

DOI: 10.7672/sgjs2026070133

基于云模型的抽水蓄能电站洞室群施工风险评估*

李雷

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 抽水蓄能电站洞室群施工常面临复杂的风险因素,亟需构建科学合理的施工风险评估模型以支撑安全施工决策。基于此,构建了基于云模型的抽水蓄能电站洞室群施工风险评价模型。依托湖北通山抽水蓄能电站洞室群的地质条件和施工方案,从工程地质、自然环境、设计与施工、管理方面考虑,建立了指标风险等级定性描述与定量分级结合的施工风险指标体系。采用层次分析法确定了指标权重,基于云模型理论建立了云数字特征并生成综合评估云,进而完成风险等级判定。结果表明,该项目的综合云数字特征为(48.178,6.495,1.101),与“较低风险”等级的相似度最高(0.207),与工程实际情况吻合良好,验证了模型在抽水蓄能电站洞室群施工风险评估中的有效性和适用性。

[关键词] 抽水蓄能电站;地下洞室群;风险评估;云模型;指标体系

[中图分类号] TV512 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2026)07-0133-07

Risk Assessment of Underground Cavern Group Construction for Pumped Storage Power Station Based on Cloud Model

LI Lei

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: The construction of a cavern group of pumped storage power stations is often faced with complex risk factors. It is urgent to construct a scientific and reasonable construction risk assessment model to support safe construction decision-making. In accordance with this, the construction risk assessment model of the pumped storage power station cavern group based on the cloud model is constructed. Based on the geological conditions and construction scheme of the cavern group of the Tongshan Pumped Storage Power Station in Hubei Province, a construction risk index system combining qualitative description and quantitative classification of index risk grade was established from the aspects of engineering geology, natural environment, design and construction, and management. The Analytic Hierarchy Process was used to determine the index weight. Based on the cloud model theory, the cloud digital features were established, and the comprehensive evaluation cloud was generated to complete the risk level determination. The results indicate that the comprehensive cloud digital characteristics of the project are (48.178, 6.495, 1.101), and the similarity with the “lower risk” level is the highest (0.207), which is in good agreement with the actual situation of the project. The validity and applicability of the model in the construction risk assessment of the cavern group of pumped storage power stations are verified.

Keywords: pumped storage power station; underground cavern group; risk assessment; cloud model; indicator system

0 引言

随着我国“双碳”战略的深入推进,抽水蓄能电站等清洁能源调节基础设施建设步入快速发展阶

段。抽水蓄能电站的地下洞室群规模庞大,且施工过程中面临断层破碎带、突水涌泥、高边坡失稳等风险^[1-2]。在应对此类复杂工程施工风险的研究中,许多学者从不同角度提出了解决方案^[3-4]。黄建文等^[5]基于ISM-SD模型研究了地下洞室群施工进度风险的传递路径。Pu等^[6]和Lin等^[7]则针对

* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 李雷,工程师,E-mail:lileizxcv1125@163.com

[收稿日期] 2025-12-01

复杂地质环境,改进了云模型理论,为隧道施工风险的量化评估提供了新范式。莫妙兴等^[8]和盛诞杰等^[9]则应用云模型处理风险因素间复杂的模糊关系,分别对大断面隧道下穿工程和小净距隧道的施工安全进行评估。宗志栓等^[10]融合了概率神经网络与层次分析法,开发了针对洞室群施工风险的评估方法,为风险快速判别提供了支持。然而,抽水蓄能电站的建设规模与工程复杂程度不断增加,且洞室工程作为抽水蓄能电站的核心部分,其施工质量与安全直接决定电站整体运行稳定性。以上研究多针对一般隧道工程或特定风险类型,缺乏专门针对抽水蓄能电站洞室群特点的风险评估模型,且在指标体系构建上未能系统整合工程地质、自然环境、设计施工与管理 4 个维度的定性定量指标。

