

基于“人—机—环”协同的地震救援培训安全评价研究

曹博¹ 朱俊文^{1,2} 韩力毅¹ 宋杰¹ 马霖¹

1 中国地震局兰州地震研究所

2 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站

DOI:10.32629/jsse.v4i3.20992

[摘要] 针对传统地震救援培训中安全检查要素孤立、协同交互风险识别存在盲区的问题,引入“人—机—环”系统工程理论,构建适用于高仿真地震救援培训的安全评价体系。采用德尔菲法筛选指标、层次分析法确定权重,结合模糊综合评价法对培训系统安全状态进行量化评估。以兰州国家陆地搜寻与救护基地实战化比武为例进行验证应用,结果表明:体系综合得分为82.34,属良好等级,且呈现“基础项高分、交互项低分”的显著反差,有效诊断出“人—人”协同不畅、“人—机”交互低效及环境适应性不足等系统脆弱性,验证了该体系的差异化诊断能力,可为地震救援培训安全管理向“系统安全、协同增效”转型提供理论与方法支撑。

[关键词] 地震救援; 安全培训; 安全评价; 人—机—环系统; 层次分析法

中图分类号: E923.37 文献标识码: A

Research on Safety Evaluation of Earthquake Rescue Training Based on Human-Machine-Environment Synergy

Bo Cao¹ Junwen Zhu^{1,2} Liyi Han¹ Jie Song¹ Lin Ma¹

1 Lanzhou Institute of Seismology

2 Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station

[Abstract] To address the issues of isolated safety inspection elements and blind spots in collaborative interaction risk identification within traditional earthquake rescue training, a safety evaluation system tailored for high-fidelity earthquake rescue training is constructed by introducing the “human-machine-environment” systems engineering theory. The Delphi method is used to screen indicators, the analytic hierarchy process is applied to determine weights, and the fuzzy comprehensive evaluation method is employed to quantitatively assess the safety status of the training system. The system is validated through a practical competition at the Lanzhou National Land Search and Rescue Base. Results show that the overall score is 82.34, corresponding to a “good” rating, and a marked contrast emerges between high scores on basic items and low scores on interaction items. This effectively diagnoses deep-seated system vulnerabilities such as poor “human-human” coordination, inefficient “human-machine” interaction, and insufficient environmental adaptability, verifying the system’s differential diagnostic capability. The proposed evaluation system can provide theoretical and methodological support for transforming earthquake rescue training safety management toward “system safety and synergistic enhancement”.

[Key words] Earthquake rescue; Safety training; Safety evaluation; Human-machine-environment system; Analytic Hierarchy Process

1 引言

地震救援培训作为救援能力生成的关键环节,直接关乎受训人员自身安全与实战效能转化。当前,中国地震救援培训网络已成规模化,课程体系逐步与国际搜索与救援咨询团(INSARAG)标准接轨^[1]。INSARAG指南要求城市搜索与救援队伍在准备、响

应与恢复全阶段遵循基本标准,其分级测评涵盖管理、搜索、营救、医疗和后勤保障五大能力模块,这一框架已深刻影响我国地震救援培训课程的设计逻辑^[2-3]。在安全评价方法领域,失效模式与效应分析(FMEA)、危险与可操作性分析(HAZOP)等传统方法长于分析既定流程与静态硬件的可靠性,却难以刻画高度不确定

定性、强人因介入条件下“人—机—环”交互的认知风险与协同失效^[4]。在应急救援能力评估方面,国内外学者已做了相关研究。其中,常晨文^[5]以地震救援队的组织结构为出发点,构建了涵盖管理、搜索、营救等模块的应急救援能力测评指标体系;景鹏旭等^[6]基于区域救援能力的物质与非物质要素,建立了分级评估指标体系,并以川渝地区为例进行了验证;冯旭升^[7]基于搜救医一体化,研发出了地震现场救援效能的动态评估系统,将搜索、营救、医疗等环节完整串联进行评估;屈晓雪等^[8]基于AHP与模糊数学,构建了应急救援演练基地的风险评估模型,验证了该方法组合在培训场景安全评价中的适用性。此外,《地震救援队伍能力基本要求》对于救援队伍管理、搜索、营救、医疗和后勤保障这五个模块做了相关规定,为救援队伍科学管理和救援资源精准调配提供了重要依据^[9]。

然而,现有研究还存在以下不足:一是评价维度碎片化,多数评价仅关注单个模块能力的静态评估,未能将“人员—装备—环境”视为耦合整体,导致人—机界面操作压力增大、人—人界面指令失真等深层次交互风险成为评价盲区;二是评价思维固化,难以适应培训中废墟结构变化、任务临时导调等不确定性。“人—机—环”系统工程理论指出,系统安全取决于三要素及其交互界面的匹配协调程度,而非某一要素的最优状态^[10],因此可以为上述评价困境提供理论指导。

