

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.021

基于 AHP-云模型的水下钻孔爆破施工影响性评估*

张礼建¹, 杜泽辉¹, 刘艾静², 刘瑛琦², 李丽平², 刘广进², 吴立²

(1. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 武汉 430040;
2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074)

摘要: 水下钻孔爆破施工产生的水击波与地震波对邻近建(构)筑物、水生生态及通航安全构成显著威胁。为实现施工影响的多因素耦合评估与直观分级, 构建了涵盖工程水文地质、爆破参数与安全控制的三级评价指标体系, 将施工影响划分为绿、黄、橙、红4个等级。针对评价过程中的模糊性与随机性问题, 提出一种基于 AHP-云模型耦合的评价方法: 采用层次分析法(AHP)确定指标权重, 以解决多准则下权重赋值的主观性; 引入云模型实现定性影响等级与定量监测数据之间的不确定性映射。以长江上游涪陵—丰都段航道整治工程为例开展应用验证, 结果表明: 该工程综合影响云滴主要分布于“中等影响”(橙色)等级并略向“高影响”(红色)等级偏移, 评估结果与各江段现场监测反映的综合影响程度基本一致。研究成果验证了 AHP-云模型在水下爆破施工影响评估中的可行性与有效性, 可为施工方案动态优化与生态环境保护提供科学依据。

关键词: 水下钻孔爆破; AHP; 云模型; 影响性评价; 风险分级

中图分类号: U458.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0209-13

Impact Assessment of Underwater Drilling and Blasting Construction based on AHP-cloud Model

ZHANG Li-jian¹, DU Ze-hui¹, LIU Ai-Jing², LIU Ying-qi², LI Li-ping², LIU Guang-jin², WU Li²

(1. Hubei Key Laboratory of Marine Engineering Structure and New Materials, CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The water shock wave and seismic vibrations produced during underwater drilling and blasting operations pose significant risks to adjacent structures, aquatic ecosystems, and maritime safety. To facilitate a comprehensive multi-factor assessment and intuitive classification of construction impacts, this study establishes a detailed three-tier evaluation framework that integrates hydrogeological conditions, blasting parameters, and safety measures. Construction impacts are categorized into four levels: green, yellow, orange, and red. Addressing the inherent fuzziness and randomness in evaluation processes, this research introduces an integrated AHP-Cloud Model assessment methodology: the Analytic Hierarchy Process (AHP) assigns index weight coefficients to resolve multi-criteria weight subjectivity, while the Cloud Model allows for probabilistic conversion between qualitative impact categories and quantitative

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-01

网络首发日期 (Published online): 2026-01-29

作者简介: 张礼建(1973-), 男, 四川达县人, 大学本科, 主要从事土木工程设计及设计管理工作, (E-mail) 327455553@qq.com。

通信作者: 吴立(1963-), 男, 湖南株洲人, 博士、教授、博士研究生导师, 主要从事爆破工程研究, (E-mail) lwu@cug.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(41672260)

About the author: ZHANG Li-jian (1973-), male, born in Daxian city, Sichuan province, mainly engaged in civil engineering design and design management, (E-mail) 327455553@qq.com.

Corresponding author: WU Li (1963-), male, born in Zhuzhou city, Hunan province, PH. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in blasting engineering research, (E-mail) lwu@cug.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (41672260)

monitoring data via uncertainty mapping algorithms. Validation was performed utilizing the navigation channel improvement project in the Fuling-Fengdu section of the upper Yangtze River as a case study. The results demonstrate that the impact cloud droplets predominantly cluster within the medium impact ' (orange) ' grade, with minor dispersion toward the high impact ' (red) ' grade, exhibiting strong agreement with field monitoring data across river sections. This study confirms the efficacy of the AHP-Cloud Model for underwater blasting impact assessment, offering scientific insights to support adaptive construction planning and ecological conservation strategies.

Key words: underwater blasting; AHP; cloud model; impact evaluation; risk classification

在内陆航道整治等工程中,水下钻孔爆破是清除碍航礁石的关键技术,但其产生的水击波与地震波会对邻近建(构)筑物、水生生态环境及通航安全构成显著威胁^[1,2]。因此,建立一套能够综合考虑多因素耦合影响、并直观量化施工风险等级的评估方法,对于指导施工方案优化与风险管控具有重要意义。

国外研究起步较早,侧重于水击波与地震波的传播规律、介质耦合效应及衰减特性等基础理论,并关注水生生物的损伤阈值与生态响应。国内研究则更多结合航道整治等工程实践,聚焦于水击波峰值压力、质点振动速度等参数的变化规律,以及水深、流速、岩体结构等环境因素的影响。在冲击波传播机制方面,刘屹颀和张社荣等对冲击波在不同介质中的传播特性进行了深入研究和对比分析^[3,4];在防护措施上,刘天云和谢达建等重点探讨了气泡帷幕对水击波的削弱作用^[5,6],曹棉等则进一步研究了减振孔与气泡帷幕的协同减震效果^[7]。此外,围绕安全判据与生态影响,姜涛等基于冲击伤阈值确定了不同药量下的安全距离^[8],阳生权等对爆破地震安全判据进行了改进^[9],阿比尔的等则系统分析了冲击波对鱼类的损伤机理及防护效果^[10]。这些研究极大丰富了水下爆破的理论基础与防护技术,但多集中于单一效应或局部因素分析,对多因素耦合作用下的综合影响等级仍缺乏系统性评估。虽然梁开水、贾钦基等尝试运用 AHP-FUZZY 方法进行相关评价^[11,12],但仍存在影响分级不明确、未充分考虑生态环境因素,以及结果呈现不够直观等问题。

为克服上述不足,本文旨在构建一种能够融合定性判断与定量转换、兼顾确定性与不确定性的水下钻孔爆破施工影响综合评估模型。研究提出将 AHP 与云模型进行耦合:首先,利用 AHP 系统分析各影响因素的层次结构与相对权重,以降低主观随意性;其次,引入云模型实现“施工影响等级”这一定性概念与多源监测定量数据之间的不确定性映射,通过云图直观呈现风险的分布与隶属状态。本文首先构建涵盖工程水文地质、爆破参数与安全控制 3 个一级指标及 20 项二级指标的多级评价指标

体系,将施工影响划分为绿、黄、橙、红 4 个等级;继而详细阐述 AHP-云模型耦合的评价原理与计算流程;最后,以长江上游涪陵至丰都段航道整治工程为例进行应用验证,以期水下钻孔爆破施工的动态风险评价、科学决策与方案优化提供新方法。