基于此,以湖北通山抽水蓄能电站为背景,基于云模型构建一套适用于抽水蓄能电站洞室群施工风险的评估模型。通过建立 4 个维度的定性定量描述相结合的风险指标体系,结合 AHP 与云模型的方法,实现从风险识别到风险判定的全过程评估,为工程管理者科学决策提供支撑。

1 构建安全施工风险指标体系

为科学评估抽水蓄能电站洞室群施工安全风险,构建了 1 个融合定性描述与定量界限的综合风险评估指标体系。通过定性分析捕捉风险特征,同时利用定量标准界定风险边界,从而实现对复杂施工风险更为精准、全面的描述。通过参考施工方案和现行规范标准,确定的指标体系涵盖工程地质(B1)、自然环境(B2)、设计与施工(B3)及管理(B4)4 个准则层,下设 16 个二级指标的风险指标体系。

施工风险分级依据工程地质、环境条件、设计施工匹配度及管理完善度,并结合风险发生概率与后果严重程度,划分为 5 个等级。低风险代表风险处于可控的安全范围内,工程地质、环境、施工及管理各维度均无潜在隐患;较低风险代表存在轻微的风险隐患,但不影响施工全局,通过常规管控措施即可消除隐患,无需调整核心施工方案;中风险代表存在明显的风险诱因,可能对局部施工环节造成影响,需制定专项方案并强化监测,避免风险扩散;较高风险代表风险隐患突出,若失控可能出现塌方、涌水等事故,需专项设计论证并采取预加固支护等措施,同时需要实时高密度监测并做好应急预案;高风险代表事故风险重大,已超出常规管控能力,必须立即停工,全面整改并重新评估。

工程地质因素(B1)作为洞室群施工安全的核心影响维度,分类如表 1 所示。通过“坚硬岩,微风化”“较软岩,中风化”等地质术语,定性表征围岩完整性与稳定性状态;同时建立定量分级标准,如断层破碎带影响则以断层宽度和不良地质范围为量化依据,地下水与突水风险则采用突水概率区间进行等级界定,实现地质风险定性特征与定量边界的有机统一。

环境因素(B2)聚焦环境对施工安全的潜在影响,如表 2 所示。以“活动断层影响小/中等/较大”等定性表述判断环境因素的威胁程度;降雨与暴雨风险结合年降雨量和暴雨频率双量化指标界定等级,地表水补给条件以补给流量的范围作为风险分级基准,使环境风险评估既具备直观判断依据,又有客观数据支撑。

表 1 工程地质风险等级分类标准

Table 1 Classification criteria for engineering geological risk levels

指标	低风险	较低风险	中风险	较高风险	高风险
围岩类别与节理裂隙发育	I ~ II 类围岩;坚硬岩,微风化;节理裂隙极不发育;结构面结合好	III 类围岩;较坚硬岩,弱风化;节理裂隙较不发育;结构面结合一般	IV 类围岩;较软岩,中风化;节理裂隙一般发育;结构面结合差	V 类围岩;软岩,强风化;节理裂隙较发育;结构面结合很差	极差围岩;极软岩/土,全风化;节理裂隙极发育;破碎散体结构
断层破碎带影响	无不良地质体	轻微不良地质;小规模断层(宽<5m);不良地质范围<100m	一般不良地质;中等断层(宽 5~10m);不良地质范围 100~500m	较严重不良地质;较大断层(宽 10~20m);岩溶/滑坡等(500~1 000m)	严重不良地质;大断层(宽 ≥ 20m);岩溶/滑坡等(≥1 000m)
埋深变化	埋深<50m,变化小(≤10m)	埋深 50~100m,变化较小(10~20m)	埋深 100~200m,变化一般(20~30m)	埋深 200~300m,变化较大(30~50m)	埋深 ≥ 300m,变化大(≥50m)
地下水与突水风险	无地下水,突水风险低(<10%概率)	少量地下水,突水风险低(10%~20%概率)	中等地下水,突水风险中(20%~50%概率)	大量地下水,突水风险高(50%~80%概率)	富水地层,突水风险极高(≥80%概率)
高边坡地质条件	边坡高度<10m,稳定	边坡高度 10~20m,较稳定	边坡高度 20~30m,一般稳定	边坡高度 30~50m,较不稳定	边坡高度 ≥ 50m,不稳定

