 0.51 \rangle, 1.905, 0.649$)
C_7	($\langle 82.0, 0.69, 0.45 \rangle, 2.507, 0.466$)
C_8	($\langle 76.9, 0.57, 0.48 \rangle, 2.607, 0.710$)
C_9	($\langle 80.7, 0.61, 0.50 \rangle, 2.707, 0.609$)
C_{10}	($\langle 80.2, 0.55, 0.48 \rangle, 2.055, 0.317$)
C_{11}	($\langle 89.5, 0.52, 0.56 \rangle, 1.755, 0.960$)
C_{12}	($\langle 92.5, 0.58, 0.52 \rangle, 2.507, 1.489$)
C_{13}	($\langle 91.4, 0.64, 0.51 \rangle, 1.705, 0.946$)
C_{14}	($\langle 87.9, 0.66, 0.49 \rangle, 2.607, 0.710$)
C_{15}	($\langle 92.5, 0.61, 0.52 \rangle, 1.634, 0.907$)
C_{16}	($\langle 88.2, 0.61, 0.52 \rangle, 2.306, 0.618$)
C_{17}	($\langle 76.5, 0.62, 0.49 \rangle, 1.504, 0.488$)
C_{18}	($\langle 84.9, 0.65, 0.53 \rangle, 2.607, 0.710$)
C_{19}	($\langle 92.8, 0.55, 0.59 \rangle, 2.206, 0.578$)
C_{20}	($\langle 89.6, 0.55, 0.48 \rangle, 2.517, 0.922$)

由图 3 和表 1 可见,主观权重中, C_1 、 C_6 、 C_{12} 、 C_{14} 等是影响大型灌区工程安全的重要因素。客观权重中, C_4 、 C_{10} 、 C_{14} 等对灌区工程安全影响较大。从组合权重来看, C_{14} 是影响灌区工程安全的重要因素。20 个评价指标中,除 C_3 、 C_8 、 C_{17} 之外,其余指标的期望均大于 80, C_8 的期望最小,为 76.9, C_{19} 的期望最大,达 92.8。毕达哥拉斯模糊云参数中, C_{11} 的隶属

度(0.52)小于非隶属度(0.56), C_{19} 的隶属度(0.55)小于非隶属度(0.59),其余 18 个评价指标的隶属度均大于非隶属度,表明 C_{11} 和 C_{19} 在评价过程中存在较大的模糊性。 C_{11} 、 C_{12} 等的超熵较高,表明这些评价指标更易受不确定性因素的影响。

结合指标层和准则层的权重以及指标层的毕达哥拉斯模糊云参数,根据式(2)计算得到各准则层的毕达哥拉斯模糊云: $B_1(\langle 84.0, 0.66, 0.51 \rangle, 1.904, 0.614)$ 、 $B_2(\langle 80.4, 0.63, 0.48 \rangle, 2.299, 0.557)$ 、 $B_3(\langle 91.5, 0.60, 0.52 \rangle, 1.988, 1.139)$ 、 $B_4(\langle 89.0, 0.63, 0.51 \rangle, 2.065, 0.670)$ 、 $B_5(\langle 88.8, 0.58, 0.53 \rangle, 2.466, 0.759)$,同时计算得出安全、较安全、基本安全、较危险、危险等级对应的安全评价指数分别为 0.824、0.698、0.592、0.135、0.050,并根据式(6)计算出指标层和准则层的安全评价指数。最终得出大型灌区工程安全评价目标层 A 的毕达哥拉斯模糊云为($\langle 85.8, 0.61, 0.51 \rangle, 2.098, 0.814$),相应的综合安全评价指数为 0.857。图 4 为准则层和目标层的毕达哥拉斯模糊云图,图 5 为指标层和准则层的安全评价指数。

