核技术利用单位辐射事故应急预案评价模型构建

孟凡兴[1,2],张春雷[1,2],高芳莹[1,2],孙禄健[1,2],王宏伟[1,2]
(1. 核工业航测遥感中心,河北　石家庄　050002;
2. 河北省核应急技术支持与响应中心,河北　石家庄　050002)

摘　要:针对当前核技术利用单位辐射事故应急预案评估中存在的指标体系异构化、科学性与操作性不足的问题,基于主体责任范畴与应急核心职能,构建了适用于核技术利用单位辐射事故应急预案的量化评估指标体系。通过层次分析法(AHP)确定指标权重体系,结合模糊综合评价法(FCE)构建三维评估矩阵,建立了多尺度量化评估模型,实现应急预案要素的量化解析与综合效能评价。通过某核技术利用单位辐射事故应急预案量化评估实例,验证了模型有效性与工程适用性,其可系统识别预案的设计缺陷。

关键词:辐射事故;应急预案;评价模型;层次分析法;模糊综合评价法;核技术利用单位
中图分类号:X591;TL73　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-2009(2026)03-0007-05

Construction of An Evaluation Model for Radiation Accident Emergency Response Plans for Nuclear Technology Utilization Units

MENG Fanxing[1,2], ZHANG Chunlei[1,2], GAO Fangying[1,2], SUN Lujian[1,2], WANG Hongwei[1,2]
(1. *Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry*, *Shijiazhuang*, *Hebei* 050002, *China*;
2. *Hebei Nuclear Emergency Technical Support and Response Centre*, *Shijiazhuang*, *Hebei* 050002, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of heterogeneity in the index systems and insufficient scientificity and operability in the current evaluation of radiation accident emergency response plans for nuclear technology utilization units, this study constructed a quantitative evaluation index system for radiation accident emergency response plans applicable to nuclear technology utilization units, based on the scope of primary responsibility and the core emergency functions. By integrating analytic hierarchy process (AHP) to determine the index weight system, and combining fuzzy comprehensive evaluation (FCE) to construct a three-dimensional evaluation matrix, it established a multi-scale quantitative evaluation model to achieve quantitative analysis and comprehensive effectiveness evaluation of emergency plan elements. Through a case study on quantitative evaluation of radiation accident emergency response plans for a nuclear technology utilization unit, the effectiveness and engineering applicability of the model were verified, and the design flaws of the plan could be systematically identified.

Key words: Radiation accident; Emergency response plan; Evaluation model; Analytic hierarchy process; Fuzzy comprehensive evaluation; Nuclear technology utilization unit

我国核技术利用已形成涵盖能源、医疗、工业、农业及环保等多领域的产业体系。截至 2023 年,在用放射源 169 593 枚(其中Ⅰ类放射源 16 115 枚,Ⅱ类放射源 18 784 枚,Ⅲ类放射源 1 706 枚,其他放射源 132 988 枚),各类射线装置 289 732 台[1]。核技术利用行业的加速发展与产业规模的持续扩大,对辐射安全防控体系提出了更为迫切的升级需求[2]。辐射事故应急作为风险防控体系的最终保障机制,其效能直接决定了核技术

收稿日期:2025-03-24;**修订日期**:2026-03-16
基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2020YFC1806600)
作者简介:孟凡兴(1987—),男,河北南宫人,高级工程师,硕士,主要从事核与辐射事故应急、辐射环境监测等工作。

应用安全体系的可靠性水平。在辐射事故应急管理体系“一案三制”架构中,辐射事故应急预案承担着核心支撑功能,特别是在应对多源项、跨介质的复合型辐射风险时,其预设的响应程序与资源配置方案构成了事故处置的决策中枢。

辐射事故应急预案是核技术利用单位应急管理工作的载体和依据,在应对各种突发辐射事故的过程中发挥着重要作用[3]。辐射事故应急预案科学地界定了突发辐射事故的应对范围和组织体系,为快速、科学决策提供了理论依据和实践指导。辐射事故应急预案评估是提升核技术利用安全效能的关键技术环节,通过量化评估可系统辨识预案设计缺陷,保障预案动态适应性,从而提升管理效能[4]。辐射事故应急预案评估方法学的理论完备性与评估模型的技术精确度,构成了核技术利用单位应急响应效能优化的核心要素。