表 2 环境因素风险等级分类标准

Table 2 Classification criteria for environmental risk levels

指标	低风险	较低风险	中风险	较高风险	高风险
降雨与暴雨风险	年降雨量 $\leq 500\text{mm}$,暴雨频率 < 5 次/年	年降雨量 500 ~ 800mm,暴雨频率 5 ~ 10 次/年	年降雨量 800 ~ 1 200mm,暴雨频率 10~15 次/年	年降雨量 1 200 ~ 1 600mm,暴雨频率 15~20 次/年	年降雨量 $\geq 1 600\text{mm}$,暴雨频率 ≥ 20 次/年
气温变化/冻融循环	年温差 $< 30^\circ\text{C}$,冻融循环 < 5 次/年	年温差 30 ~ 50 $^\circ\text{C}$,冻融循环 5~10 次/年	年温差 50 ~ 60 $^\circ\text{C}$,冻融循环 10~15 次/年	年温差 60 ~ 70 $^\circ\text{C}$,冻融循环 15~20 次/年	年温差 $\geq 70^\circ\text{C}$,冻融循环 ≥ 20 次/年
地震影响	地震烈度 $< \text{VI}$ 度,无活动断层	地震烈度 VI 度,活动断层影响小	地震烈度 VII 度,活动断层影响中等	地震烈度 VIII 度,活动断层影响较大	地震烈度 $\geq \text{IX}$ 度,活动断层影响大
地表水补给条件	无地表水补给	少量地表水补给(流量 $< 10\text{m}^3/\text{h}$)	中等地表水补给(流量 10~50 m^3/h)	大量地表水补给(流量 50~100 m^3/h)	极大量地表水补给(流量 $\geq 100\text{m}^3/\text{h}$)

设计与施工因素(B3)围绕方案适配性与现场管控水平展开评估,如表3所示。通过“施工方法完全匹配/需较多调整/完全不匹配”等定性描述,评估施工方案与现场实际的契合程度;同时引入可量测的工程控制参数,如施工过程控制水平以及支护延迟时间、超欠挖尺寸、变形速率等指标界定;关键部位施工风险则采用定性描述与具体施工场景关联。

管理因素(B4)针对施工管理软实力构建评估维度,如表4所示。采用“体系完善/较完善/一般”“安全意识强/高/较强/一般/薄弱”等定性表述,同时将管理行为转化为可考核的量化指标,比如技术

监测与预报能力明确测点数量、监测频率、预报距离和准确率;人员素质与培训保障以危险源识别率、量化培训效果与管理效能。

2 基于云模型的施工风险评价模型

2.1 指标权重确定

考虑不同风险因素对施工安全的重要程度不同,采用层次分析法确定各层权重。邀请专家利用1-9标度法对同一层次内各指标的相对重要性进行两两比较,构造判断矩阵。采用方根法计算各指标的权重,计算判断矩阵每行元素的乘积,即式(1):

$$b_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (1, 2, L, n) \quad (1)$$