1 AHP-云模型系统的构建

1.1 AHP 法

层次分析法(AHP)的核心思想是通过分层比较和定量判断,将复杂问题分解为层次结构,并系统性地确定各因素的相对重要性^[13]。其基本计算步骤如下所示:

(1)对同一层次中的因素进行两两比较,使用 1~9 标度法量化其相对重要性^[14],如表 1 所示。

(2)判断矩阵及一致性检验

按照标度思维建立判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1a} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2a} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{ma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A_1}{A_1} & \frac{A_1}{A_2} & \cdots & \frac{A_1}{A_n} \\ \frac{A_2}{A_1} & \frac{A_2}{A_2} & \cdots & \frac{A_2}{A_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{A_m}{A_1} & \frac{A_m}{A_2} & \cdots & \frac{A_m}{A_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

判断矩阵 A 为正定互反矩阵,通过求解判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 和对应的特征向量 W ,得到各因素的权重。

公式如下

$$\bar{W}_{ij} = A_{ij} / \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad (2)$$

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \bar{W}_{ij}} / \sum_{j=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \bar{W}_{ij}} \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (4)$$

式中, A_{ij} 指第 i 个一级影响因素的第 j 个二级影响因素的标度值。

同时,需要以式(5)对各判断矩阵的一致性进行验证,以排除异常结果。

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$$
$$C.R = C.I./R.I$$

(5)

式中: $C.I.$ 为一致性指标值; n 为矩阵阶数; $R.I.$ 为随机一致性指标,其标准值如表 2 所示。当 $C.R. < 0.1$ 时,则认为判断矩阵的一致性满足要求^[15]。

表 1 标度含义
Table 1 The meaning of number

数值 Numerical value	含义 Meaning
1	表示两个元素相比,具有相同重要性 Indicating that one element has the same level of importance as the other.
3	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素稍微重要 Indicating that one element is slightly more important compared to the other element.
5	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素明显重要 Indicating that one element is significantly more important than the other when comparing the two elements.
7	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素强烈重要 Indicating that one element is more significant and important compared to the other element.
9	表示两个元素相比,一个元素比另一个元素极其重要 Indicating that one element is extremely important compared to the other element.

注:2,4,6,8 为上述判断的中值
Note:2,4,6,and 8 represent the median values of the above judgment.

表 2 随机一致性指标取值
Table 2 Random consistency indicator value

阶数 Degree	$R.I.$	阶数 Degree	$R.I.$
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.36
3	0.52	8	1.41
4	0.89	9	1.46
5	1.12	10	1.49

1.2 云模型

云模型理论的核心思想是:一个定性概念“影响等级”在定量论域中的表现并非一个确定值,而是一系列具有随机性的“云滴”,并通过三个数字特征“ Ex, En, He ”来整体描述该概念的模糊性与随机性^[16]。其中,期望(Ex)表示云滴在定量论域分布的平均值,最能代表该定性概念的点。熵(En)则代表定性概念的模糊程度。熵越大,概念可接受的数值范围越宽,越模糊。而超熵(He)则表明熵的不确定度,反映云滴的离散程度。超熵越大,云滴的厚度和离散度越大。这三个数字特征值共同刻画了云模型中的定性概念 C ^[17]。

云模型评价理论设定 U 为定量论域,该论域上存在一个定性概念 C ,其由三个参数 Ex, En 与 He 描述。对于 U 中的任意元素 x ,均可视作 C 在该论域

内的一次随机实现,而 x 对于 C 的确定度记作 $\mu(x)$,其取值范围在 0 到 1 之间。假设云滴 x 遵循高斯分布,其期望为 Ex ,方差为 En'^2 ,即 $x \sim N(Ex, En'^2)$;这里的 En' 本身亦是随机变量,它服从以 En 为期望、 He^2 为方差的高斯分布,即 $En' \sim N(En, He^2)$;在此基础上, x 对 C 的确定度满足如下关系

$$\mu(x) = \exp[-(x - Ex)^2/2(En')^2]$$

(6)

在定量论域 U 上,与定性概念 C 相对应的各个定量值所对应的确定度共同构成的集合即称作云,其中的每个 x 则为一个云滴,多个随机云滴的集合能形成标准正态云图,如图 1 所示^[18,19]。

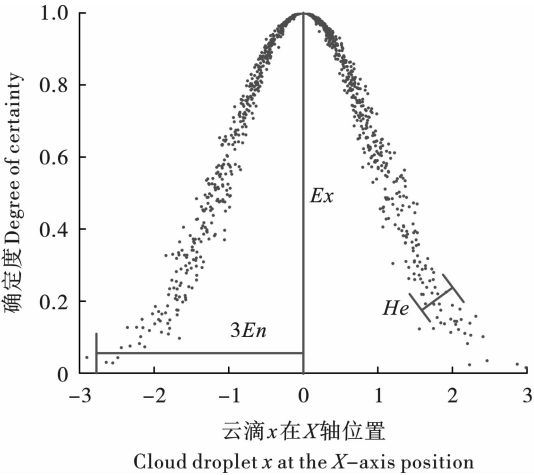


图 1 标准正态云图
Fig. 1 Standard normal cloud diagram

1.3 AHP-云模型

在云模型的实际应用中,通常借助正向云算法,并依据最大综合确定度原则,来判定研究对象的所属风险等级。然而,该模型对各等级的均值参数较为敏感,且评价指标的量纲差异会对云数字特征产生显著影响。为此,本文采用层次分析法(AHP)来确定各评价指标的权重,并基于生成的综合云来判断对象等级。

指标权重的设定在多因素综合评价中至关重要,直接影响最终的风险评价结果。通过 AHP 结合专家打分,可以得到各评价指标的权重 ω_i ,并需通过一致性检验,以确保权重能够合理反映不同指标对综合评价影响程度的差异。其次,进行指标参数的标准化处理与云生成。为消除不同量纲对评价结果的干扰,需对所有评价指标进行标准化。若指标值越大代表越有利,则归类为收益性指标;反之则为消耗性指标^[20]。其标准化处理可分别通过公式(7)和(8)来实现,具体计算公式如下:

收益性指标

$$b_{ij} = \frac{I_{ij} - \min_j(I_{ij})}{\max_j(I_{ij}) - \min_j(I_{ij})} \quad (7)$$