综上,本文引入“人—机—环”系统工程理论,将“人—机”、“人—人”、“人—环”三个交互界面的协同因素作为独立评价维度,构建聚焦系统协同效能的地震救援培训安全评价体系。采用德尔菲法筛选评价指标,运用层次分析法确定各层级权重,结合模糊综合评价法实现定性判断向定量评价的转化,最后以兰州国家陆地搜寻与救护基地实战化比武为例,检验该体系相较于传统安全检查表的系统性诊断效能,识别交互界面关键脆弱环节,为我国地震救援培训安全管理向过程精准防控与系统协同增效转型提供参考。

2 评价体系构建原理与方法

2.1 “人—机—环”系统理论适应性分析

“人—机—环”系统理论指出,系统安全取决于人、机、环三要素及其交互界面的匹配与协调。在地震救援培训这种情境下,三要素之间的关系需进行更精细的界定,尤其需突出信息作为交互介质的关键作用。

(1)人(救援主体):涵盖指挥、搜索、救援、医疗等角色的专业知识、团队协作能力、生理心理状态以及通过交换信息形成的动态认知。

(2)机(救援媒介):包含搜索、破拆、通讯等装备的可靠性、环境适应性及人机交互友好性。装备既是操作对象,也是信息采集与呈现的终端。

(3)环(作业场景):不仅包含物理维度的废墟结构稳定性、次生灾害模拟逼真度,更涵盖信息维度的指挥通信保障与临时情报注入所形成的信息场。该信息场是串联“人”与“人”、“人”与“机”协同的关键交互介质。

培训系统安全的脆弱性往往产生于“人—机—环”三者的交互界面,例如振动环境下操作精度的下降(人—机界面)、多点作业时指令传递的失真(人—人/人—环界面)。因此,评价体系必须突破单要素评估,重点考察协同效能。

2.2 基于德尔菲法的指标筛选

地震救援培训中的安全涉及安全管理、救援技术以及人机工程等交叉学科,部分隐性风险(如团队协作状态、心理负荷)难以直接度量,仅凭文献归纳或个别专家经验易导致指标集的偏颇与疏漏。为此,本研究引入德尔菲法作为指标筛选与达成共识的工具。该方法借助多轮匿名调查问卷与受控反馈,可促使分散的专家判断逐步收敛为一致的群体决策结果^[11],有效规避传统专家会议中的权威干扰与从众偏差,确保指标池的专业性与内容有效性。

2.3 组合评价模型构建

通过德尔菲法确定评价指标内容后,还需进一步解决各指标权重如何确定及系统安全状态如何综合量化的问题。为此,构建层次分析法与模糊综合评价法相结合的组合评价模型。三者构成从指标确定到权重分配再到状态评估的完整方法论链条。

2.3.1 层次分析法

层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是将复杂决策问题分解为有序的递进层次结构,通过两两比较确定各要素的相对重要性,适用于多准则、多目标的系统评价^[12-14]。本研究采用AHP对经德尔菲法筛选后的指标进行赋权,以量化反映各要素在培训系统安全中的相对重要程度,具体步骤如下:

(1)建立递进层次结构。构造包含目标层、一、二、三级指标的层次递进模型。

(2)构造判断矩阵。采用Satty提出的1~9标度法,同一层次 n 个指标两两比较,得到判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, $a_{ij} > 0$,

$$a_{ji} = 1 / a_{ij}。$$

(3)计算权重向量。求 A 的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及特征向量

ω ,归一化得权重向量 $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$,其中:

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{\omega}_k} (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, $\bar{\omega}_i$ 为特征向量 ω 的第 i 个分量。权重 ω_i 满足

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1。$$

(4)一致性检验。为衡量判断矩阵中专家判断的逻辑一致性,引入一致性指标 CI 和一致性比率 CR :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中, n 为判断矩阵阶数; RI 为随机一致性指标, 具体取值见表1。当 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵权重分配合理; 否则需调整判断矩阵直至通过检验。

表1 随机一致性指标

n	RI	n	RI
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

2.3.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法基于模糊数学相关理论, 通过隶属度函数将边界不清、难以量化的因素转化为可量化的评价结果^[15-16]。本研究在AHP确定指标基础上引入模糊综合评价法, 对培训系统安全状态进行综合量化, 并通过逐层追溯各层级指标得分, 定位系统薄弱节点。具体步骤如下:

(1) 确定评价因素集与评语集。设因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$ 为各层级评价指标构成的集合。评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 为评价等级构成的集合, 即 $V = \{\text{优秀, 良好, 一般, 合格, 差}\}$, 对应分数区间见表2。

表2 模糊评价评语集与对应分数区间

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
等级	优秀	良好	一般	合格	差
分数区间	[90, 100]	[80, 90)	[70, 80)	[60, 70)	[0, 60)

(2) 构建单因素隶属度矩阵。 K 位专家按细则评级, k_{ij} 为

将指标 u_i 评为等级 v_j 的人数, 隶属度 $r_{ij} = \frac{k_{ij}}{K}$, 则有评价向量

$r_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}]$, 据此得到隶属度矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

(3) 模糊合成。将权重向量 W 与隶属度矩阵 R 采用加权平均算子 $M(\bullet, +)$ 进行模糊合成, 计算综合评价向量

$B = W * R = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 其中 $b_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot r_{ij}$ 。若

$\sum_{j=1}^n b_j \neq 1$, 则需对 B 进行归一化处理, 使其满足 $\sum_{j=1}^n b_j = 1$ 。

(4) 计算综合得分。将综合评价向量 B 进行单值化处理后

与分值向量 S 的转置相乘, 得到综合得分: $F = B \cdot S^T$ 。根据

F 值的大小可判定评价对象所对应的安全等级, 并通过逐层逆向计算得分确定薄弱环节。

3 地震救援培训安全评价指标体系构建

3.1 评价指标层级架构

为确保指标体系的科学性与合理性, 成立由20名专家组成的咨询小组。其中兰州国家陆地搜寻与救护基地教官8人、消防一线指挥员6人、人机工程学学者及安全评价专家各3人。通过两轮匿名问卷咨询(问卷回收率100%), 对拟定指标进行重要性评分及开放性建议收集, 最终构建包含目标层(A)、一级指标(B)、二级指标(C)及三级指标(D)的四级评价指标体系, 如图1所示。其中, 一级指标B4(协同交互因素)为本研究的创新维度, 旨在量化要素间的耦合匹配程度。

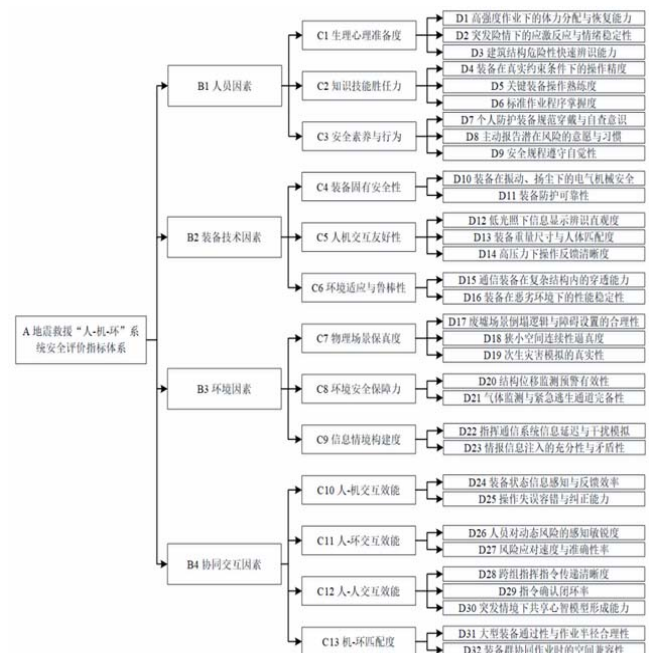


图1 地震救援“人—机—环”系统安全评价指标体系

3.2 指标权重计算与检验

依据1.3.1节所述步骤, 构造判断矩阵并计算权重。计算结果见表3。

由表3可知, 一级指标中B1(人员因素0.423)权重最高, 符合“人是安全核心”的认知; B2与B3(装备技术因素、环境因素均为0.227)权重相等, 表明两者在培训安全中同等重要。B4(协同交互因素0.123)虽权重相对较低, 但其作为独立一级指标被纳入, 表明评价视角从单一要素转向要素间的耦合匹配。三级指标中, D5(关键装备操作熟练度, 权重0.450)、D22(指挥通信系统信息延迟与干扰模拟, 权重0.600)、D27(风险应对速度与准确性, 权重0.600)等在所属二级指标下权重较高, 表明专家组对技能熟练度、信息场逼真度及临场应变能力的高度重视。