表 3 设计与施工风险等级分类标准

Table 3 Classification criteria for design and construction risk levels

指标	低风险	较低风险	中风险	较高风险	高风险
施工方案匹配性	施工方法与地质、埋深完全匹配,开挖进尺、循环时间最优	施工方法较少调整,开挖参数较少优化	施工方法需较多调整,开挖参数需较多优化	施工方法需重大调整,开挖参数需重大优化	施工方法完全不匹配,开挖参数完全错误
施工过程控制水平	支护立即施工;超挖 $< 5\text{cm}$,无欠挖;临时支护完全有效(变形 $< 1\text{mm}/\text{d}$)	支护延迟 $< 4\text{h}$;超挖 5~10cm,欠挖 $< 2\text{cm}$;临时支护较有效(变形 1~3mm/d)	支护延迟 4~8h;超挖 10~15cm,欠挖 2~5cm;临时支护一般有效(变形 3~5mm/d)	支护延迟 8~12h;超挖 15~20cm,欠挖 5~10cm;临时支护较无效(变形 5~10mm/d)	支护延迟 $\geq 12\text{h}$;超挖 $\geq 20\text{cm}$,欠挖 $\geq 10\text{cm}$;临时支护无效(变形 $\geq 10\text{mm}/\text{d}$)
关键部位施工风险	洞口段地形平缓,支护完全,高边坡稳定、防护完全	洞口段地形较平缓,支护较完全,高边坡较稳定、防护较完全	洞口段地形一般,支护一般,高边坡一般稳定、防护一般	洞口段地形较陡,支护较不足,高边坡较不稳定、防护较不足	洞口段地形陡峻,支护不足,高边坡不稳定、防护不足
施工道路保障能力	施工道路完全稳定,通行顺畅	施工道路较稳定,通行较顺畅	施工道路一般稳定,通行一般	施工道路较不稳定,通行较困难	施工道路不稳定,通行困难

表 4 管理风险等级分类标准

Table 4 Classification criteria for management risk levels

指标	低风险	较低风险	中风险	较高风险	高风险
技术监测与预报能力	体系完善(测点 ≥ 20 个, ≥ 2 次/d,预报 $\geq 50\text{m}$,准确率 $\geq 90\%$)	体系较完善(测点 15~20 个,1 次/d,预报 30~50m,准确率 80%~90%)	体系一般(测点 10~15 个,1 次/2d,预报 20~30m,准确率 70%~80%)	体系不完善(测点 5~10,1 次/3d,预报 10~20m,准确率 60%~70%)	体系缺失(测点 < 5 个, < 1 次/3d,预报 $< 10\text{m}$,准确率 $< 60\%$)
人员素质与培训保障	全员持证,安全意识强	全员有资质,安全意识高	多数有资质,安全意识较强	部分有资质,安全意识一般	无资质,安全意识薄弱
管理与应急处置能力	通过 ISO 认证,预案完善,危险源识别率 $\geq 80\%$	体系较完善,预案较完善,危险源识别率 70%~80%	体系一般,预案一般,危险源识别率 60%~70%	体系不完善,预案不完善,危险源识别率 50%~60%	无体系,无预案,危险源识别率 $< 50\%$

求 b_i 的 n 次方根,即式(2):

$$P_i = \sqrt[n]{b_i} (1, 2, L, n) \quad (2)$$

对向量 $P = (P_1, P_2, L, P_n)^T$ 标准化,使得

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{k=1}^n (i = 1, 2, L, n)} \quad (3)$$

$W = (W_1, W_2, L, W_n)^T$ 即为权重向量。

为确保判断矩阵的逻辑合理性,需要进行一致性检验。首先计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} ,再计算一致性指标 CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

一致性比例 CR 计算如下:

$$CI = \frac{CR}{RI} \quad (5)$$

其中 RI 取值如表 5 所示。

表 5 RI 取值

Table 5 Values of RI

矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

检验标准:当 $CR < 0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则需要重新调整判断矩阵。

2.2 云模型综合评价

云模型常应用于有效处理风险评估中的随机性和模糊性问题,通过 3 个数字特征参数来描述概念,为期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。

2.2.1 标准云的确定

根据隧道施工风险等级划分,将评价域划分为 5 个风险等级。各等级标准云参数计算如下:

$$\begin{cases} E_x = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} \\ H_e = k \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_x 为期望,即论域中的中心值; E_n 为熵,代表模糊度和概率分布的离散程度; H_e 为超熵,表示熵的不确定性; V_{\max} 和 V_{\min} 分别为风险等级对应的分值区间上下限; k 为常数,根据经验确定。

