

基于 AHP-FCE 的辐射事故应急演习 评估研究

孟凡兴^{1,2} 杨明^{1,2} 王浩^{1,2} 孙禄建^{1,2} 房江奇^{1,2} 杨金政^{1,2}

1(核工业航测遥感中心 石家庄 050000)

2(中核核应急航空监测工程技术研究中心 石家庄 050000)

摘要 为提升辐射事故应急演习质量、实时评估演习效果,在构建辐射事故应急演习评估指标体系的基础上,将层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)有机结合,建立辐射事故应急演习评估模型。该模型根据辐射事故应急演习流程,综合演习准备、演习实施、演习总结阶段,形成了以辐射事故应急演习效果为总目标,下设 5 个一级指标和 15 个二级指标的辐射事故应急演习评估体系;通过 AHP 进行指标权重分配,采用 FCE 进行计算排序,实现对辐射事故应急演习的综合评估。通过实例验证表明, AHP-FCE 模型具有良好的适应性与合理性,对辐射事故应急演习评估有很好的应用价值。

关键词 层次分析法, 模糊综合评价法, 辐射事故应急演习, 综合评估

中图分类号 TL73

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110501

Evaluation of radiation accident emergency drill based on AHP-FCE

MENG Fanxing^{1,2} YANG Ming^{1,2} WANG Hao^{1,2} SUN Lujian^{1,2} FANG Jiangqi^{1,2} YANG Jinzheng^{1,2}

1(Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050000, China)

2(China Nuclear Emergency Aviation Monitoring Engineering Technology Research Center, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract [Background] The radiation accident emergency drill is an important way to maintain and improve the response ability of emergency organizations, but at present, the evaluation of the drill is mainly based on the qualitative evaluation of the surface performance of the key links, there is not yet a systematic, full-flow, accurate and targeted evaluation method of exercises. [Purpose] This study aims to improve the quality and real-time evaluation of radiation accident emergency drill. [Methods] Firstly, the alternative evaluation indicators were summarized on the basis of literature survey. The method of expert investigation was used to check the alternative indexes and establish the evaluation index system. Then, the analytic hierarchy process (AHP) method was applied to the calculation of weight distribution, and the fuzzy comprehensive evaluation (FCE) was employed to build comprehensive evaluation model for radiation accident emergency exercises. Finally, based on the AHP-FCE, comprehensive scores of the evaluation indexes at all levels of three typical examples were calculated. [Results] The FCE-based model synthesizes the stage of the drill preparation, the drill implementation and the drill summary, and forms the general goal of the radiation accident emergency drill effect. The evaluation system of radiation accident emergency maneuver is set up with 5 first-level indexes and 15 s-level indexes to realize the comprehensive

国防科工局"十三五"核能开发科研项目资助

第一作者: 孟凡兴, 男, 1987年出生, 2020年于东华理工大学获硕士学位, 研究领域为核与辐射事故应急技术方法、辐射环境监测

收稿日期: 2022-07-04, 修回日期: 2022-10-15

Supported by the "13th five-year plan" Nuclear Energy Development Research Project of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, PRC

First author: MENG Fanxing, male, born in 1987, graduated from East China University of Technology of China with a master's degree in 2020, focusing on nuclear and radiation emergency technique, radiation environmental monitoring

Received date: 2022-07-04, revised date: 2022-10-15

evaluation of the radiation accident emergency drill. **[Conclusions]** The example verification shows that the AHP-FCE model has a good adaptability and rationality, and has a good application value in the evaluation of radiation accident emergency drill.

Key words Analytic hierarchy process, Fuzzy comprehensive evaluation, Radiation accident emergency drill, Comprehensive evaluation

核技术广泛应用于工业^[1]、农业^[2]、医疗^[3]、地质调查^[4]、科学研究和教学^[5]等各个领域,随着核技术利用的迅速发展,辐射事故时有发生,给我国辐射事故应急工作带来严峻的挑战^[6-7]。辐射事故应急能力的提升是一个全方位、多角度的任务,而辐射事故应急演习是维持和提高应急组织响应能力的重要方式。

辐射事故应急演习的举办不仅可以锻炼队伍、提升应急组织响应能力,还可以检验各类辐射事故应急预案的有效性和可操作性,结合演习评估对辐射事故应急预案进行修改和完善;同时,辐射事故应急演习的举办还能达到对公众进行宣传教育、普及辐射防护知识的目的。

目前,我国各省已经建立起多层次的辐射事故应急管理体系,并定期开展应急演习。2014年以来,在生态环境部(国家核安全局)的指导下,开展了一系列不同类型的辐射事故应急演习^[8-9]。通过对以往辐射事故应急演习的分析,发现演习中往往存在“重行动轻评价”的问题,演习评价往往以关键环节表面表现的定性评价为主,缺乏更深层次的思考