表3 各级指标权重

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重
B1	0.423	C1	0.3	D1	0.4
				D2	0.35
				D3	0.25
		C2	0.4	D4	0.3
				D5	0.45
				D6	0.25
		C3	0.3	D7	0.35
				D8	0.4
				D9	0.25
B2	0.227	C4	0.35	D10	0.5
				D11	0.5
				D12	0.4
		C5	0.4	D13	0.35
				D14	0.25
				D15	0.45
		C6	0.25	D16	0.55
				D17	0.4
				D18	0.35
B3	0.227	C7	0.35	D19	0.25
				D20	0.5
				D21	0.5
		C8	0.4	D22	0.6
				D23	0.4
				D24	0.45
		C9	0.25	D25	0.55
				D26	0.4
				D27	0.6
B4	0.123	C10	0.277	D28	0.35
				D29	0.4
				D30	0.25
		C11	0.162	D31	0.5
				D32	0.5

4 实例验证：以兰州国家陆地搜寻与救护基地实战化比武为例

4.1 案例概况与数据采集

表4 各级指标综合得分

层级	指标	得分	指标	得分
目标层	A	82.34		
一级	B1	83.09	B2	83
	B3	81.62	B4	79.87
	C1	82.8	C2	83.9
	C3	82.35	C4	85.25
二级	C5	82.35	C6	80.9
	C7	80.55	C8	82.75
	C9	81.35	C10	81.2
	C11	78.75	C12	79.1
三级 (关键指标)	C13	82		
	D10	86.5	D17	78
	D27	77.5	D30	77

注1：加粗项为各层级最高与最低得分辨识点；受篇幅所限，三级指标仅列关键项。

为检验评价体系的实用性，以兰州国家陆地搜寻与救护基地“某消防支队跨区域地震应急救援实战化比武”为评价对象。

数据采集采取“过程观测+事后评价”双轨制，全程客观跟踪记录。

4.2 模糊综合评价

依据1.3.2节所述步骤，对各级指标进行逐级模糊合成，具体

得分见表4。其中，目标层A综合得分 $F_A = 82.34$ ，属于良好等级。

4.3 评价结果与系统诊断

4.3.1 总体评价

培训系统安全性综合得分为82.34，属“良好”等级。一级指标得分雷达图如图2所示。其中，B1（人员因素83.09）、B2（装备技术因素83.00）、B3（环境因素81.62）得分均位于良好区间，分值相对接近；B4（协同交互因素79.87）得分明显低于其余3个指标，是系统安全水平的短板。

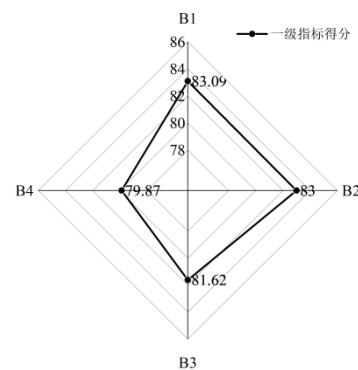


图2 一级指标得分雷达图

4.3.2 系统脆弱性分层诊断

二级指标得分如图3所示，具体诊断如下：

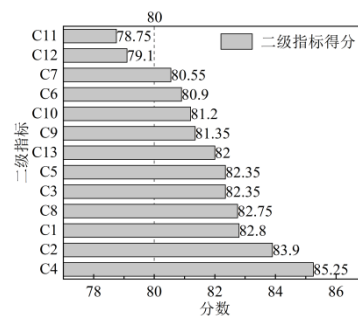


图3 二级指标得分柱状图

(1) 人—人协同效能存在衰减现象。C12（人—人交互效能）得分为79.10，在全部二级指标中位列倒数第二。数据显示，连续作业超过6 h后，指挥指令的二次确认率较初期下降明显。裁判组临时注入“二次坍塌”信号时，不同作业小组对风险等级与撤离优先级的判断出现短暂分歧（D30得分77.00），表明在高压、长作业条件下存在团队共享心智模型解体风险。该现象与情境意识理论判断一致：当团队成员缺乏同步的情境更新机制时，即使通信链路畅通，认知层面的信息断裂仍有可能发生。

(2) 人—机交互存在瓶颈。C10（人—机交互效能）得分为81.20。现场观测发现，某型生命探测仪的专用数据接口与音视频指

挥系统不兼容, 操作员须口头转述探测信息, 增加了信息衰减环节与认知负荷(D24得分81.50)。部分破拆装备在连续长时间运行后发热明显并产生较大振动幅度, 对细微操作产生生理干扰(D25得分79.50)。上述装备群系统兼容性与人机适配缺陷在单机静态检查中不易暴露, 但在多装备集成作业的高压力场景中被显著放大。