2.2.2 评价云的生成

采用逆向云发生器将专家打分数据转化为云模型数字特征。邀请隧道工程领域专家对各评估指标进行打分,基于打分数据计算各指标的数字特征如下:

$$\begin{cases} E_{xj} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \\ E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_{ij} - E_{xj}| \\ H_{ej} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - E_{xj})^2 - E_{xj}^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_{ij} 为第 i 位专家对第 j 个指标的评分; m 为专家数量; E_{xj}, E_{nj}, H_{ej} 为第 j 个指标的云数字特征。

2.2.3 综合评估云的计算

基于各指标的云数字特征和权重,计算隧道施工风险的综合评价云如下:

$$\begin{cases} E_{x\text{总}} = \sum_{j=1}^n w_j E_{xj} \\ E_{n\text{总}} = \sum_{j=1}^n w_j E_{nj} \\ H_{e\text{总}} = \sum_{j=1}^n w_j H_{ej} \end{cases} \quad (8)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的权重,通过层次分析法确定; n 为指标总数; $E_{x\text{总}}, E_{n\text{总}}, H_{e\text{总}}$ 分为综合评价云的 3 个数字特征。

3 实例分析

3.1 项目概况

湖北通山抽水蓄能电站筹建期洞室及道路工程洞室群位于湖北省咸宁市通山县黄沙铺镇源头村,主要永久性建筑物按 1 级设计,次要永久性建筑物按 3 级设计。洞室群为电站地下工程主要组成部分,承担通风、安全疏散、排水、设备散热等功能,包含 4 类洞室,包括通风兼安全洞、主变排风洞、上层排水廊道、尾闸通风洞,如图 1 所示。



图 1 通山抽水蓄能电站建设环境平面

Fig. 1 Plan view of construction environment for Tongshan Pumped Storage Power Station

通风兼安全洞是核心洞室,始于副厂房右端顶部风机室,洞口坐落于下库大幕溪库岸,高程 234.000m,总长 1 192.866m,平均纵坡 6.02%,净空宽 7.50m、高 7.00m,采用城门洞形断面。该洞室穿越 III 类、IV 类、V 类围岩,施工中需衔接全断面开

挖、上下台阶法等多种工法,同时配套开挖、支护、监测、通风排水等多道工序协同推进。主变排风洞从通风兼安全洞处引出,通往主变洞排风机房,全长 189.00m,采用城门洞形断面,宽度 7.50m、高度 7.00m。上层排水廊道与通风兼安全洞相通,包含交岔处上下游各 30m 洞段,断面宽度 3.00m、高度 3.50m,采用矩形断面,支护形式为网喷 C25 混凝土+ ϕ 22 系统锚杆。尾闸通风洞从通风兼安全洞处引出,通往尾闸室,包含与通风兼安全洞连接的 30m 洞段,采用城门洞形断面,宽度 5.00m、高度 5.50m。通风兼安全洞毗邻村道,为满足出渣及材料运输需求,对村道进行扩建形成临时施工便道,便道全长 350m,宽 5m,最大纵坡不超过 12%,边坡外侧设置 1.2m 高的防护栏杆。

隧址区属侵蚀构造高山地貌,“V”形横向沟谷发育,植被茂密;洞室埋深 27~500m,进洞口地形坡度约 50°,覆盖层厚度 1.0m,下部为强风化粉砂质板岩,厚度约 35~45m。洞线穿越中元古界冷家溪群地层,以薄~中厚层粉砂质板岩为主,夹千枚状板岩;存在断层破碎带,岩体完整性差,Ⅲ类围岩占比 35%~50%、Ⅳ类围岩占比 35%~45%、Ⅴ类围岩占比 10%~20%。

工程区地下水总体不活跃,但冲沟段存在渗水、涌水风险。通风兼安全洞正常涌水量 850m³/d,最大涌水量 1 162.8m³/d,地表、地下水对混凝土及钢筋具微腐蚀性。所在地区属亚热带季风气候,多年平均气温 16.90℃,极端温度最高 41.50℃、最低-12.80℃,多年平均降雨量 1 517.70mm,50 年一