和总结。目前尚未有一种系统性、全流程、准确而又针对性的演习评估方法。本文基于既有经验及相关资料,设计层次分析法-模糊综合评价法(Analytic Hierarchy Process - Fuzzy Comprehensive Evaluation, AHP-FCE)综合评价方法,对辐射事故应急演习进行评估,通过实例分析验证其有效性。

1 构建评估指标体系

通过总结分析以往辐射事故应急演习及其评价的相关研究内容^[10-11],结合各省辐射事故应急管理实际情况^[12-13],具体分析辐射事故应急演习全过程各个阶段,筛选建立辐射事故应急演习效果评估指标体系。

1.1 备选评估指标

在前期工作总结及文献调研^[14-16]的基础上,通过对辐射事故应急演习主要工作流程及各环节中演习结果产生显著影响项目的筛选,结合建立模型的可行性,归纳总结了备选评估指标,详见表1。

表1 辐射事故应急演习评估备选指标体系
Table 1 Evaluation index system for radiation accident emergency drill

总目标 General objective	演习阶段 Exercise phase	具体指标 Specific target
辐射事故应急演习效果 Effect of radiation emergency exercise	前期准备 Preliminary preparation	演习策划 Exercise planning
		经费预算 Outlay budget
	演习保障 Exercise protection	情景设定 Scenario setting
		文件编制 Documentation
		人员保障 Personal security
		经费保障 Financial security
	应急启动 Emergency activation	设备保障 Equipment support
		场地保障 Site protection
		事故报告 Incident report
		事故核实 Accident verification
应急响应 Emergency response	指挥协调 Command coordination	
	处置决策 Disposal decisions	
	应急通信 Emergency communication	
	应急监测 Emergency monitoring	
后续工作 Follow-up work	现场处置 On-site disposal	
	意外情况及处置 Handling of the accident	
	演习总结 Exercise summary	
		预案修订 Proposed amendments

1.2 评估指标体系的构建

为了使指标能够更精确反映辐射事故应急演习的真实情况,采用专家调研法对备选指标体系再次进行核查。调研对象主要包括:核工业航测遥感中心核与辐射事故应急研究领域的相关专家、生态环境监管部门专业人员以及国家核应急航空辐射监测

救援分队的工作人员。结合专家意见,将前期准备阶段评价指标类似的“情景设定、文件编制”合并为“演习脚本质量”,将前期准备阶段的“经费预算”合并入演习保障中的“经费保障”,将应急响应阶段的“指挥协调、处置决策”合并为“指挥协调”。综合上述,得出辐射事故应急演习评价指标体系如图1所示。

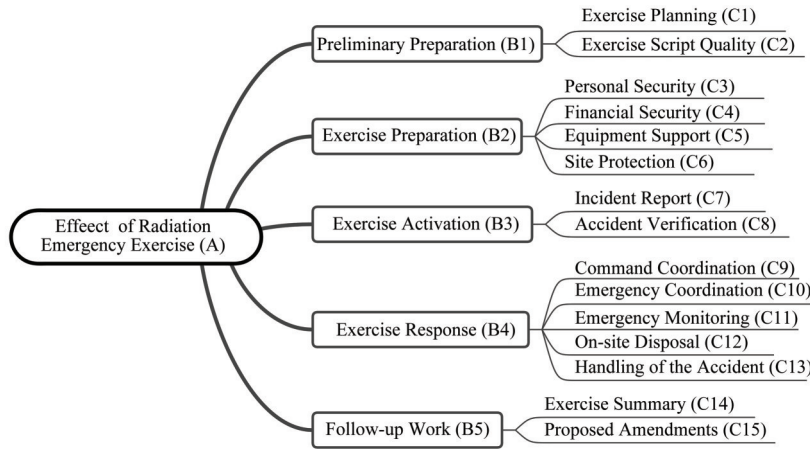


图1 辐射事故应急演习评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system of radiation accident emergency exercise

2 构建 AHP-FCE 评估模型

利用 AHP 和 FCE 对评价指标进行量化^[17-21],构建辐射事故应急演习综合评价模型^[22-24],为我国各级辐射事故应急管理机构开展辐射事故应急演习评价提供一个可供选择的准则和参考。

2.1 基于 AHP 的权重计算

首先采用两两相互比较的方法,运用相对尺度,按照表2九分位比率排定各评价指标的相对优劣顺序,得到:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由式(1)构建判断矩阵。计算判断矩阵最大特征根 λ_{\max} 的特征向量,经归一化后进行层次单排序及其一致性检验。最后计算某一层所有因素对于最高层(总目标)相对重要性的权值,进行层次总排序,并进行一致性检验。主要公式如下:

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

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

式中: A 为判断矩阵; n 为判断矩阵阶数; CI 为矩阵的一致性, CI 的值越接近于0,表明判断矩阵一致性越

强,指标的权重值分配合理; RI 为随机一致性指标,用于衡量 CI 的大小, RI 标准值根据矩阵阶数得到(详见表3); CR 为检验系数,当 $CR < 0.1$ 时,判定 A 具有满意的一致性^[17]。

本研究邀请核工业航测遥感中心核与辐射事故应急研究领域专家学者参与评估指标权重的确定过程。通过访谈和问卷调查的方式,邀请专家根据辐射事故应急演习影响因素的重要程度对所建立的评估指标体系进行两两重要性评判^[17]。在此基础上通过 AHP 方法计算指标权重。

由表4计算数据可以看到,一级指标随机一致性比率 $CR=0.026\ 07 < 0.1$,说明一级指标判断矩阵满足一致性要求。应急启动(B3)、应急响应(B4)、后续工作(B5)权重相对较高,是决定演习效果的关键因素。二级指标总权重计算结果中演习策划(C1)、人员保障(C3)、事故报告(C7)、事故核实(C8)、应急监测(C11)、演习总结(C14)权重相对较高,是评估演习效果的重要参考。

2.2 基于 FCE 的评估模型构建

结合前文完成的辐射事故应急演习评估指标体系,采用 FCE 法建立相应的综合评价因素集。最高层评价因素集为总的因素集 U ,由5个一级指标组成其评价因子,15个二级指标组成其对应一级指标的因素集。

表2 比例标度
Table 2 Scale

标度 Scale	定义 Definition	意义 Meaning
1	同样重要 Equally important	指标 i 与指标 j 重要性相同 Index i has the same importance as index j
3	稍微重要 A little important	指标 i 的重要性稍微高于指标 j Indicator i is slightly more important than indicator j
5	明显重要 Obviously important	指标 i 的重要性明显高于指标 j The importance of index i was significantly higher than that of index j
7	强烈重要 Highly important	指标 i 的重要性强烈高于指标 j The importance of indicator i was strongly higher than that of indicator j
9	极端重要 Extremely important	指标 i 的重要性极端高于指标 j The importance of indicator i is extremely higher than that of indicator j
2,4,6,8	上述判断的中值 The median of the above judgments	

表3 平均随机一致性指标 RI 取值参考表
Table 3 Average RI value reference table

阶数 Order number	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

$$U = \{B1, B2, B3, B4, B5\} \quad (4)$$

$$B1 = \{C1, C2\} \quad (5)$$

$$B2 = \{C3, C4, C5, C6\} \quad (6)$$

$$B3 = \{C7, C8\} \quad (7)$$

$$B4 = \{C9, C10, C11, C12, C13\} \quad (8)$$

$$B5 = \{C14, C15\} \quad (9)$$

通过文献调研、专家访谈的方法,将指标评价标准分为优秀、良好、一般、合格和不合格5个等级,分别赋分为100~90、89~80、79~70、69~60、59~0。

$$\begin{aligned}
 V &= \{V1, V2, V3, V4, V5\} \\
 &= \{\text{优秀, 良好, 一般, 合格, 不合格}\} \quad (10) \\
 &= \{100\sim 90, 89\sim 80, 79\sim 70, 69\sim 60, 59\sim 0\}
 \end{aligned}$$

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

然后计算各指标相对于评价集的隶属度,建立各级模糊关系矩阵。因素集 U 中第 i 个影响元素对评价集 V 中第 j 个元素的隶属程度为 r_{ij} ,其取值范围在 $0\sim 1$ ^[17]。对于 m 个影响因素、 n 个评价元素来说,其模糊关系矩阵 R 如式(12)所示:

$$\begin{aligned}
 B_i &= W_i \cdot R = (W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{imi}) \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1k} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{imi1} & r_{imi2} & \cdots & r_{imik} \end{bmatrix} \\
 &= (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ik}), \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (12)
 \end{aligned}$$

最后建立综合评价模型,确定系统总得分。结合 AHP 得出的层级各因素的权重值 w_j ,对单指标进行综合评价,计算模糊关系评价向量 B_i ^[17]。

逐级向上计算,构建评价模型,计算模糊评价矩阵 B 和对应分数 F :