当前辐射事故应急预案量化评估研究呈现显著的指标体系异构化特征,国内外尚未建立兼具科学性与可操作性的评价体系[5]。今基于核技术利用单位主体责任范畴,聚焦其辐射事故应急核心职能,创新性地提出多源数据融合与模型集成优化方法。采用集成层次分析法(AHP)与模糊综合评价法(FCE)构建多尺度评估模型,实现了应急预案要素的量化解析。通过某核技术利用单位辐射事故应急预案量化评估实例,验证了该模型的有效性。

1　评估指标体系的构建

通过调研发现,大部分核技术利用单位的辐射事故应急预案由本单位自行编制,存在套用上级辐射事故应急预案的现象。辐射事故应急预案存在“上下一般粗”、结构不尽合理、内容雷同度高的问题。核技术利用单位在辐射事故中承担主体责任,其首要职责是应急报告和先期处置。在职能定位方面,其与地方政府存在明显差异。

本研究基于近年来国内辐射事故的回顾分析,并结合本单位组织开展的近 20 次辐射事故应急演习经验[6-7],厘清了核技术利用单位的权责界限。在此基础上,充分考虑应急预案的合法性、针对性、可操作性,并遵循可量化原则,构建了适用于核技术利用单位辐射事故应急预案的量化评估指标体系。

1.1　核技术利用单位职责定位

系统梳理辐射事故应急响应体系(见图 1),将工作流程解构为 3 个核心阶段,即应急响应阶段、综合处置阶段和善后评估阶段。按照行动内容细分,应急响应阶段主要包括应急报告、先期处置、应急指挥和部门协同等环节;综合处置阶段主要包括辐射污染源确认、应急监测、事故研判及后果评价、污染处置等环节;善后评估阶段主要包括后期环境恢复、事故调查、信息公开等环节。

按照“统一领导、分类管理、属地为主、分级响应”的原则,事发地人民政府根据初判事故等级实施分级响应,全权负责辐射事故的应急指挥工作[8]。在应急响应阶段,核技术利用单位的首要职责是应急报告和先期处置;在其他阶段,主要是配合事发地人民政府辐射事故应急成员单位开展相关工作。核技术利用单位的应急报告涵盖及时性、内容完整性、上报渠道及后续处置等多个方面,要求辐射事故应急预案在报告时限与渠道、报告内容(包括初报和续报)等方面作出明确规定;先期处置要求核技术利用单位在事故发生后第一时间采取科学、规范的措施,以控制事态扩大、减少人员伤害和环境污染,对应要求辐射事故应急预案在现场控制与污染封锁、人员防护与疏散、初步监测与评估、信息记录与初步报告方面作出具体规定。

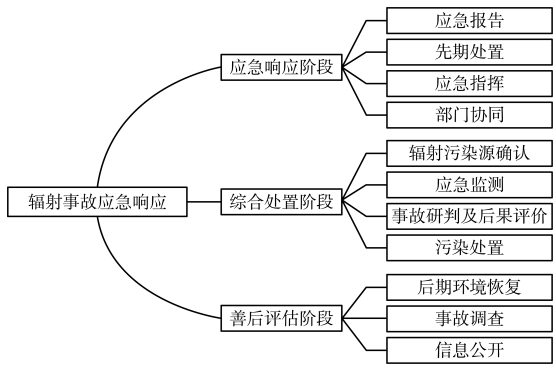

图 1　辐射事故应急响应体系

Fig. 1　Radiation accident emergency response system

1.2　确立评估指标体系

通过专家访谈、文献调研方式,确定核技术利用单位辐射事故应急预案评估框架;针对核技术利用单位职责定位,结合近年来组织开展的辐射事故应急演习实践,逐条梳理评估指标;在此基础上根据可量化原则确立评估指标体系。该体系以核技术利用单位辐射事故应急预案质量(A)为总体目标,采用分层递阶结构框架,设立 7 个一级评估指标和 15 个二级评估指标,见图 2。