消耗性指标

$$b_{ij} = \frac{\max_j(I_{ij}) - I_{ij}}{\max_j(I_{ij}) - \min_j(I_{ij})} \quad (8)$$

式中:下标 i, j 表示指标序号; i 为第一层级因素; j 为第二层级因素; b_{ij} 是指标标准化后的值; I_{ij} 为指标值; $\max_j(I_{ij})$ 、 $\min_j(I_{ij})$ 表示指标对应的最大与最小值。指标值越大对指标越有利,则为收益性指标;相反则为消耗性指标。

利用下式(9)对标准化处理之后得指标参数进行运算,可得出所有指标不同影响等级下的标准特征值(Ex, En, He)。

$$\left. \begin{aligned} Ex &= (Z_{\max} + Z_{\min})/2 \\ En &= (Z_{\max} - Z_{\min})/6 \\ He &= k \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $Z_{\max}$ 、 $Z_{\min}$ 表示指标对应的等级的界限值;对于单边界的变量,如 $[Z_{\min}, +\infty]$ 、 $[-\infty, Z_{\max}]$, 根据实际数据边界确定缺失边界后代入计算; k 为反映评语模糊程度的数值,通常取 0.01。

根据式(10)可求得不同影响等级对应的正态云模型数字特征,进而得到标准综合评价云图。

$$\left. \begin{aligned} Ex^0 &= \frac{\sum_{i=1}^n Ex_i En_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n En_i \omega_i} \\ En^0 &= \frac{\sum_{i=1}^n En_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \\ He^0 &= k \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: (Ex^0, En^0, He^0) 是标准综合云模型数字特征值; Ex_i, En_i 分别为由式(9)所得各指标不同影响等级对应标准期望和标准熵; ω_i 为各指标权重值。

在进行实际工程应用时,对于各个指标取得的实际值。可采用公式(11~12)计算实际工程的指标不同影响等级确定度,并由最大确定度原则确定所属工程子样本的影响等级。再由公式(12)求得整个工程的综合云模型数字特征值,进而得到整个工程所属的影响等级云图。

$$Y = \sum_{i=1}^n \mu(x_i) \omega_i \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} Ex^* &= \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p x_i \\ En^* &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p |x_i - Ex^*| \\ He^* &= \sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (x_i - Ex^*)^2 - (En^*)^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: p 为样本数; Y 为确定度; x_i 为云滴; (Ex^*, En^*, He^*) 为实际工程所得的综合云模型数字特征值。

1.4 技术路线图

AHP-云模型的总体实施路线图如图2所示。

2 施工影响性等级及评价指标

2.1 施工影响性等级

为对水下钻孔爆破施工的综合影响进行直观、快速的研判与分级预警,本文将施工影响性划分为绿、黄、橙、红4个等级。绿色代表影响很低,可按原方案施工;黄色代表影响较低,需加强监控;橙色代表影响较高,须采取重点防护措施;红色代表影响很高,应调整方案或暂停作业,直至风险可控。上述四级施工影响性等级将作为后续评价指标分级与AHP-云模型综合评估的判定依据。

2.2 施工影响性评价指标及分级标准

施工影响主要受工程水文地质、爆破参数与安全控制三类因素的耦合作用。基于此,构建了包含3个一级指标与20个二级指标的评价体系(表3)。其中,工程水文地质(I_1)涵盖水深、流速等7项指标,决定环境本底与能量传播介质特性;爆破参数(I_2)包括单段最大药量、堵塞长度等5项指标,直接决定爆破能量释放特性;安全控制(I_3)包含哑炮率、