由图 4 和图 5 可见,指标层中, C_3 和 C_8 评价等级为基本安全, C_4 、 C_9 、 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{17} 这 5 个评价指标等级为较安全,各指标安全评价指数排序为: $C_8 < C_3 < C_{11} < C_{17} < C_{10} < C_9 < C_4$,其余 13 个指标均处于安全等级。20 个评价指标中,安全评价指数最高的是 C_{15} ,安全评价指数最低的是 C_8 。准则层中,各指标期望大小排序依次为 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_1 、 B_2 ,其中 B_3 的期望最高,为 91.5, B_2 的期望最低,为 80.4, B_5 的熵在 5 个准则层指标中最大,为 2.466,表明该指标的不确定性最高。准则层中, B_2 的安全评价指数最低,处于较安全等级,其余 4 个指标均为安全等级,5 个指标的安全评价指数排序依次为 $B_2 < B_1 < B_5 < B_4 < B_3$ 。大型灌区工程安全评价目标层 A 的毕达哥拉斯模糊云为($\langle 85.8, 0.61, 0.51 \rangle, 2.098, 0.814$),其熵和超熵均相对较小,表明灌区工程安全评价结果的可行性和稳定性均较高,最终计算得到目标层安全评价指数为 0.857,处于安全等级,结合灌区工程安全评价期望值 85.8,判定该引黄灌区二期工程的安全等级为安全,评价结果与灌区工程的实际情况基本吻合。