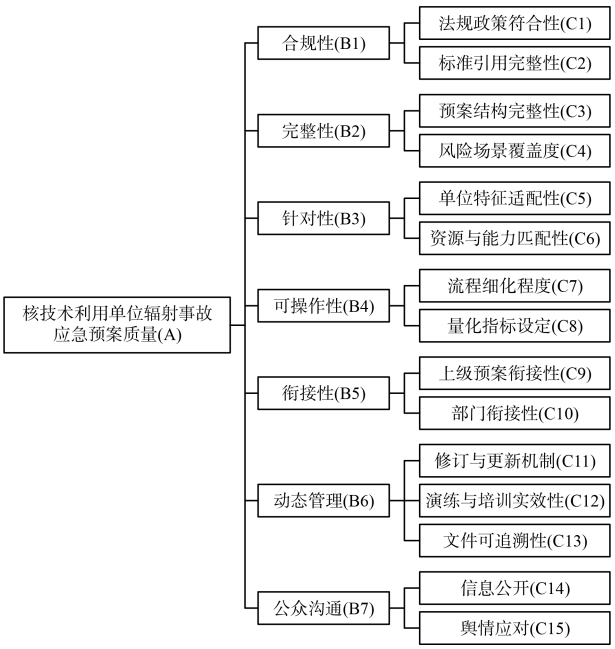

图 2　评估指标体系

Fig. 2　Evaluation index system

法规政策符合性(C1)主要指预案与《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等相关法规的政策符合性;标准引用完整性(C2)主要指预案引用《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)和《辐射事故应急监测技术规范》(HJ 1155—2020)等标准文件的完整性。

预案结构完整性(C3)主要指应急预案框架的完整性,需要校核应急预案总则、组织体系、监测预警、应急响应、应急终止、后期处置、保障措施等核心模块的完整性;风险场景覆盖度(C4)主要指应急预案对单位潜在风险场景的分析,以及针对不同事故等级的差异化响应措施。

单位特征适配性(C5)主要指预案与单位类型、设施布局和周边环境的结合情况,以及高风险环节的专项处置方案;资源与能力匹配性(C6)主要指应急物资储备、应急队伍技能与单位规模、风险等级的匹配程度。

流程细化程度(C7)主要指预案中应急响应步骤的具体程度,以及操作流程图、疏散路线图、污染区划分标准等可视化工具的配备情况;量化指标设定(C8)主要指明确预案中关键时效指标、辐射剂量率阈值及污染控制范围等量化判定标准。

上级预案衔接性(C9)主要指预案与核技术利用单位所在地市、县(区)辐射事故应急预案及行业主管部门应急预案的衔接关系;部门衔接性(C10)主要指明确单位内部各部门的职责边界。

修订与更新机制(C11)主要指预案修订周期及其他触发条件的设定、基于演练结果和风险评估持续改进机制的建立;演练与培训实效性(C12)主要指预案中多场景演练的设计、培训考核机制的明确;文件可追溯性(C13)主要指电子化预案管理系统、演练记录及问题整改台账的设立。

信息公开(C14)主要指预案中事故信息发布流程的制定;舆情应对(C15)主要指舆情应对方案的完整程度。

2　量化评估模型的建立

采用 AHP 计算指标权重,结合 FCE 得出综合评分,开发核技术利用单位辐射事故应急预案质量定量评估模型,为核技术利用单位预案的评估工作提供科学依据和操作指南。该模型通过构建多维度的评估指标体系,实现了对预案完备性、可操作性和响应效能的全方位量化。

2.1　基于 AHP 的权重评估

AHP 通过对复杂决策问题影响因素的全面分析,将决策思维过程转化为数学模型,以实现问题的量化解决[9],包含以下关键操作序列:①由河北省核应急技术支持与响应中心辐射事故应急预案领域 5 位专家组成评估组,经综合讨论对评价指标进行权重赋值,对各指标进行两两对比分析,构建判断矩阵;②通过幂迭代法求解各矩阵最大特征值及其对应归一化特征向量,获取指标权重向量,并基于检验体系,分别计算一致性指标及其比率(CR),判定矩阵是否满足逻辑一致性要求[10],CR 值越小,表明一致性越显著,当 CR 值 < 0.1 时,可认为核技术利用单位辐射事故应急预案质量(A)具有满意的一致性[11];③通过加权合成运算推导获得底层指标相对于总目标的组合权重向量,在此基础上构建组合一致性检验体系,确认通过检验后,实施全局归一化运算,最终生成具有决策意义的层次总排序向量。

评估指标体系权重计算结果见表 1。由表 1 可知,一级指标 CR 值为 0.075 3,< 0.1,表明一级指标判断矩阵符合一致性要求,其中针对性

(B3)和可操作性(B4)的权重最高,是核技术利用单位辐射事故应急预案质量的关键影响因素。根据二级指标总权重的计算结果,单位特征适配性(C5)和流程细化程度(C7)的权重最高,是评估核技术利用单位辐射事故应急预案质量的重要参考因素。