安全阈值、生态敏感度等8项指标,反映防护对象敏感性与管理控制水平。各指标均按影响程度划分为

4级,以量化映射施工影响等级^[21-32]。

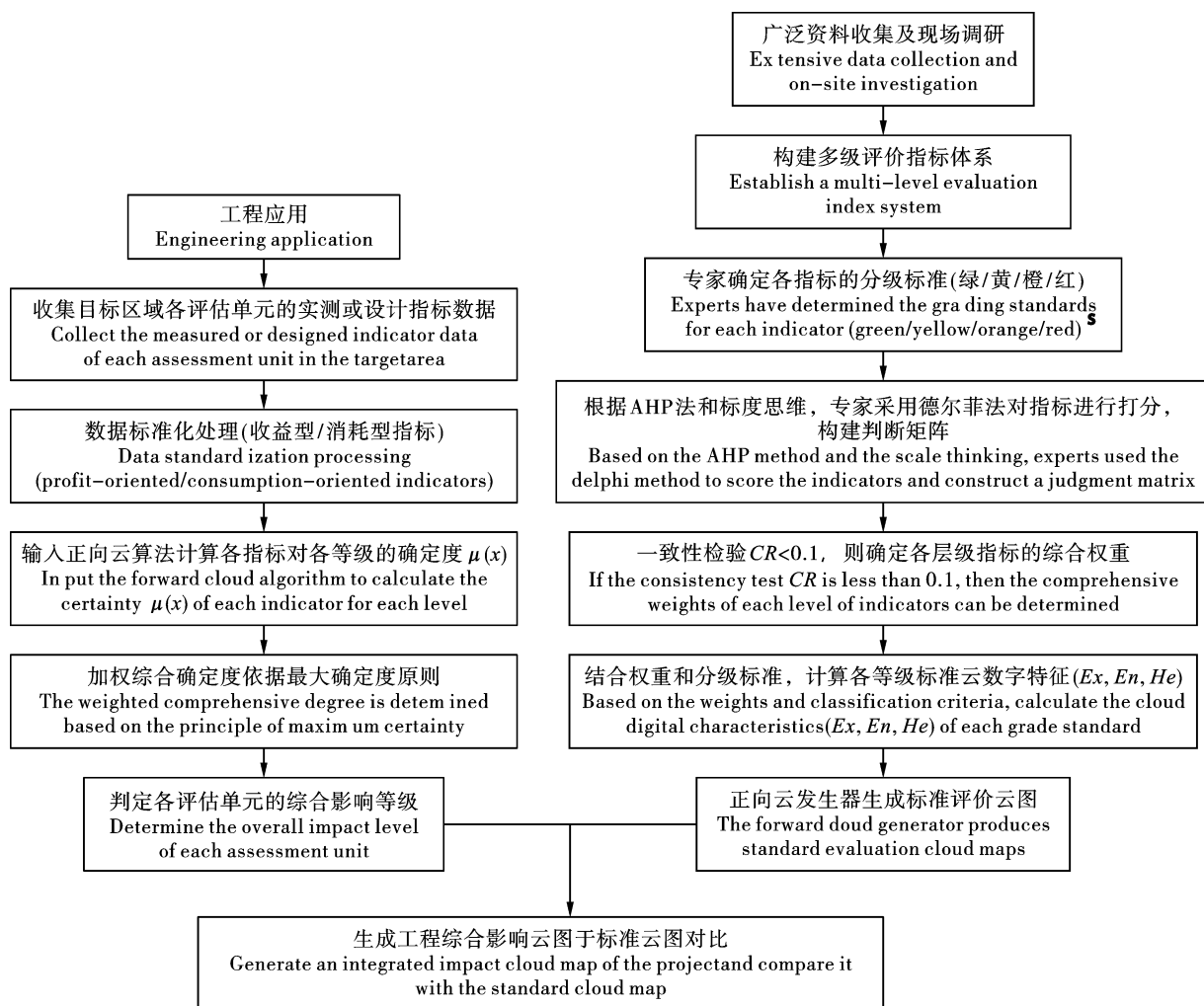


图2 AHP-云模型总体实施路线

Fig. 2 Overall implementation route of the AHP-Cloud model

由表3可知,其中的“敏感建构筑物等级与生态敏感度”不能进行量化描述,为使其能更好地应用于模型中,参照《爆破作业项目管理要求》(GA991—2025)和《爆破安全规程》(GB6722—2011),将敏感建构筑物等级依据:“无核心公共设施与民房设施—低影响(绿)、一般厂矿企业—较低影响(黄)、城市区域与交通枢纽—中等影响(橙)、国家机关驻地与重要公共设施—高影响(红)”定量划分为0~4的整数选取区间。而生态敏感度也依据生态评估类文献^[33],按“河流生态恢复能力强且无物种保护区、恢复能力较弱但无保护物种、恢复能力弱且有保护物种洄游通道、有保护物种且为其重要产卵场、索饵场和越冬场”划分为四个等级,量化标准与敏感建构筑物等级一致。

2.3 综合评价指标权重

采用AHP法确定各级评价指标的权重。根据前述评价体系构建一级与二级指标判断矩阵,为确保权重赋值的工程代表性与科学性,邀请项目设计单位、施工单位、工程监理单位、项目业主单位以及高校爆破工程与安全技术研究团队的共12位具有高级技术职称或十年以上相关领域经验的专家组成咨询小组。咨询过程采用德尔菲法(Delphi)进行^[34]。专家们依据1~9标度法,结合工程实际与专业经验,对同层次指标进行两两比较,独立完成匿名判断矩阵问卷。利用特征向量法计算权重,并进行一致性检验。结果表明,各判断矩阵的一致性比率均小于0.1,满足AHP方法的一致性要求,权重结果可靠,具体见表4~表7。

表 3 水下钻孔爆破施工影响性评价指标及分级标准

Table 3 Evaluation indices and classification criteria for underwater blasting construction impact

一级指标 Primary indicators	二级指标 Secondary indicator	绿色 Green	黄色 Yellow	橙色 Orange	红色 Red
工程水文地质 I_1 Engineering hydrogeology I_1	水深 Water depth/m I_{11}	< 10	10 ~ 20	20 ~ 30	> 30
	流速 Flow rate m/s I_{12}	< 0.5	0.5 ~ 1.5	1.5 ~ 2.5	> 2.5
	蒲福风级 Beaufort wind scale I_{13}	1 ~ 3	3 ~ 6	6 ~ 9	> 9
	岩石强度 Rock strength/MPa I_{14}	> 60	30 ~ 60	15 ~ 30	< 15
	岩体完整性 Rock integrity I_{15}	0.75 ~ 1	0.55 ~ 0.75	0.35 ~ 0.55	0 ~ 0.35
	地形地貌(坡度) Topography and landform(slope) $\theta/^\circ$ I_{16}	< 10	10 ~ 20	20 ~ 30	> 30
	覆盖层厚度 Overlay thickness/m I_{17}	< 0.5	0.5 ~ 1.5	1.5 ~ 2.5	> 2.5
爆破参数 I_2 Blasting parameters I_2	单段最大药量 Maximum charge per delay/kg I_{21}	0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 90	> 90
	堵塞长度 Stemming length/m I_{22}	> 1	0.7 ~ 1	0.4 ~ 0.7	0 ~ 0.4
	延时设置 Delay setting/% I_{23}	< 25	25 ~ 45	45 ~ 65	> 65
	孔位偏差 Blasthole deviation/m I_{24}	< 0.1	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5	> 0.5
	最小抵抗线 Minimum resistance line/m I_{25}	< 3	3 ~ 5	5 ~ 8	> 8
安全控制 I_3 Security control I_3	哑炮率 Misfire rate I_{31}	< 0.02	0.02 ~ 0.05	0.05 ~ 0.1	> 0.1
	水中冲击波安全阈值 Safety threshold of water shock waves/kPa I_{32}	> 75	50 ~ 75	25 ~ 50	< 25
	爆破振动速度安全阈值 Safe threshold for blast-induced vibration velocity/(cm · s ⁻¹) I_{33}	> 3.5	2 ~ 3.5	0.5 ~ 2	< 0.5
	频率系数 Frequency coefficient(f_b/f_g) I_{34}	> 7	5 ~ 7	3 ~ 5	< 3
	敏感建筑物等级 Sensitive building structure classification I_{35}	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4
	爆源距离 Distance to blast center/m I_{36}	> 500	300 ~ 500	100 ~ 300	< 100
	生态敏感度 Ecological sensitivity I_{37}	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4
	通航密度 Navigation density/(per/hour) I_{38}	< 2	2 ~ 4	4 ~ 6	> 6

由表4~表7可以看出,一级指标中安全控制的重要性最高,其次为爆破参数,工程水文地质相对较低,说明施工影响性更敏感于安全管理水平和爆破参数设置。二级指标中,流速、岩石强度、单段最大药量、孔位偏差、哑炮率、水中冲击波安全阈值、敏感构筑物等级、爆源距离、生态敏感度等综合权重较大,是控制施工影响性的主要因子,其余指标则主要起到修正和补充作用。上述综合权重将作为后续云模型计算与施工影响等级判定的基础输入参数。