4 结 论

a. 在综合分析影响大型灌区工程安全的一系列风险因素基础上,建立了包含 5 个一级评价指标和 20 个二级评价指标的大型灌区工程安全评价指

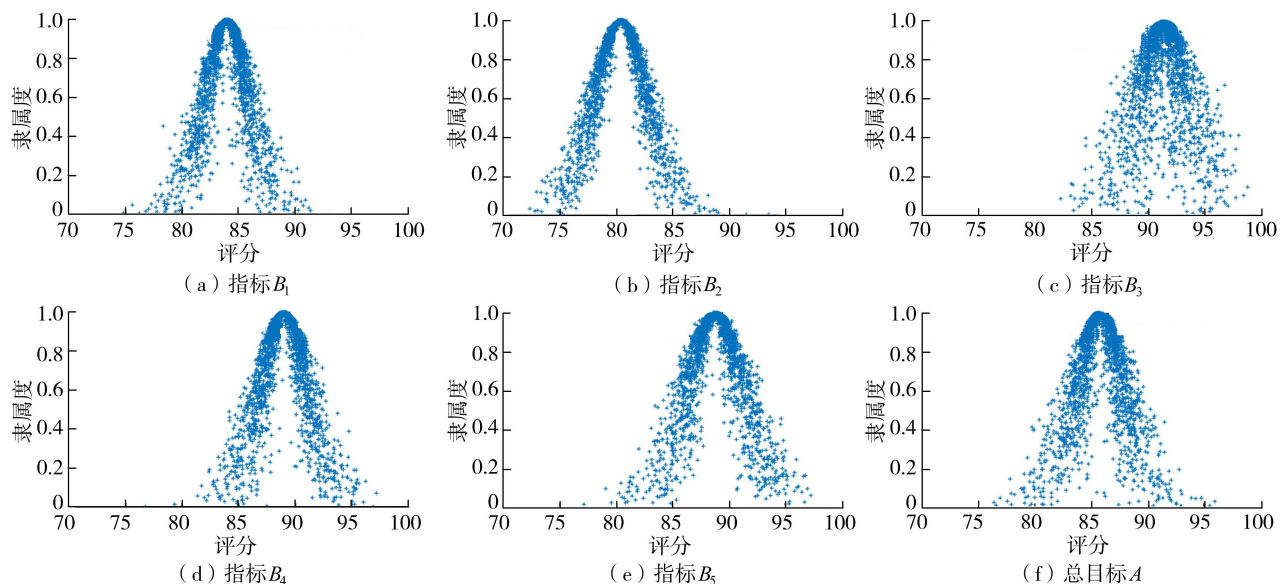


图4 准则层和目标层的毕达哥拉斯模糊云图

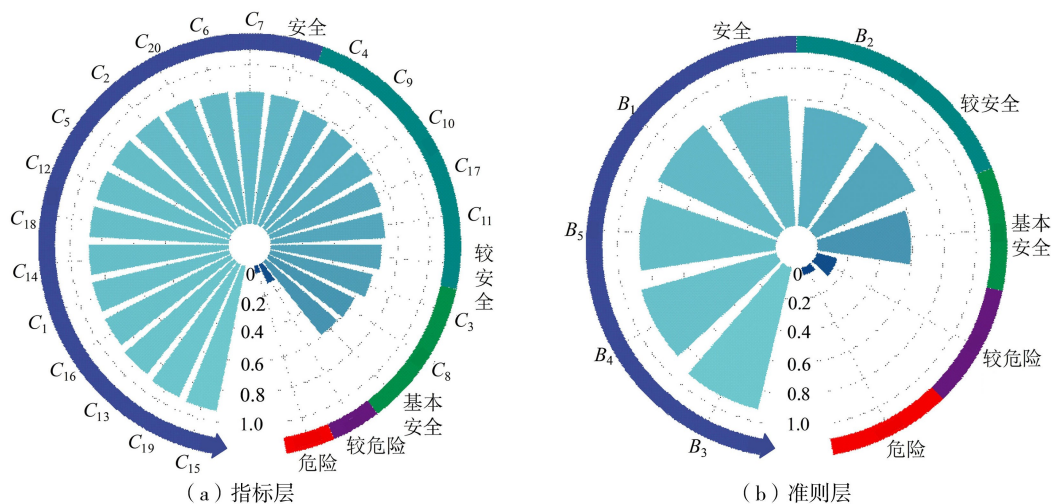


图5 指标层和准则层的安全评价指数

标体系。分别采用序关系分析法和变异系数法进行主观和客观赋权,并通过博弈论实现组合赋权,有效提升了灌区工程评价指标赋权的准确性和可靠性。

b. 本文构建了适用于复杂灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型,相较于传统云模型,所构建的毕达哥拉斯模糊云模型能够表征评价指标的模糊性,所定义的安全评价指数反映了各评价指标的相对安全水平。

c. 将所构建的毕达哥拉斯模糊云模型应用于河南省某大型灌区工程。评价结果表明,除其他建筑物工程风险指标处于较安全等级外,其余一级指标的安全评价指数均处于安全等级,整个灌区工程的综合安全评价指数为 0.857,相应的工程安全等级为安全。同时,评价结果对应的熵和超熵数值均相对较小,表明评价结果具备良好的可信度与稳定性。

d. 由于大型灌区建筑物数量可观且种类繁多、

区域覆盖面积广、地质和环境条件复杂,不同灌区工程存在明显的差异化特征。本文构建的评价指标体系和毕达哥拉斯模糊云模型,可为同类型大型灌区工程安全评价提供一种新途径。后续可开展毕达哥拉斯模糊云模型的验证和改进研究。

参考文献:

[1] 庞爱萍,易雨君,李春晖. 基于生态需水保障的农业用水安全评价:以山东省引黄灌区为例[J]. 生态学报,2021,41(5):1907-1920. (Pang Aiping, Yi Yujun, Li Chunhui. Evaluation of agricultural water-use security with ecological water demand as a priority:a case study of the Yellow River estuary in Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(5):1907-1920. (in Chinese))

[2] 张泽中,李娜,刘发,等. 乡村振兴战略指导下的生态灌区建设与管理[J]. 水利水电科技进步,2020,40(2):1-5. (Zhang Zezhong, Li Na, Liu Fa, et al. Construction and management of ecological irrigation districts under