$$B = w \cdot R \quad (13)$$

$$F = B \cdot V \quad (14)$$

3 实例应用

本文以三个有代表性的辐射事故应急演习为例,介绍评估指标体系的使用方法,验证评估方法的有效性。

3.1 实例一

3.1.1 辐射事故应急演习情况介绍

演习以某市钢铁厂停产搬迁,废旧放射源运送放射性废物库的过程中丢失两枚IV类¹³⁷Cs放射源为情景,分别启动企业、区生态环境分局、区政府三级应急预案,并成立由生态环境、公安、卫健、宣传等部门人员和专家组成的“应急指挥部”^[6]。经专家组研判后确定了搜源方案,由三个应急监测组,采用空地力量协调联动的方式开展丢失放射源搜寻工作。各应急监测组在配备个人剂量计、辐射防护服、核素识别仪、剂量率仪、表面污染仪的基础上;应急监测一组配备车载碘化钠晶体搜源系统、无人机载碘化钠晶体探测器巡测系统,沿钢铁厂至放射性废物库沿线道路及两侧30 m范围内巡测;应急监测二组配备车载MDS巡测系统、快1巡测系统、无人机载碘化钠晶体探测器巡测系统沿放射性废物库至钢铁厂沿线道路及两侧30 m范围内巡测;应急监测三组配备FH40G剂量率仪和表面污染仪设备对钢铁厂至放废库沿线19个路口及过往车辆轮胎进行检测^[6]。由公安部门人员组成的现场管控组负责交通管制,

表4 辐射事故应急演练各级评估指标权重计算结果
Table 4 The weight calculation results of the evaluation indexes at all levels of the radiation accident emergency drill

总目标(A层) Overall objective (tier A)	一级指标(B层) Primary index (tier B)	权重 Weight	一级指标 一致性检验 Consistency test of first- class index	二级指标(C层) Secondary indicators (tier C)	二级指标 一致性检验 Second-level index consistency test	权重 Weight	总权重 Total weight
辐射事故应急演练效果 Effect of radiation accident emergency drill	前期准备(B1) Preparation (B1)	0.108 3	$\lambda_{\max}=5.026 1$ $CI=0.029 20$ $CR=0.026 07$	演习策划(C1)	—	0.666 7	0.072 2
				演习脚本质量(C2) Exercise script quality (C2)		0.333 3	0.036 1
				人员保障(C3) Personal security (C3)	$\lambda_{\max}=4.162 1$ $CI=0.054 03$	0.547 1	0.078 5
	演习保障(B2) Exercise protection (B2)	0.143 5		经费保障(C4) Financial security (C4)	$CR=0.060 7$	0.079 6	0.011 4
				设备保障(C5) Equipment support (C5)		0.267 3	0.038 4
				场地保障(C6) Site protection (C6)		0.106 1	0.015 2
	应急启动(B3) Emergency start (B3)	0.216 6		事故报告(C7) Incident report (C7)	—	0.666 7	0.072 2
				事故核实(C8) Accident verification (C8)		0.333 3	0.144 4
				指挥协调(C9) Command coordination (C9)	$\lambda_{\max}=5.411 8$ $CI=0.102 95$ $CR=0.091 9$	0.183 1	0.044 8
	应急响应(B4) Emergency response (B4)	0.244 6		应急通信(C10) Emergency communication (C10)		0.080 6	0.019 7
				应急监测(C11) Emergency monitoring (C11)		0.513 7	0.125 7
				现场处置(C12) On-site disposal (C12)		0.178 7	0.043 7
	后续工作(B5) Follow-up work (B5)	0.287 0		意外情况及处置(C13) Handling of the accident (C13)		0.043 9	0.010 7
				演习总结(C14) Exercise summary (C14)	—	0.875	0.251 1
				预案修订(C15) Proposed amendments (C15)		0.125	0.035 9

由宣传部门人员组成的舆情信息组负责舆情应对,由卫健部门人员组成的医疗救援组现场待命。

空地协同监测过程中分别发现辐射异常,并采用核素识别仪确定为 ^{137}Cs 异常,由应急监测组成员采用背向搜源法确定、标记位置。现场处置组成员在做好个人防护的前提下,采用长柄夹对放射源进行收贮。经表面污染仪监测,失控源无破损且周围地面土壤放射性活度为本底水平。应急监测组按照

既定方案巡测完成并没有发现新的辐射异常,经专家组研判后,确认丢失放射源已安全收贮,现场监测及处置人员的个人累计剂量值不超过 $10 \mu\text{Sv}^{[6]}$ 。应急响应终止,评估组对演习活动进行总结评估。

3.1.2 评估结果分析

根据上述公式可计算得到辐射事故应急演练各级评估指标综合得分,结果如表5所示。辐射事故应急演练效果(A)达到良好水平,评估总分为86.25

分,说明本次辐射事故应急演习总体效果较好,达到了演习目的。5项一级指标中应急响应(B4)得分最高,为89.87分,与演习过程中应急监测方案制定贴合实际、空地监测力量联动紧密、现场处置操作规范一致;演习保障(B2)得分最低,为81.07分,与应急演习经费保障、场地保障有所欠缺相一致。15项二级指标中,指挥协调(C9)、应急监测(C11)、演习总

结(C14)得分最高,分别为95.28分、91.63分、94.37分,与演习过程中指挥协调高效有力、应急监测快速有序、演习总结针对性较强相一致;经费保障(C4)、场地保障(C6)、预案修订(C15)得分最低,分别为65.73分、61.61分、56.37分,是本次辐射事故应急演习工作需要注意和高的地方。