3 影响评价对比基准云图

结合各个指标的综合权重值,利用式(10)计算得到本模型中不同级别的标准云模型综合数字特征值:绿色级($Ex = 0.2334$ 、 $En = 0.0551$ 、 $He = 0.01$),黄色级($Ex = 0.4534$ 、 $En = 0.0463$ 、 $He = 0.01$),橙色级($Ex = 0.7650$ 、 $En = 0.0463$ 、 $He = 0.01$),红色级($Ex = 0.9827$ 、 $En = 0.1009$ 、 $He = 0.01$);利用软件根据云模型综合数字特征值运算得出施工影响等级的标准模型综合评价云图,见图3。

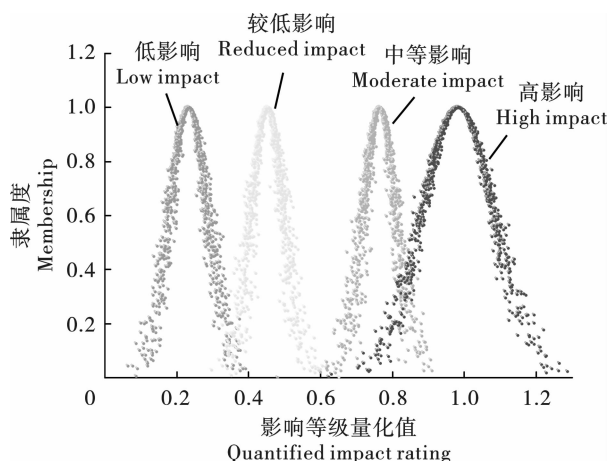


图3 标准云图

Fig. 3 Standard cloud image

标准评价云图的作用是为后续的实际施工评价提供一个可以参考的标准,后续可以利用现场实测的各个评价指标数据得到整个工程的综合云图,并将综合评价云图与云模型标准评价云图进行对比,就可得知工程施工的影响等级。

4 工程应用与分析

4.1 工程概述

长江上游涪陵至丰都河段位于川江中段,施工区域内主要分布和尚滩、大梁、大渡口、老虎梁等礁石滩段,该河段局部水流湍急、水深不足,碍航程度较重,已难以满足现有通航需求,亟需采用爆破清礁

等措施进行航道整治(图4),整治河段全长约48 km,长江上游航道里程为536~488 km。



图4 爆破清礁整治工程位置

Fig. 4 Location of reef clearing project by blasting

工程施工河段水流较急,江岸两侧分布有居民房屋及其他构筑物,少数河段还跨越桥梁等线性工程设施,工程施工的安全风险较高。施工水域鱼类资源较为丰富,存在多个数量和规模不同的鱼群,爆破清礁对水生生态环境的潜在影响需予以重点关注。

在整治工程实施过程中,通过现场地质勘察与施工方案比选,系统获取了各项评价指标的基础数据。各整治河段评价指标的原始测量值见表8。

根据各指标的物理含义和监测需求,在和尚滩、大梁、老虎梁和大渡口4处整治河段布设了若干测线和测点,开展了多阶段监测,以获取反映各江段典型工况与平均影响水平的基础数据。工程水文地质参数由工程前期地质勘查结果及区域水深流速历年统计结果获取;爆破参数为现场测得与记录结果;安全控制参数主要参考国家颁布的爆破施工安全规程,生态保护注意事项及实地勘察与统计结果。通航密度与鱼类资源及水生生态相关指标则依托专业监测单位的调查成果。

4.2 施工影响等级评估

将各个整治江段的评价指标数据通过式(7)与式(8)进行标准化处理,再利用式(11)计算出各指标在不同影响等级下的确定性程度,综合后得到各江段的综合影响等级评估结果,其结果见表9。

根据最大确定度原则^[35],和尚滩和大渡口江段施工对周边环境的影响等级为黄色;大梁和老虎梁江段的施工对周边环境的影响等级为橙色。

通过上表所述结果可知各整治江段的综合影响等级,而整个施工项目的影响等级可由式(12)结合指标权重,计算得到整个工程项目的综合云模型数字特征值为($Ex = 0.8175$ 、 $En = 0.0580$ 、 $He = 0.01$);由此,得出工程所属的影响性评估云图,并将其与工程标准评价云图进行对比,得如图5所示对比云图。

表 8 各评价指标测量值
Table 8 Measurement values of each evaluation index

整治江段 Remediated river reach	I_{11}/m	$I_{12}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	I_{13}	I_{14}/MPa	I_{15}	$I_{16}/^\circ$	I_{17}/m	I_{21}/kg	I_{22}/m	$I_{23}/\%$
和尚滩 Heshang beach	10	1.05	4	50	0.65	30	0.7	50	3	43.7
大梁 Daliang	9.5	2.10	7	25	0.60	30	0.6	65	3	43.7
老虎梁 Laohuliang	8.6	2.05	7	25	0.50	40	0.5	65	3	43.7
大渡口 Dadukou	12.5	1.00	4	45	0.80	15	0.8	44	3	43.7

整治江段 Remediated river reach	I_{24}/m	I_{25}/m	$I_{31}/\%$	I_{32}/kPa	$I_{33}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$I_{34}/(f_b/f_g)$	I_{35}	I_{36}/m	I_{37}	I_{38}/h
和尚滩 Heshang beach	0.2	3.2	0.035	60	2.0	10.2	2	144.4	2	3
大梁 Daliang	0.4	3.2	0.07	60	1.0	6.8	2	279.3	3	5
老虎梁 Laohuliang	0.4	3.2	0.07	60	1.0	6.5	2	466.3	3	5.2
大渡口 Dadukou	0.2	3.2	0.035	60	2.0	10.5	2	251.6	2	2.8

注:大梁江段存在重要执法机关单位,鱼群重要生存区域;老虎梁江段则存在多所造船单位,亦存在多个鱼群。
Note:The Daliangjiang section is home to important law enforcement agencies and units,as well as significant fish habitats. The Laohuliangjiang section,on the other hand,has several shipbuilding units and multiple fish populations.