遇设计风速 19.10m/s,地震烈度 VI~VII 度。

3.2 确定指标权重

邀请 10 位专家对指标进行评审,根据式(1)~(5)计算得到一级和二级指标的权重,风险评估指标权重和排序结果如表 6 所示。从准则层权重分布特征来看,“设计与施工风险”权重高达 0.540 3。这反映出在复杂地质条件下,施工方案的科学选型、施工过程的精细化管控以及关键部位的应对措施,组成了项目安全实施的核心要素,其对整体风险水平的影响具有主导性。相比之下,管理风险权重仅为 0.062 4。这表明,管理体系作为施工安全的基础性保障,间接地通过规范施工行为、应急处理等方式影响风险演化,影响程度较弱。且考虑到调研的工程正处于严格受控的筹建阶段,在施工高峰期其重要性预计会有所提升。

深入分析组合权重排序,发现施工方案匹配性组合权重达 0.304 6,施工过程控制水平(0.142 3)与断层破碎带(0.117 5),三者权重占比超过总体风险的 56%。而人员素质与培训保障、气温变化/冻融循环等指标权重相对靠后。通过量化各因素的相对重要性,为后续差异化管理风险管理资源提供了科学的决策支撑。

3.3 确定标准云

依据隧道工程风险管理的通用准则将施工安全风险划分为 5 个等级,并赋予其量化的分值区间,并绘制出风险评估的标准云图,如表 7 和图 2 所示。

3.4 确定评价云

为获取相对客观的评估数据,邀请 10 位具有丰

表 6 风险评估指标权重与排序

Table 6 Risk assessment indicator weights and ranking

准则层	准则权重	指标层	指标权重	组合权重	排序
工程地质风险	0.274 5	围岩类别与节理裂隙发育	0.176 4	0.048 4	7
		断层破碎带影响	0.428 0	0.117 5	3
		埋深变化	0.043 9	0.012 0	14
		地下水与突水风险	0.277 3	0.076 1	4
		高边坡地质条件	0.074 4	0.020 4	11
环境因素风险	0.122 8	降雨与暴雨风险	0.263 4	0.032 3	9
		气温变化/冻融循环	0.055 0	0.006 8	15
		地震影响	0.563 8	0.069 2	5
		地表水补给条件	0.117 8	0.014 5	13
设计与施工风险	0.540 3	施工方案匹配性	0.563 8	0.304 6	1
		施工过程控制水平	0.263 4	0.142 3	2
		关键部位施工风险	0.117 8	0.063 6	6
		施工道路保障能力	0.055 0	0.029 7	10
管理风险	0.062 4	技术监测与预报能力	0.637 0	0.039 7	8
		人员素质与培训保障	0.104 7	0.006 5	16
		管理与应急处置能力	0.258 3	0.016 1	12

表 7 风险等级划分

Table 7 Risk level classification

评价等级	等级区间	标准云数字特征
低风险	[0,25.0)	(12.5,4.167,0.5)
较低风险	[25.0,50.0)	(37.5,4.167,0.5)
中风险	[50.0,75.0)	(62.5,4.167,0.5)
较高风险	[75.0,90.0)	(82.5,2.5,0.5)
高风险	[90.0,100.0]	(95.0,1.667,0.5)

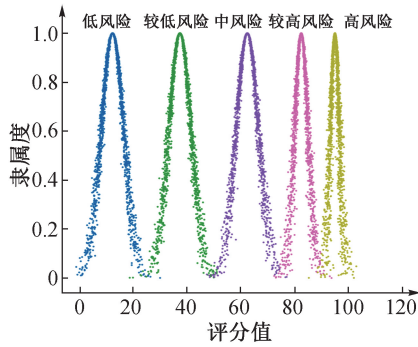


图 2 标准云图

Fig. 2 Standard cloud map

富工程经验的专家。依据建立的指标体系,对通山抽水蓄能电站洞室群工程的 16 项风险指标进行打分。通过式(6)~(8)计算得到各指标对应的云数字特征,结果如表 8 所示。