(3) 动态环境适应能力不足。C11(人—环交互效能)得分78.75, 是二级指标中得分最低项。在裁判组随机注入“新埋压点位置”等突发情报后, 部分小组响应速度出现明显滞后现象(D27得分77.50), 指挥流程调整迟缓, 这表明在日常训练中过度依赖固定流程, 临场应变及适应能力有待提升。

(4) 场景搭建合理性待提升。C7(物理场景保真度)得分80.55, 下属D17(废墟场景倒塌逻辑与障碍设置的合理性)仅得78.00, 表明部分模拟废墟的结构堆积方式过于简陋, 场景设置不够合理, 影响了训练的真实感与沉浸度。

4.3.3 基础项与交互项的对比分析

二级指标C4(装备固有安全性, 85.25)与C2(知识技能胜任力, 83.90)得分靠前, 而涉及要素间交互耦合的C10、C11、C12这三个指标得分明显偏低, 这表明比武队伍在静态训练与装备维护保养方面基础扎实。“基础项高分、交互项低分”的结果验证了评价体系可以透过要素表象, 识别出人—机—环交互界面的系统性风险, 从而为培训提供差异化、靶向性的安全管理信息。

5 结论

(1) 基于“人—机—环”系统工程理论, 结合德尔菲法、层次分析法与模糊综合评价法, 构建了涵盖4项一级指标、13项二级指标及32项三级指标的地震救援培训安全评价体系。该体系打破传统检查表单要素割裂的局限性, 首次将协同交互因素作为独立评价维度, 实现了培训系统安全的量化与系统化评价。

(2) 以兰州国家陆地搜寻与救护基地实战化比武为例的实证结果表明, 体系综合得分为82.34(良好等级), 协同交互因素得分最低(79.87), 是系统安全的关键薄弱环节。评价结果所呈现的“基础项高分、交互项低分”特点, 验证了所构建体系在识别交互界面隐性风险方面的有效性, 可为培训安全管理的精准施策提供靶向依据。

[基金项目]

基于AI大型语言模型的地震灾情处置与部署辅助决策研究(2025-地震地质司-救援21)、甘肃省地震局地震科技发展基金(2025GG01)资助。

[参考文献]

- [1] 卢向阳, 金仲宝. 地震救援培训课程体系建设助力救援事业发展[J]. 防灾博览, 2022, (06): 48-51.
- [2] INSARAG. INSARAG External Classification(IEC) Manual

[Z]. 2020.

[3] 郭其云. 灾害事故应急救援理论与方法[M]. 北京: 经济科学出版社, 2018.

[4] Sun L, Li Y F, Zio E. Comparison of the HAZOP, FMEA, FRAM, and STPA Methods for the Hazard Analysis of Automatic Emergency Brake Systems[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 2022, 8(3): 031104-1-031104-14.

[5] 常晨文. 地震救援队应急救援能力测评与应用探究[J]. 消防界(电子版), 2022, 8(20): 78-80.

[6] 景鹏旭, 王念法, 徐一凡, 等. 基于指标体系建设的区域地震救援能力评估[J]. 中国应急救援, 2022(1): 29-34.

[7] 冯旭升. 基于搜救医一体化的地震现场救援效能动态评估系统研发[D]. 中国石油大学(华东), 2021.

[8] 屈晓雪, 司广顺, 杨飞. 基于模糊理论及AHP的培训演练基地风险评估[J]. 石油化工安全环保技术, 2018, 34(03): 14-17+68.

[9] 全国地震标准化技术委员会. 地震救援队伍能力基本要求: GB/T 46578-2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.

[10] 周德红. 现代安全管理学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2015.

[11] Ameyaw E E, Hu Y, Shan M, et al. Application of Delphi method in construction engineering and management research: A quantitative perspective[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 42(8): 1-10.

[12] 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(07): 93-100.

[13] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.

[14] Patriarca R, Di Gravio G, Costantino F, et al. An Analytic Framework to Assess Organizational Resilience[J]. Safety and Health at Work, 2017, 9(3): 265-276.

[15] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 5版. 广州: 华南理工大学出版社, 2011.

[16] Kantardzic M. Fuzzy sets and Fuzzy Logic[J]. Prentice Hall PTR, 2011.

作者简介:

曹博(1994—), 男, 汉族, 甘肃定西人, 硕士研究生, 职称: 工程师, 从事的研究方向: 地震救援安全技术理论与理论方面的研究。

*通讯作者:

朱俊文(1994—), 男, 汉族, 甘肃临夏人, 硕士研究生, 职称: 助理研究员, 从事的研究方向: 地震危险性分析。