表 9 各整治江段的影响等级评估结果
Table 9 Assessment results of the impact grade of the regulation river segment

整治江段 Remediated river reach	综合确定性 Overall confidence level				影响等级 Impact severity
	μ (绿) Green	μ (黄) Yellow	μ (橙) Orange	μ (红) Red	
和尚滩 Heshang beach	0.1096	0.2817	0.1465	0.0656	黄色 Yellow
大梁 Daliang	0.0397	0.1272	0.1287	0.0741	橙色 Orange
老虎梁 Laohuliang	0.0408	0.1974	0.2013	0.0934	橙色 Orange
大渡口 Dadukou	0.0864	0.1709	0.0981	0.0656	黄色 Yellow

由图 5 可知,将现场实际的评价云图与标准云图放于一图比较,能够清晰明了地知晓工程所属得影响等级。由图可知,该工程的综合影响等级云滴(深绿)在橙、红两色区域均有分布,其中云滴主体落于橙色区域,基本与橙色区域重合,略微偏向红色区域,这说明从项目整体视角看,施工处于较高影响水平,需对施工方案进行整体优化,并重点加强对高

影响等级江段的管控,以降低施工对周边构筑物与鱼类栖息地的影响。

4.3 现场监测结果验证分析

上述 4.2 所述的施工影响等级评估结果是基于工程前期勘察和相关安全规范得到的,它反映的是施工整体的预期影响等级,而实际施工影响等级还需要对各施工段进行指标数据的跟踪监测才可获

知,并验证模型的可靠性。

为验证本文所建 AHP-云模型对各整治江段综合影响等级评估的可靠性,在工程实施期间,对和尚滩、大梁、老虎梁及大渡口四个江段分别开展了系统的现场跟踪监测。监测目的在于获取反映各江段典型施工条件与平均影响水平的实证数据,用以佐证模型给出的区域综合评级。主要包括:采用爆破测振仪与冲击波传感器测量老虎梁、大梁、和尚滩和大渡口等施工区域构筑物处的地震波与水中冲击波。在各江段施工水域设置观测点,于爆破施工期间及结束后观察鱼类的生理状态(如充血、死亡率),以定性评估爆破对水生生态的累积或典型影响。监测时间为 2025 年 7~9 月爆破期。测量仪器与生态影响情况如图 6 所示。

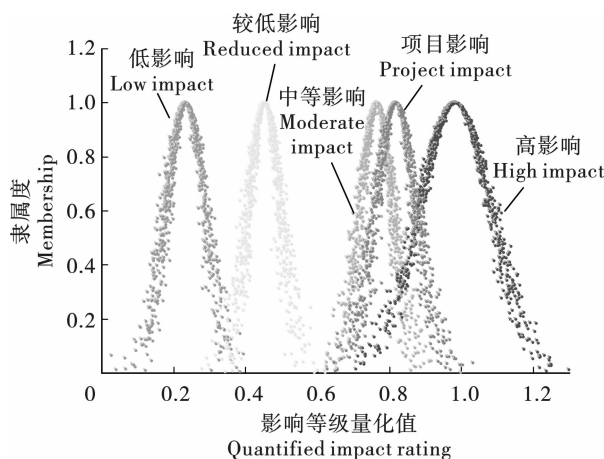


图 5 施工影响等级综合评价云图

Fig. 5 Cloud map of comprehensive evaluation of construction impact grade

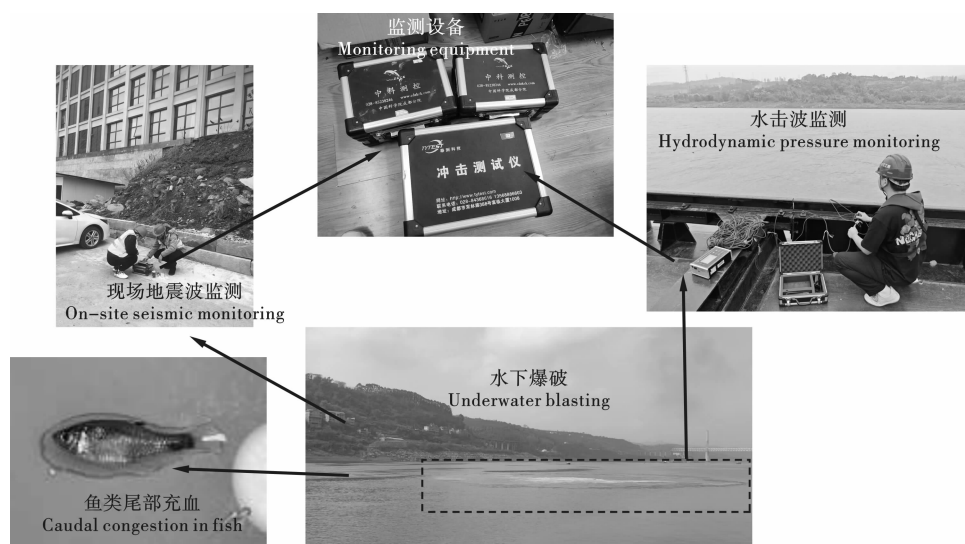


图 6 现场监测图

Fig. 6 Monitoring instrument and site diagram

将各江段的现场监测结果反馈专家咨询组,咨询组得出此时现场的影响性评估结果,如表 10 所示。将其与模型评估的综合影响等级进行对照分析。

表 10 中的对比分析表明:被评为“黄色”等级的和尚滩、大渡口江段,实测冲击波压力与振动速度总体较低,鱼类生理状态基本正常,与“较低影响”定性相符。被评为“橙色”等级的大梁、老虎梁江段,实测冲击波压力处于较高水平,鱼类出现部分充血,表明实际影响程度确实达到了“中等”水平,其中大梁江段因环境敏感性强,影响程度更趋近于等级上限。综上所述,现场监测数据从宏观上印证了模型对不同江段综合影响等级划分的合理性。这种“区域综合评估、监测数据印证”的模式证明,AHP-

云模型能够有效整合多源信息,实现对施工区域的前瞻性风险分级,其成果可为制定差异化的施工与管控策略提供科学依据,超越了传统单点监测的局限性。

5 结论

针对水下钻孔爆破施工影响评估中因素复杂、不确定性强的特点,本文研究取得以下主要结论:

(1)构建了融合 AHP 与云模型的耦合评估框架,建立了涵盖工程水文地质、爆破参数与安全控制 3 个一级指标及 20 项二级指标的评价体系。该方法有效综合了指标权重判断与模糊随机信息处理能力,实现了施工影响从定性描述到定量分级之间的不确定性映射,为复杂水下环境的风险评估提供了