表 8 各指标云数字特征

Table 8 Numerical characteristics of each indicator cloud

指标	期望 E_x	熵 E_n	超熵 H_e
B1	67.4	6.517	0.656
B2	72.5	6.392	0.988
B3	53.7	7.896	2.186
B4	82.5	6.392	0.988
B5	47.4	6.517	0.656
B6	77.4	6.517	0.656
B7	34.8	6.517	1.186
B8	22.4	6.367	1.134
B9	75.1	6.392	0.300
B10	32.5	6.392	0.988
B11	39.9	6.392	1.460
B12	70.1	6.392	1.460
B13	43.7	7.896	2.186
B14	27.4	6.517	0.656
B15	33.7	7.896	2.186
B16	29.6	6.768	1.147
综合评价云	48.178	6.495	1.101

1) 工程地质风险维度均值 64.7 分,属于“中风险(50~75 分)”区间。其中“地下水与突水风险”指标均值 82.5 分,与工程实际最大涌水量 1 162.8 m³/d、冲沟段突水概率 50%~80%的特征对应;“断层破碎带影响”指标均值 72.5 分,匹配 100~500m 不良地质影响范围的现状;而“高边坡地质条件”指标

47.4 分,反映了洞口边坡高度和三级支护方案的有效性。工程地质风险呈现“局部高风险、整体中风险”。

2) 环境因素风险维度云模型均值 52.4 分,属于“中风险”区间。其中“降雨与暴雨风险”均值 77.4 分(接近较高风险),与通山县年降雨量 1 517.7mm、降雨集中于 5 月—7 月,多系暴雨的气象条件匹配,反映出雨季洞口截水沟溢流、雨水渗入围岩的潜在风险;“地表水补给条件”均值 75.1 分,对应洞口毗邻大幕溪的实际情况;而“地震影响”均值 22.4 分和“气温变化/冻融循环”均值 34.8 分,则是由于工程区地震烈度 VI~VII 度,且气温变化虽然温差较大但冻融循环次数较低。

3) 设计与施工风险维度云模型均值 46.55 分,处于“较低风险”区间。“关键部位施工风险”指标均值 70.1 分,主要对应洞口强风化岩层的特殊支护需求、洞室岔路口段钢拱架拆改过程中临时支护空缺的施工难点;“施工过程控制水平”均值 39.9 分(较低风险),体现为工程实施中开挖精度把控、支护工序衔接及时性及临时支护稳定性等关键环节管控到位,各项施工行为均处于规范要求的安全范围内,未出现系统性管控疏漏;“施工方案匹配性”均值 32.5 分(较低风险),则体现 III 类围岩全断面、IV~V 类围岩台阶法的方案适配性,整体设计施工风险可控,仅关键部位需动态优化。

4) 管理风险维度云模型均值 30.23 分,处于“较低风险(25~50 分)”区间。“技术监测与预报能力”均值 27.4 分,对应了工程配备 JSS30A 收敛仪检测的完善体系;“人员素质与培训保障”均值 33.7 分,匹配管理人员高级工程师占比 60%、特种作业人员 100%持证的人员基础;“管理与应急处置能力”均值 29.6 分,反映 ISO 9001 体系认证、坍塌/突水专项应急预案、危险源识别率 80%的管理成效。

3.5 结果分析

通过计算相似度得到综合评价与“较低风险”的相似度(0.207)高于与“中风险”的相似度(0.103),且与低风险、较高风险、高风险的相似度均为 0,所以整体风险评估结果为“较低风险”,处于可控状态,综合云图如图 3 所示。这是由于工程地质环境中风险、设计施工较低风险、管理低风险多维度博弈的体现。一方面,地下水、断层、雨季降雨等风险源客观存在,使单项指标局部接近较高风险阈值;另一方面,完善的支护方案、适配的施工工艺及健全的管理体系形成有效防控,最终将综合风险稳定在较低风险。该结果既没有低估工程潜在风