表5 实例一各级评估指标综合得分
Table 5 Comprehensive scores of the evaluation indexes at all levels of Example 1

总目标(A层) Overall objective (tier A)	综合得分 Composite score	一级指标(B层) Primary index (tier B)	分值 Score	二级指标(C层) Secondary indicators (tier C)	分值 Score	
辐射事故应急 演习效果 Effect of radiation accident emergency drill	86.25	前期准备(B1) Preparation (B1)	85.78	演习策划(C1)Exercise planning (C1)	85.67	
				演习脚本质量(C2)Exercise script quality(C2)	85.99	
		演习保障(B2) Exercise protection (B2)	81.07	人员保障(C3)Personal security (C3)	86.16	
				经费保障(C4)Financial security (C4)	65.73	
				设备保障(C5)Equipment support (C5)	82.93	
				场地保障(C6)Site protection (C6)	61.61	
		应急启动(B3) Emergency start (B3)		81.37	事故报告(C7)Incident report (C7)	79.82
					事故核实(C8)Accident verification(C8)	82.14
		应急响应(B4) Emergency response (B4)	89.87	指挥协调(C9)Command coordination(C9)	95.28	
				应急通信(C10)Emergency communication (C10)	79.31	
				应急监测(C11)Emergency monitoring(C11)	91.63	
				现场处置(C12)On-site disposal (C12)	87.07	
				意外情况及处置(C13)Handling of the accident (C13)	77.54	
			后续工作(B5) Follow-up work (B5)	89.62	演习总结(C14)Exercise summary (C14)	94.37
					预案修订(C15)Proposed amendments (C15)	56.37

3.2 实例二

3.2.1 辐射事故应急演习情况介绍

演习以废旧金属中混入一枚IV类¹³⁷Cs放射源,在运输卡车通过废旧金属熔炼企业车辆进口通道辐射监测系统时引发报警为情景,现场工作人员启动企业辐射事故应急预案并逐层上报,区、市生态环境局启动本级辐射事故应急预案。市生态环境局应急人员到达现场后,会同相关部门成立由生态环境、公安、卫健、宣传等部门人员和专家组成的“应急指挥部”,并召开现场会议,形成会议结论,各部门根据会议结论展开行动。舆情信息部门开展舆情信息监控、发布和引导,积极回应公众的信息知情权。由公安部门追查放射性物质来源。

在现场总指挥的协调下,监测人员分成两组,分别利用FH40G剂量率仪和FD-3013数字γ辐射仪进行监测。监测过程中发现辐射异常,在做好辐射防护后继续监测,确认引起辐射异常的物体并做好标记。现场处置组穿戴好防护用品后,利用ARD多道γ能谱仪对放射源进行核素识别。经过核素识别,辐

射异常由¹³⁷Cs引起。随后现场处置组采用三人轮流使用长柄夹对放射源进行收贮。经表面污染仪监测,失控源无破损且周围地面放射性活度为本底水平。经专家组研判后,确认失控放射源已安全收贮。应急响应终止,评估组对演习活动进行总结评估。

3.2.2 评估结果分析

根据上述公式可计算得到辐射事故应急演习各级评估指标综合得分,结果如表6所示。辐射事故应急演习效果(A)达到良好水平,评估总分为81.84分,说明本次辐射事故应急演习总体效果较好,达到了演习目的。5项一级指标中应急启动(B3)得分最高,为86.80分,与演习过程中逐级应急预案启动合理高效相一致;后续工作(B5)得分最低,为79.49分,与应急预案修订不及时关系密切。15项二级指标中,人员保障(C3)、事故报告(C7)、事故核实(C8)得分最高,分别为86.03分、88.35分、86.03分,与演习筹备过程人员保障到位、演习过程中事故报告准确及时、事故核实快速高效相一致;经费保障(C4)、意外情况及处置(C13)、预案修订(C15)得分最低,

分别为67.15分、66.21分、65.075 8分,是本次辐射事故应急演习工作需要注意和要提高的地方。

表6 实例二各级评估指标综合得分
Table 6 Comprehensive scores of the evaluation indexes at all levels of Example 2