新途径。

表 10 评价结果对比分析
Table 10 Comparative analysis of evaluation results

评价江段 Assessment river reach	水深 Water depth	流速 Flow velocity	岩石 强度 Rock strength	孔位 偏差 Hole deviation	单段 最大药量 Maximum charge per delay	通航密度 Navigation density	峰值压力 Peak pressure/ kPa	质点振动 速度 Particle vibration velocity/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	振动响应 状态 Vibration response status	鱼群生理 状态 Fish physiological status	评估结果 Assessment result
和尚滩 Heshang beach	14.2	0.8	50	0.12	45	4	53	0.24	轻微振动 Slight vibration	轻微充血 Slight hyperemia	无影响 No impact
大梁 Daliang	18.6	1.6	45	0.32	68	4	74	0.38	震感明显 Distinct vibration sensation	部分充血 Partial hyperemia	高影响 High impact
老虎梁 Laohuliang	17.3	1.8	48	0.28	60	4	63	0.28	震感明显 Distinct vibration sensation	部分充血 Partial hyperemia	较高影响 High impact
大渡口 Dadukou	16.5	1.6	50	0.15	55	4	37	0.11	轻微振动 Slight vibration	完好 Normal	无影响 No impact

注：“评价结果”应理解为“模型评估的综合等级”，而前面监测数据是对该等级合理性的“印证情况”。
Note: “Evaluation results” should be understood as “the comprehensive grade of model assessment”, while the previous monitoring data serves as “verification evidence” for the rationality of this grade.

(2)在长江上游涪陵—丰都河段礁石清理工程中的应用表明,模型能够有效识别并量化不同江段的施工影响等级:大梁江段属高影响(红色),老虎梁江段属中等影响(橙色),和尚滩与大渡口江段为较低影响(黄色)。整体工程综合云图显示,影响云滴主体分布于橙色区域并向红色区域偏移,揭示工程整体处于较高风险水平,需实施差异化重点管控。

(3)现场监测数据与模型评价结果基本一致,验证了该方法的可靠性与适用性。研究表明,相较于传统方法,AHP-云模型不仅提升了多因素耦合评估的准确性,还能通过云图直观呈现风险分布与趋势,从而为施工风险的动态预警与防护决策提供科学、可视化的理论工具。

参考文献 (References)

[1] 张社荣,王高辉,王超,等. 水下爆炸冲击荷载作用下混凝土重力坝的破坏模式[J]. 爆炸与冲击,2012,32(5):501-507.

[1] ZHANG She-rong, WANG Gao-hui, WANG Chao, et al. Failure modes of concrete gravity dams subjected to underwater explosion shock loading [J]. Explosion and

Shock Waves,2012,32(5):501-507. (in Chinese)

[2] 赵根,吴从清,王文辉. 爆破水中冲击波对鱼类损伤研究[J]. 工程爆破,2011,17(4):103-105.

[2] ZHAO Gen, WU Cong-qing, WANG Wen-hui. Study on fish injury caused by shock wave of blasting in water[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(4): 103-105. (in Chinese)

[3] 刘屹颀,蔡子勇,乔世范,等. 引水工程水下钻孔爆破水击波特性[J]. 爆破,2023,40(4):132-141.

[3] LIU Yi-qí, CAI Zi-yong, QIAO Shi-fan, et al. Characteristics of water shock wave in underwater drilling blasting of water diversion project [J]. Blasting, 2023, 40(4): 132-141. (in Chinese)

[4] 张社荣,孔源,王高辉. 水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析[J]. 振动与冲击,2014,33(13):148-153.

[4] ZHANG She-rong, KONG Yuan, WANG Gao-hui. Comparison of shock wave propagation characteristics in underwater and air explosions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(13): 148-153. (in Chinese)

[5] 刘天云,龚书堂,胡伟才,等. 水下钻孔爆破水击波的传播规律及气泡帷幕对水击波的削减作用[J]. 爆破器材,2020,49(2):16-22.

- [5] LIU Tian-yun, GONG Shu-tang, HU Wei-cai, et al. Propagation law of water shock wave in underwater drilling blasting and attenuation effect of bubble curtain on water shock wave[J]. Explosive Materials, 2020, 49(2): 16-22. (in Chinese)
- [6] 谢达建, 吴立, 洪江, 等. 气泡帷幕对水下爆破冲击波的削弱作用研究[J]. 人民长江, 2018, 49(8): 72-77.
- [6] XIE Da-jian, WU Li, HONG Jiang, et al. Study on weakening effect of bubble curtain on shock wave of underwater blasting[J]. Yangtze River, 2018, 49(8): 72-77. (in Chinese)
- [7] 曹棉, 李嘉龙, 邹永胜, 等. 水下钻孔爆破减振孔与气泡帷幕协同减震效果研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 42-47.
- [7] CAO Mian, LI Jia-long, ZOU Yong-sheng, et al. Study on synergistic damping effect of shock absorption holes and bubble curtain in underwater drilling blasting[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(4): 42-47. (in Chinese)
- [8] 姜涛, 鞠翔宇, 吴德. 水下爆炸冲击伤阈值与安全距离计算综述[J]. 工程爆破, 2023, 29(5): 126-131, 147.
- [8] JIANG Tao, JU Xiang-yu, WU De. Review on injury threshold and safety distance calculation of underwater explosion shock[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(5): 126-131, 147. (in Chinese)
- [9] 阳生权, 廖先葵, 刘宝琛. 爆破地震安全判据的缺陷与改进[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(3): 223-228.
- [9] YANG Sheng-quan, LIAO Xian-kui, LIU Bao-chen. Defects and improvement of safety criterion for blasting vibration[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3): 223-228. (in Chinese)
- [10] 阿比尔的, 蒲运杰, 刘露, 等. 水下爆破对水生物的损伤机理及防护技术研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11049-11060.
- [10] ABIER De, PU Yun-jie, LIU Lu, et al. Review on damage mechanism and protection technology of underwater blasting to aquatic organisms[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11049-11060. (in Chinese)
- [11] 梁开水, 柴修伟, 王玉杰. 水下钻孔爆破施工的 AHP-FUZZY 技术[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(1): 95-98.
- [11] LIANG Kai-shui, CHAI Xiu-wei, WANG Yu-jie. AHP-FUZZY technique for underwater drilling blasting construction[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(1): 95-98. (in Chinese)
- [12] 贾钦基, 吴立, 彭亚雄, 等. 基于 AHP-FUZZY 法的水下爆破影响区域危险性评价[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(7): 112-117, 136.
- [12] JIA Qin-ji, WU Li, PENG Ya-xiong, et al. Risk assessment of underwater blasting influence area based on AHP-FUZZY method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(7): 112-117, 136. (in Chinese)
- [13] KIM J H, KIM C Y, KIM G, et al. Probabilistic tunnel collapse risk evaluation model using analytical hierarchy process (AHP) and Delphi survey technique[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 120: 104262.
- [14] THOMAS L Saaty, LEI Zhang. The need for adding judgment in bayesian prediction[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2016, 15(4): 733-761.
- [15] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [15] DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian, et al. Analysis of weight calculation methods in analytic hierarchy process and its application research[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100. (in Chinese)
- [16] 杨光, 刘敦文, 褚夫蛟, 等. 基于云模型的隧道塌方风险等级评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 95-101.
- [16] YANG Guang, LIU Dun-wen, CHU Fu-jiao, et al. Risk grade evaluation of tunnel collapse based on cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 95-101. (in Chinese)
- [17] PENG Ya-xiong, WU Li, ZUO Qing-jun, et al. Risk assessment of water inrush in tunnel through water-rich fault based on AHP-Cloud model[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 301-317.
- [18] 刘广进, 彭亚雄, 苏莹, 等. 基于 AHP-云模型的隧道断层破碎带施工风险评价[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(3): 118-128.
- [18] LIU Guang-jin, PENG Ya-xiong, SU Ying, et al. Construction risk assessment of tunnel fault fracture zone based on AHP-cloud model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(3): 118-128. (in Chinese)
- [19] 殷秀红. 水下钻孔爆破孔网参数优化研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- [19] YIN Xiu-hong. Study on optimization of hole network parameters for underwater drilling blasting[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [20] LIU Zao-bao, SHAO Jian-fu, XU Wei-ya, et al. Comprehensive stability evaluation of rock slope using the cloud