险隐患,也没有夸大可控风险的影响,与通风兼安全洞筹建期的实际风险特征高度契合。

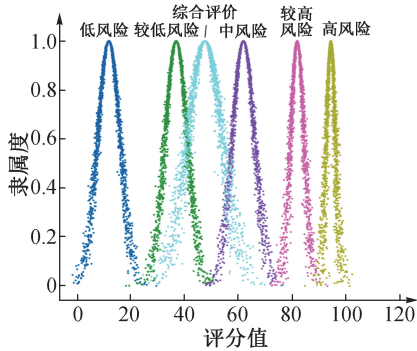


图3 综合云图

Fig. 3 Comprehensive cloud map

4 结语

以湖北通山抽水蓄能电站洞室群工程为背景,针对其施工风险系统中存在的模糊性与随机性问题,构建了融合 AHP 与云模型的施工安全风险评估模型,得出以下结论。

1) 构建了可解释性强的定性与定量相结合的风险评估指标体系。通过建立二者间的映射关系,统一了工程现场语言与风险管理语言,保障了专家打分的科学性与一致性,为复杂洞室群施工风险提供了全面、精确的评判依据。

2) 采用层次分析法和云模型结合的评价方法,计算出通山电站洞室群施工综合风险等级为“较低风险”,该结果与工程实际情况吻合,验证了模型的有效性与实用性。为同类复杂地下洞室群安全管理提供了可借鉴的技术路径,具有重要的理论参考价值 and 工程应用前景。

参考文献:

[1] 宋强. 复杂环境下地下洞室群施工风险评估及防控措施研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

SONG Q. Study on construction risk assessment and prevention and control measures of underground caves in complex environments [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.

[2] JIANG H. Safety risk and control of rock and soil and

underground engineering tunnel construction [J]. Forum on research and innovation management, 2025, 3(11): 7683.

[3] ZHENG Y X, LI F W, GUO H J, et al. Research on construction risk assessment method of shield tunnel based on subjective and objective weights [J]. Journal of engineering and applied science, 2025, 72(1): 25.

[4] SUN X W, WU L R, WU D. Risk evaluation of metro tunnel shield construction based on game variable weight extension cloud theory [J]. Scientific reports, 2025, 15: 18961.

[5] 黄建文, 谭永祚, 陈梦媛, 等. 基于 ISM-SD 的地下洞室施工进度风险传递路径研究 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 93-97.

HUANG J W, TAN Y Y, CHEN M Y, et al. Research on risk transfer route of underground cavern group construction schedule based on ISM-SD [J]. Water resources and power, 2024, 42(1): 93-97.

[6] PU S J, YANG X L, WU S C, et al. Risk assessment of tunnel construction in complex geological environments based on improved game theory and multi-dimensional cloud model [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2025, 84(11): 489.

[7] LIN C J, ZHANG M, LI L P, et al. Risk assessment of tunnel construction based on improved cloud model [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2020, 34(3): 04020028.

[8] 莫妙兴, 周志鹏, 罗浪, 等. 基于云模型的大断面矩形隧道下穿公路施工风险评估 [J]. 公路, 2025, 70(9): 322-329.

MO M X, ZHOU Z P, LUO L, et al. Construction risk assessment of large-section rectangular tunnel underpass highway based on cloud model [J]. Highway, 2025, 70(9): 322-329.

[9] 盛诞杰, 汤瑞, 王凯, 等. 基于熵权-正态云模型的小净距隧道施工风险评估模型 [J]. 安全与环境工程, 2024, 31(3): 89-95.

SHENG D J, TANG R, WANG K, et al. Risk assessment model of small clear distance tunnel construction based on entropy weight and normal cloud model [J]. Safety and environmental engineering, 2024, 31(3): 89-95.

[10] 宗志栓, 张逸飞, 林作忠, 等. 基于概率神经网络和层次分析法的洞室群施工风险评估 [J]. 铁道标准设计, 2024, 68(3): 177-185.

ZONG Z S, ZHANG Y F, LIN Z Z, et al. Construction risk assessment of cavern group based on probabilistic neural network and analytic hierarchy process [J]. Railway standard design, 2024, 68(3): 177-185.