总目标(A层) Overall objective (tier A)	综合得分 Composite score	一级指标(B层) Primary index (tier B)	分值 Score	二级指标(C层) Secondary indicators (tier C)	分值 Score
辐射事故应急 演习效果 Effect of radiation accident emergency drill	81.84	前期准备(B1) Preparation (B1)	82.51	演习策划(C1)Exercise planning (C1)	85.45
				演习脚本质量(C2)Exercise script quality (C2)	76.59
		演习保障(B2) Exercise protection (B2)	80.27	人员保障(C3)Personal security (C3)	86.03
				经费保障(C4)Financial security (C4)	67.15
				设备保障(C5)Equipment support (C5)	75.48
				场地保障(C6)Site protection (C6)	72.42
		应急启动(B3) Emergency start (B3)	86.80	事故报告(C7)Incident report (C7)	88.35
				事故核实(C8)Accident verification (C8)	86.03
		应急响应(B4) Emergency response (B4)	80.84	指挥协调(C9)Command coordination (C9)	84.33
				应急通信(C10)Emergency communication (C10)	85.01
				应急监测(C11)Emergency monitoring (C11)	78.74
				现场处置(C12)On-site disposal (C12)	85.01
				意外情况及处置(C13)Handling of the accident (C13)	66.21
		后续工作(B5) Follow-up work (B5)	79.49	演习总结(C14)Exercise summary (C14)	81.55
				预案修订(C15)Proposed amendments (C15)	65.07

3.3 实例三

3.3.1 辐射事故应急演习情况介绍

演习以某市冷轧板带有限公司人为盗窃丢失一枚IV类²⁴¹Am放射源为情景,企业及时向县生态环境、公安、卫生健康部门报告并启动企业《辐射事故应急预案》,县生态环境部门经初步核实确认丢失一枚IV类放射源(²⁴¹Am),判定为一般辐射事故并向县人民政府和市生态环境局报告,县政府启动《县辐射事故应急预案》IV级响应,并成立应急指挥部,在市生态环境局辐射应急人员指导下参与人员各司其职开展行动。

现场监测人员分成4组,由两组监测人员持FH40G剂量率仪在抛源现场外围巡测,其余两组监测人员分别持FD-3013数字 γ 辐射仪和背包搜源仪器进行监测。监测过程中发现辐射异常,监测人员在长杆配合下定位放射源后由现场处置组持长柄夹安全收贮放射源,经过核素识别仪监测为²⁴¹Am。经表面污染仪监测,失控源无破损且周围地面放射性活度为本底水平。经专家组研判后,确认失控放射源已安全收贮。应急响应终止,评估组对演习活动进行总结评估。

3.3.2 评估结果分析

根据上述公式可计算得到辐射事故应急演习各级评估指标综合得分,结果如表7所示。辐射事故应急演习效果(A)达到良好水平,评估总分为86.19

分,说明本次辐射事故应急演习总体效果较好,达到了演习目的。5项一级指标中前期准备(B1)得分最高,为88.16分,与演习脚本质量较高,前期策划准备充分相一致;演习保障(B2)得分最低,为83.08分,与应急演习经费保障、场地保障有所欠缺相一致。15项二级指标中,演习脚本质量(C2)、现场处置(C12)、演习总结(C14)得分最高,分别为88.94分、90.15分、90.95分,与演习筹备过程中邀请多方专家反复推敲脚本、演习过程中现场处置组汇报准确动作规范、演习总结及时全面相一致;经费保障(C4)、场地保障(C6)、预案修订(C15)得分最低,分别为78.11分、74.75分、67.86分,是本次辐射事故应急演习工作需要注意和要提高的地方。

4 结语

1)本文根据辐射事故应急演习流程,综合演习准备、演习实施、演习总结阶段,形成了以辐射事故应急演习效果为总目标,下设5个一级指标和15个二级指标的辐射事故应急演习评估体系;通过AHP法进行指标权重分配,采用FCE法得到模糊综合评价集计算得分,实现对辐射事故应急演习的综合评估。

2)通过三个有代表性的辐射事故应急演习实例验证表明,AHP-FCE模型具有良好的适应性与合理性。通过模型计算综合得分,直观反映了各级指标

表7 实例三各级评估指标综合得分
Table 7 Comprehensive score of the evaluation indexes at all levels of Example 3

总目标(A层) Overall objective (tier A)	综合得分 Composite score	一级指标(B层) Primary index (tier B)	分值 Score	二级指标(C层) Secondary indicators (tier C)	分值 Score
辐射事故应急 演习效果 Effect of radiation accident emergency drill	86.19	前期准备(B1) Preparation (B1)	88.16	演习策划(C1)Exercise planning (C1)	87.77
				演习脚本质量(C2)Exercise script quality (C2)	88.94
		演习保障(B2) Exercise protection (B2)	83.08	人员保障(C3)Personal security (C3)	83.19
				经费保障(C4)Financial security (C4)	78.11
				设备保障(C5)Equipment support (C5)	87.63
				场地保障(C6)Site protection (C6)	74.75
		应急启动(B3) Emergency start (B3)	84.91	事故报告(C7)Incident report (C7)	83.20
				事故核实(C8)Accident verification (C8)	85.76
		应急响应(B4) Emergency response (B4)	86.08	指挥协调(C9)Command coordination (C9)	85.86
				应急通信(C10)Emergency communication (C10)	79.04
				应急监测(C11)Emergency monitoring (C11)	83.14
				现场处置(C12)On-site disposal (C12)	90.15
				意外情况及处置(C13)Handling of the accident (C13)	82.68
		后续工作(B5) Follow-up work (B5)	88.06	演习总结(C14)Exercise summary (C14)	90.95
				预案修订(C15)Proposed amendments (C15)	67.86