- model-based approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6): 2239-2252.
- [21] 陈国芳,郭鑫智,耿加波,等. 水下钻孔爆破应力分析与孔网参数优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6853-6861.
- [21] CHEN Guo-fang, GUO Xin-zhi, GENG Jia-bo, et al. Stress analysis and hole network parameter optimization of underwater drilling blasting [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6853-6861. (in Chinese)
- [22] WAN Yu, LI Wen-jie, DU Hong-bo, et al. Investigation of shock wave pressure transmission patterns and influencing factors caused by underwater drilling blasting [J]. Water, 2022, 14(18): 2837-2837.
- [23] 胡春红. 邻近栈桥在水下爆破地震作用下的动力响应及安全性评价[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [23] HU Chun-hong. Dynamic response and safety evaluation of adjacent trestle under blasting vibration in underwater blasting [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [24] 孙晓宇. 水下深埋岩石爆破振动与动水压力变化规律研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2020.
- [24] SUN Xiao-yu. Study on blasting vibration and dynamic water pressure variation law of underwater deep buried rock blasting [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020. (in Chinese)
- [25] 李观正. 水下钻孔爆破施工中的安全和质量控制[J]. 珠江水运, 2021(18): 55-56.
- [25] LI Guan-zheng. Safety and quality control in underwater drilling blasting construction [J]. Pearl River Water Transport, 2021(18): 55-56. (in Chinese)
- [26] 张浩楠,张春辉,张磊,等. 大型浮动冲击平台冲击环境特性研究[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 158-165.
- [26] ZHANG Hao-nan, ZHANG Chun-hui, ZHANG Lei, et al. Research on the shock environment characteristics of large floating shock platforms [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(3): 158-165. (in Chinese)
- [27] 李启佳,曹福,邹永胜,等. 深水条件下水深对炸药性能影响研究[J]. 爆破, 2024, 41(3): 162-170.
- [27] LI Qi-jia, CAO Fu, ZOU Yong-sheng, et al. Research on the influence of water depth on the performance of explosives under deep water conditions [J]. Blasting, 2024, 41(3): 162-170. (in Chinese)
- [28] 费鸿禄,孙晓宇,关福晨,等. 水下深埋岩石爆破振动衰减规律研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 26-33, 55.
- [28] FE Hong-lu, SUN Xiao-yu, GUAN Fu-chen, et al. Research on the attenuation law of underwater deep-buried rock blasting vibration [J]. Blasting, 2020, 37(3): 26-33, 55. (in Chinese)
- [29] 万佳伟,钟冬望,徐顺香,等. 水下爆破减振孔对减振效果的影响研究[J]. 爆破, 2025, 42(2): 158-166, 177.
- [29] WAN Jia-wei, ZHONG Dong-wang, XU Shun-xiang, et al. Research on the impact of underwater blasting vibration reduction holes on vibration reduction effect [J]. Blasting, 2025, 42(2): 158-166, 177. (in Chinese)
- [30] 陈春晖,吴立,赵均文,等. 水下钻孔爆破对紧邻建(构)筑物安全性影响研究[J]. 爆破, 2016, 33(2): 117-122.
- [30] CHEN Chun-hui, WU Li, ZHAO Jun-wen, et al. Research on the impact of underwater drilling and blasting on the safety of adjacent buildings and structures [J]. Blasting, 2016, 33(2): 117-122. (in Chinese)
- [31] 黎志键. 水下钻孔爆破减震安全技术及应用[J]. 爆破, 2012, 29(1): 91-93, 109.
- [31] LI Zhi-jian. Underwater drilling and blasting shock absorption safety technology and its application [J]. Blasting, 2012, 29(1): 91-93, 109. (in Chinese)
- [32] 王光辉. 近距离水下爆破建筑物保护技术[J]. 爆破, 2010, 27(2): 106-108, 114.
- [32] WANG Guang-hui. Close-range underwater blasting technology for protecting buildings [J]. Blasting, 2010, 27(2): 106-108, 114. (in Chinese)
- [33] 生态环境部环境工程评估中心. 全国省级生态环境部门建设项目环境影响评价分级审批文件汇编(2018年)[M]. 北京:中国环境出版集团, 201905: 212.
- [33] Environmental Engineering Assessment Center, Ministry of Ecology and Environment. Compilation of documents on hierarchical examination and approval of construction project environmental impact assessment by provincial ecological and environmental departments nationwide (2018) [M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 201905: 212. (in Chinese)
- [34] 刘伟涛,顾鸿,李春洪. 基于德尔菲法的专家评估方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(S1): 189-191, 204.
- [34] LIU Wei-tao, GU Hong, LI Chun-hong. Expert evaluation method based on delphi technique [J]. Computer Engineering, 2011, 37(S1): 189-191, 204. (in Chinese)
- [35] 李健,汪明武,徐鹏,等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 83-87.
- [35] LI Jian, WANG Ming-wu, XU Peng, et al. Classification of surrounding rock stability based on cloud model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 83-87. (in Chinese)