- guidance of rural revitalization strategy [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2):1-5. (in Chinese))
- [3] 杨道富. 基于灌区建筑物完好率评估标准体系的研究[J]. 灌溉排水学报, 2005 (3): 57-61. (Yang Daofu. Study on the system of appraisal standards of intact rate of buildings in irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005 (3): 57-61. (in Chinese))
- [4] 游黎, 费良军, 武锦华. 基于集对分析法的大型灌区运行状况评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (2): 132-135. (You Li, Fei Liangjun, Wu Jinhua. Study on evaluation of current condition of large-scale irrigation areas based on the set pair analysis [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28 (2): 132-135. (in Chinese))
- [5] 李家田, 苏怀智. 基于联系数的水闸安全综合评价物元模型与实现方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (10): 88-91. (Li Jiatian, Su Huaizhi. Matter-element model of sluice safety assessment based on connection number safety based on cloud model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35 (10): 88-91. (in Chinese))
- [6] 武慧芳, 陆立国, 王红雨. 宁夏引黄灌区泵站建筑物安全评价研究[J]. 人民黄河, 2015, 37 (5): 143-148. (Wu Huifang, Lu Ligu, Wang Hongyu. Security evaluation of pumping station buildings to Ningxia Yellow River irrigation area [J]. Yellow River, 2015, 37 (5): 143-148. (in Chinese))
- [7] 贡力, 路瑞琴, 靳春玲, 等. 基于博弈-改进可拓理论的寒冷地区长距离明渠冬季运行安全评价[J]. 自然灾害学报, 2019, 28 (6): 81-92. (Gong Li, Lu Ruiqin, Jin Chunling, et al. Winter operation safety evaluation of long distance water diversion channels in cold areas based on game-improved extension theory [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28 (6): 81-92. (in Chinese))
- [8] Zhang Z, Li Y, Wang X, et al. Assessment of river health based on a novel multidimensional similarity cloud model in the Lhasa River, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127100.
- [9] Deng Z, Huang D, Liu J, et al. An assessment method for traffic state vulnerability based on a cloud model for urban road network traffic systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 99: 1-14.
- [10] Liao R, Bian J, Yang L, et al. Cloud model-based failure mode and effects analysis for prioritization of failures of power transformer in risk assessment [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013, 23 (7): 1-19.
- [11] 王媛, 刘佳豪, 郝泽嘉, 等. 基于 AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (2): 79-84. (Wang Yuan, Liu Jiahao, Hao Zejia, et al. Comprehensive safety evaluation of large water conveyance inverted siphon based on AHP-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (2): 79-84. (in Chinese))
- [12] 董庆兴, 李赛, 张大斌, 等. 基于匹配属性相似度的应急决策方案推荐方法[J]. 控制与决策, 2016, 31 (7): 1247-1252. (Dong Qingxing, Li Sai, Zhang Dabin, et al. Emergency decision response plan recommendation method based on similarity of matched attributes [J]. Control and Decision, 2016, 31 (7): 1247-1252. (in Chinese))
- [13] 杨子桐, 黄显峰, 方国华, 等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4): 60-66. (Yang Zitong, Huang Xianfeng, Fang Guohua, et al. Benefit evaluation of eastern route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4): 60-66. (in Chinese))
- [14] 周兰庭, 郭枫, 王浩. 土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (6): 86-92. (Zhou Lanting, Guo Feng, Wang Hao. Improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6): 86-92. (in Chinese))
- [15] 何杨杨, 苏怀智. 考虑规范分级的水闸安全云评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2): 29-35. (He Yangyang, Su Huaizhi. Cloud assessment method of sluice safety considering specification classification [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2): 29-35. (in Chinese))
- [16] Yager R R. Pythagorean membership grades in multicriteria decision making [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22 (4): 958-965.
- [17] 屈吉鸿, 陈南祥, 黄强, 等. 改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39 (12): 1309-1315. (Qu Jihong, Chen Nanxiang, Huang Qiang, et al. Improved TOPSIS method for evaluating groundwater carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (12): 1309-1315. (in Chinese))
- [18] Zhou J, Su W, Baleže T, et al. Multiple criteria group decision making considering symmetry with regards to the positive and negative ideal solutions via the Pythagorean normal cloud model for application to economic decisions [J]. Symmetry, 2018, 10 (5): 1-15.

(收稿日期: 2025-05-20 编辑: 骆超)