的具体表现情况,对辐射事故应急演习评估有很好的应用价值,为今后辐射事故应急工作的开展提供参考。

作者贡献声明 孟凡兴:起草论文、修订论文、审核论文;杨明、王浩、孙禄建、房江奇、杨金政:负责修订论文。

参考文献

- 张帆,季琰琰,沈蓉芳,等.灭菌剂量下 γ 射线辐照对环烯烃共聚物的影响及机理研究[J].核技术,2022,45(3):030302. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.030302. ZHANG Fan, JI Zhenyan, SHEN Rongfang, *et al.* Effect and mechanism of γ -ray irradiation on cyclic olefin copolymer in the sterilization dose range[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(3): 030302. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.030302.
- 董娟聪,程娇,党旭红,等.辐照对冷冻肉类食品品质影响的研究现状[J].核技术,2022,45(1):010002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010002. DONG Juancong, CHENG Jiao, DANG Xuhong, *et al.* Review on irradiation effects on quality of frozen meat food[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(1): 010002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010002.
- 王哲,林璠巧,孙贤,等.核技术在新冠疫情防疫中的应用评述[J].核技术,2020,43(12):120001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120001. WANG Zhe, LIN Fanyu, SUN Xian, *et al.* Review of

- nuclear technology in the application of COVID-19 epidemic prevention and control[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(12): 120001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.120001.
- 赖毅辉,王海涛,陈锐.瞬发中子测井的铀矿井眼实时校正方法研究[J].核技术,2021,44(6):060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060402. LAI Yihui, WANG Haitao, CHEN Rui. Real-time correction method of uranium mine caliper based on prompt neutron well logging[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(6): 060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.060402.
- 燕鑫,蔡小青,汤乔伟,等.应用同步辐射X射线多模态成像研究死亡延迟时间对脑组织染色的影响[J].核技术,2022,45(4):040103. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.040103. YAN Xin, CAI Xiaoqing, TANG Qiaowei, *et al.* Effects of death delay time on brain tissue staining based on synchronous X-ray multimodal imaging[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(4): 040103. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.040103.
- 房江奇,杨金政,安政伟,等.石家庄市辐射事故应急演习与思考[J].中国辐射卫生,2021,30(5):602-606,610. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.016. FANG Jiangqi, YANG Jinzheng, AN Zhengwei, *et al.* Radiation accident emergency exercise and thinking in Shijiazhuang City[J]. Chinese Journal of Radiological