表 1　评估指标体系权重计算结果

Table 1　Calculation results of the weights for the evaluation index system

总目标(A 层)	一级指标(B 层)	一级指标权重	一级指标一致性检验	二级指标(C 层)	二级指标权重	二级指标一致性检验	总权重
核技术利用单位辐射事故应急预案质量(A)	合规性(B1)	0.065 4	λ_{max} = 7.614 2	法规政策符合性(C1)	0.750 0	λ_{max} = 3.038 5	0.049 0
			CI = 0.102 4	标准引用完整性(C2)	0.250 0	CI = 0.019 3	0.016 4
	完整性(B2)	0.041 5	CR = 0.075 3	预案结构完整性(C3)	0.166 7	CR = 0.037 0	0.006 9
				风险场景覆盖度(C4)	0.833 3		0.034 6
	针对性(B3)	0.298 9		单位特征适配性(C5)	0.750 0		0.224 2
				资源与能力匹配性(C6)	0.250 0		0.074 7
	可操作性(B4)	0.298 9		流程细化程度(C7)	0.750 0		0.224 2
				量化指标设定(C8)	0.250 0		0.074 7
	衔接性(B5)	0.171 3		上级预案衔接性(C9)	0.800 0		0.137 0
				部门衔接性(C10)	0.200 0		0.034 3
	动态管理(B6)	0.105 5		修订与更新机制(C11)	0.258 3		0.027 3
				演练与培训实效性(C12)	0.637 0		0.067 2
				文件可追溯性(C13)	0.104 7		0.011 0
	公众沟通(B7)	0.018 5		信息公开(C14)	0.750 0		0.013 9
				舆情应对(C15)	0.250 0		0.004 6

2.2　采用 FCE 构建评估模型

FCE 是依托模糊集合理论,通过隶属度函数量化多维度约束系统的评价要素,实现非线性关联影响下的综合量化评估[12]。评估模型的构建步骤如下。

(1)构建 3 级树状评价指标体系。将 A 层定义为综合评价目标集,其下属 B 层 7 个准则层指标作为主评价维度,各 B 层指标进一步分解为 C 层要素层指标。

(2)设计 5 维评价标度系统。通过专家共识法建立“优秀-良好-一般-合格-不合格”评估等级架构,并构建分段线性隶属函数实现语义-数值转换,“优秀”分值为 90.00 ~ 100、“良好”分值为 80.00 ~ 89.99、“一般”分值为 70.00 ~ 79.99、“合格”分值为 60.00 ~ 69.99、“不合格”分值为 0 ~ 59.99。

(3)基于量化分析构建多维隶属度表征矩阵。该矩阵表征预案质量评估指标在 5 维评价空间中的隶属分布特征,通过模糊数学映射规则实现定性评价的定量转化[13-15]。

(4)构建综合评价运算模型。首先,计算预案质量综合评估向量;然后,通过张量积运算将评估矩阵与语义量化矩阵融合;最后,生成系统级量化评价结果。该算法可实现应急预案量化评估的数学表征,其多维运算过程精确映射预案质量在评价空间的量化分布。

3　评估实例

本研究选取某探伤企业辐射事故应急预案作为方法验证载体,组建辐射事故应急预案评估专家组,基于预设评估架构执行模糊数学解析流程。首先,依据标准化评价准则采集专家决策数据,通过隶属度量化算法生成模糊关系张量;然后,运用加权合成运算推导预案综合效能向量,实现系统级量化评价;最后,形成综合效能指数。

各级评估指标综合得分见表 2。根据最大隶属度原则,该企业辐射事故应急预案质量一般,综合得分为 76.66 分。在 15 个二级指标中,标准引用完整性(C2)、演练与培训实效性(C12)、法规政策符合性(C1)的得分相对较高,在后续应急预案修订中值得总结借鉴;量化指标设定(C8)、流程细化程度(C7)、资源与能力匹配性(C6)的得分相对较低,是未来应急预案修订过程中需要着力探索提升的方向。

表 2　各级评估指标综合得分

Table 2　Comprehensive scores of evaluation indicators at all levels

总目标(A 层)	综合得分	一级指标(B 层)	分值	二级指标(C 层)	分值
核技术利用单位辐射事故应急预案质量(A)	76.66	合规性(B1)	89.74	法规政策符合性(C1)	89.51
				标准引用完整性(C2)	90.43
		完整性(B2)	78.49	预案结构完整性(C3)	88.37
				风险场景覆盖度(C4)	76.51
		针对性(B3)	75.74	单位特征适配度(C5)	76.57
				资源与能力匹配性(C6)	73.25
		可操作性(B4)	71.24	流程细化程度(C7)	72.38
				量化指标设定(C8)	67.82
		衔接性(B5)	75.09	上级预案衔接性(C9)	73.54
				部门衔接性(C10)	81.29
		动态管理(B6)	87.42	修订与更新机制(C11)	83.47
				演练与培训实效性(C12)	89.62
				文件可追溯性(C13)	83.78
		公众沟通(B7)	81.99	信息公开(C14)	80.63
				舆情应对(C15)	86.07