- Health, 2021, **30**(5): 602 - 606, 610. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.016.
- 7 刘杰, 郑晓磊, 龙鹏程, 等. 核事故应急救援数据库系统设计与应用[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(2): 020602. DOI: 11889/j.1000-3436.2021.rj.39.020602.
- LIU Jie, ZHENG Xiaolei, LONG Pengcheng, *et al.* Design and application of the fundamental database system of nuclear accident emergency rescue[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(2): 020602. DOI: 11889/j.1000-3436.2021.rj.39.020602.
- 8 张彦, 杨端节, 乔清党, 等. 省级辐射事故应急演练存在问题及对策研究[J]. 中国辐射卫生, 2020, **29**(3): 288 - 291. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.03.022.
- ZHANG Yan, YANG Duanjie, QIAO Qingdang, *et al.* Problems and countermeasures of provincial radiation accident emergency exercises[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2020, **29**(3): 288 - 291. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.03.022.
- 9 王瑞英, 杨端节, 李雯婷, 等. 辐射事故应急演练准备与实施的规范化[J]. 中国辐射卫生, 2022, **31**(1): 79 - 84. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.015.
- WANG Ruiying, YANG Duanjie, LI Wenting, *et al.* Standardization of preparation and implementation of radiological emergency exercises[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2022, **31**(1): 79 - 84. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.015.
- 10 薛瑞源. 海上搜救演习综合评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- XUE Ruiyuan. The comprehensive evaluation of maritime search and rescue exercises[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- 11 杨戈. 省级核应急演练案例分析与研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2014.
- YANG Ge. Analysis and research in the provincial nuclear emergency exercises[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2014.
- 12 孙志刚, 张国君, 郭里, 等. 省级核应急演练的思考与对策[J]. 中国核电, 2013, **6**(1): 91 - 93.
- SUN Zhigang, ZHANG Guojun, GUO Li, *et al.* Provincial nuclear emergency drill thinking and countermeasures[J]. China Nuclear Power, 2013, **6**(1): 91 - 93.
- 13 肖军, 曾广建, 梁梅燕, 等. 浙江省辐射应急演练中现场监测与处置应对的总结[J]. 核安全, 2019, **18**(2): 83 - 89. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2019.02.011.
- XIAO Jun, ZENG Guangjian, LIANG Meiyuan, *et al.* Summary of on-site monitoring and handling during the radiation emergency drill of Zhejiang Province[J]. Nuclear Safety, 2019, **18**(2): 83 - 89. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2019.02.011.
- 14 亓晓东. 核技术利用单位辐射事故应急工作存在问题及对策[J]. 环境与发展, 2018, **30**(6): 224 - 225. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.06.133.
- QI Xiaodong. Problems in the use of nuclear technology in unit radiation accident emergency work and countermeasures[J]. Environment and Development, 2018, **30**(6): 224 - 225. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.06.133.
- 15 孙玉玉, 欧分粮. 江苏辐射事故应急工作现状调查、问题分析及对策建议[J]. 中国辐射卫生, 2010, **19**(1): 72 - 74. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2010.01.005.
- SUN Yuyu, OU Fenliang. Investigation, problem analysis and countermeasures of emergency work of radiation accident in Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2010, **19**(1): 72 - 74. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2010.01.005.
- 16 郭旭影, 邓晓钦, 曾国强, 等. 无人机放射性剂量率应急监测系统搜寻失控放射源应用研究[J]. 四川环境, 2021, **40**(6): 101 - 107. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2021.06.016.
- GUO Xuying, DENG Xiaoqin, ZENG Guoqiang, *et al.* The application of UAV radioactive dose rate emergency patrol system in searching uncontrolled radioactive sources[J]. Sichuan Environment, 2021, **40**(6): 101 - 107. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2021.06.016.
- 17 阮方, 申超, 程远, 等. 基于AHP分析的核应急救援演练评估模型[J]. 核技术, 2022, **45**(1): 010604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010604.
- RUAN Fang, SHEN Chao, CHENG Yuan, *et al.* Evaluation model of nuclear emergency rescue drill based on AHP weight analysis[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(1): 010604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.010604.
- 18 李嵘, 刘志钢, 潘寒川, 等. 基于AHP-TOPSIS的城市轨道交通应急演练评估研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, **42**(1): 110 - 115. DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2020.01.19.
- LI Rong, LIU Zhigang, PAN Hanchuan, *et al.* A study on the evaluation of emergency drill for urban rail transit based on AHP-TOPSIS model[J]. Railway Transport and Economy, 2020, **42**(1): 110 - 115. DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2020.01.19.
- 19 徐吉辉, 楚维, 周镜, 等. 基于AHP-FCE的航空应急救援

- 能力评价研究[J]. 航空维修与工程, 2012, 24(1): 60 - 62. DOI: 10.19302/j.cnki.1672-0989.2012.01.024.
- XU Jihui, CHU Wei, ZHOU Jing, *et al.* Aviation emergency rescue evaluation based on AHP-FCE[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012, 24(1): 60 - 62. DOI: 10.19302/j.cnki.1672-0989.2012.01.024.
- 20 李娟, 成璐瑶, 曾萍, 等. 基于 AHP-FCE 模型的制药废水处理技术综合评价[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 591 - 598.
- LI Juan, CHENG Luyao, ZENG Ping, *et al.* Comprehensive evaluation of wastewater treatment technology in pharmaceutical industry based on AHP-FCE model[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 591 - 598.
- 21 陈欢欢. 基于 AHP-FCE 和德尔菲法的应急物流能力评价模型[J]. 现代商业, 2017, 27(13): 61 - 62. DOI: 10.14097/j.cnki.5392/2017.13.027.
- CHEN Huanhuan. Evaluation model of emergency logistics capability based on AHP-FCE and Delphi method[J]. Modern Business, 2017, 27(13): 61 - 62. DOI: 10.14097/j.cnki.5392/2017.13.027.
- 22 张丽, 柏萍, 汪忠雨, 等. 基于层次分析与模糊综合评价的事故应急预案评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(9): 126 - 131. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.09.020.
- ZHANG Li, BAI Ping, WANG Zhongyu, *et al.* Assessment of accident emergency plan based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(9): 126 - 131. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.09.020.
- 23 王黎. 地震应急综合演练效果评估指标体系设计与方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- WANG Li. Research on the design and method of the effect evaluation index system for earthquake emergency comprehensive exercise[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- 24 张彦, 林权益, 岳会国. 核与辐射事故应急演习评估要素浅析[C]. 中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会 2017 年学术年会论文集第 10 册(核测试与分析分卷、核安全分卷). 威海, 2017: 120 - 125.
- ZHANG Yan, LIN Quanyi, YUE Huiguo. Evaluation Elements of nuclear and radiation accident emergency drill[C]. Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol.5)—The Chinese Nuclear Society 2017 Annual Conference Proceedings Vol. 10 (Nuclear Testing and Analysis, Nuclear Safety Subvolume). Weihai, 2017: 120 - 125.