4　结论

(1)针对核技术利用单位辐射事故应急预案量化评估中指标体系异构化及可操作性不足的难题,创新性地构建了基于 AHP 与 FCE 的集成评估模型。通过多源数据融合与模型优化,建立了包含 7 个一级指标、15 个二级指标的多层级评估体系,并基于 AHP 确定了核心指标权重,结合 FCE 实现了预案质量的多维度模糊量化解析。该方法突破了传统定性评价的局限,将主观经验与客观数据有机结合,为应急预案的科学化、精细化评估提供了方法论创新。

(2)通过某探伤企业辐射事故应急预案的实证检验,验证了 AHP-FCE 集成框架的有效性与工程适用性,评估模型输出结果直观反映了预案各项指标的效能水平,实现了对预案质量的量化表征。研究表明,该探伤企业应急预案整体质量一般,在标准引用完整性与演练实效性等方面表现较好,体现了现有优势;在量化指标设定、应急流程细化等环节存在明显不足,指明了后续优化方向。本研究所形成的评估框架不仅可为核技术利用单位预案的动态优化提供技术支撑,还可为行业标准化评估体系的构建,以及跨领域应急管理效能的提升提供理论依据与实践路径。

[参考文献]

[1] 国家核安全局. 国家核安全局 2023 年报[R/OL]. (2024-05-31)[2025-03-22]. https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/haqnb_1/202405/P020240531579488725688.pdf.

[2] 孟凡兴,杨明,孙禄建,等. 中国辐射事故应急领域发展态势文献计量研究[J]. 环境科学与管理,2023,48(10):57-61.

[3] 张彦,杨端节,乔清党,等. 辐射事故应急预案管理现状及对策研究[J]. 辐射防护,2021,41(3):260-263.

[4] 李小飞,张谈贵,张学东,等. 辐射事故应急预案的模糊综合评价[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(1):4-7.

[5] 彭恒明,王铁骊. 基于犹豫模糊语言集的核电厂场内应急预案评估研究[J]. 科技管理研究,2021,41(1):181-186.

[6] 龚宇,党磊,李小丁,等. 我国 2016—2020 年辐射事故回顾与分析[J]. 辐射防护,2023,43(6):665-670.

[7] 孟凡兴,杨明,王浩,等. 基于 AHP-FCE 的辐射事故应急演习评估研究[J]. 核技术,2022,45(11):70-79.

[8] 张彦,乔清党,杨端节. 辐射事故应急响应技术要点及难点分析[J]. 辐射防护,2024,44(4):423-429.

[9] 王立杨,季则舟,李永青,等. 基于 AHP 与菲罗模型的威海滨海旅游沙滩质量评价体系研究[J]. 海洋湖沼通报(中英文),2024,46(6):148-155.

[10] 杨志冉,柴金飞,方雨菲,等. 基于球形模糊-层次分析法的盾构土全生命周期风险评估[J]. 中国安全生产科学技术,2025,21(1):109-117.

[11] 孟凡兴,杨明,王浩然,等. 核应急航空辐射监测能力量化评估模型[J]. 核科学与工程,2024,44(2):472-479.

[12] 侯羽澳,王强,柳青,等. 基于偏离度-FCE 的袋式除尘系统实时定量风险评价[J]. 中国安全科学学报,2024,34(10):30-38.

[13] 柯强,冯康宏,曹心德,等. 基于模糊数学的场地重金属污染风险综合评价[J]. 中国环境科学,2023,43(1):415-423.

[14] 张学东,李小飞,王海山,等. 高风险移动放射源风险管控模糊综合评价[J]. 环境监测管理与技术,2022,34(5):6-9.

[15] 宋玉庭,蒋名亮,徐力刚,等. 基于博弈理论组合赋权的沱沱河流域模糊综合水质评价[J]. 环境监测管理与技术,2024,36(6):29-35.

本栏目编辑　姚朝英　刘罗