孙朋, 伏亚萍, 雷达, 等.基于危险指数的放射源贮存库环境风险评估与分级方法 [J].环境工程技术学报, 2024, 14(6): 1938-1944.
SUN P,FU Y P,LEI D,et al.Environmental risk assessment and classification method for radioactive source repositories based on dangerous index[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(6): 1938-1944.

基于危险指数的放射源贮存库环境风险评估与分级方法

孙朋[1], 伏亚萍[1*], 雷达[2], 康仲舒[2]
1.中国原子能科学研究院核安全与环境工程技术研究所
2.中国同辐股份有限公司

摘要 为建立一种简单可行的放射源贮存库环境风险评估与分级方法, 在放射源贮存库关键风险因素作用影响分析的基础上, 确定了以放射源贮存危险指数作为环境风险分级指标; 根据放射源贮存危险指数及其等级取值区间连续性的特点, 构建放射源贮存库环境风险分级指标的定量表征模型, 并引入相关校正系数, 建立放射源贮存库环境风险分级指标计算和环境风险等级划分方法。案例应用结果表明, 本研究建立的环境风险评估与分级方法具有较强的适用性和良好的可操作性, 有效支撑放射源贮存库的环境风险防范管理。

关键词 放射源贮存库; 关键风险因素; 危险指数; 环境风险评估; 分级指标
中图分类号: X946 **文章编号:** 1674-991X(2024)06-1938-07 **doi:** 10.12153/j.issn.1674-991X.20240032

Environmental risk assessment and classification method for radioactive source repositories based on dangerous index

SUN Peng[1], FU Yaping[1*], LEI Da[2], KANG Zhongshu[2]
1.Department of Nuclear Safety and Environmental Engineering Technology, China Institute of Atomic Energy
2.China Isotope & Radiation Corporation

Abstract In order to establish a simple and feasible method of environmental risk assessment and classification of radioactive source repositories, the dangerous index of radioactive source storage was determined as the environmental risk classification index based on the influence analysis of the key risk factors of radioactive source repositories. Based on the characteristics of the continuity of the risk index and level range for radioactive source storage, a quantitative characterization model for the environmental risk classification indicators of radioactive source repositories was constructed. Relevant correction coefficients were introduced to establish a method for calculating the environmental risk index and classifying the environmental risk level of radioactive source repositories. Case application results show that the environmental risk assessment and classification method established in this study has strong applicability and good operability and can effectively support the environmental risk prevention and management of radioactive source repositories.

Key words radioactive source repository; key risk factor; dangerous index; environmental risk assessment; classification index

放射源贮存库是各类放射源大量集中贮存的重要场所, 如果运行管理不善, 可导致放射性物质向环境扩散, 危害环境和人员安全, 将成为重大的风险源[1]。目前, 我国同位素产业进入快速发展的新阶段, 产业园和生产设施建设步伐加快, 放射源生产数量将迅速增长, 加上目前在用和废旧的放射源存量为37.7 万多枚[2], 放射源贮存的安全评估与管理已成为同位素生产和应用企业的重要工作。国内关于放射源贮存库的研究报道主要侧重于辐射剂量监测和防护措施核实上[3-6], 亟待从风险管理和控制的角度开展对放射源贮存库的风险评估方法学研究, 预防放射源贮存库环境风险事件的发生。

为安全和妥善地管理可能构成显著危险的放射源, 国际原子能机构(IAEA)理事会核准了放射源安

收稿日期: 2024-01-15
基金项目: 中国辐射防护研究院平台开放基金项目(ZFYFSHJ-2023002)
作者简介: 孙朋(1976—), 男, 副研究员, 主要从事辐射环境影响和风险评价研究, 592749735@qq.com
* **通信作者:** 伏亚萍(1981—), 女, 高级工程师, 主要从事辐射环境监测与评价研究, 409636981@qq.com

全和安保行为准则, 随后印发放射源进口和出口、弃用放射源相关的管理导则作为其补充[7-10], 对放射源提出总体安全管理要求; 继而发布通用安全导则, 对辐射源监管的法律框架、安全监管机构的组织与管理及人员配置、职能和流程等提出了建议和要求[11-12]。世界各国在制定放射源的监管要求和相关安全标准时, 需遵循 IAEA 发布的关于放射源安全和安保的国际建议, Baciu 等[13] 研究了原子能机构关于建立安全和安保监管框架的国际建议如何相互关联。国际原子能机构安全标准(RS-G-1.9)以放射源导致确定性健康效应的潜在危险为基础, 用放射源中放射性核素的特定活度(D)[14] 对源的放射性物质活度(A)进行归一化处理来量化放射源的危险, 依据 A/D 对放射源进行分类[15]; 我国卫生部定义该值为危险指数, 也基于该值进行放射源分类[16], 并且均考虑了放射源的聚集状态。借鉴 IAEA放射源安全标准体系, 我国经过 40 多年的探索和实践, 在放射源监管方面建立了较为完善的安全管理法规与标准[17]。IAEA 颁布的安全导则《辐射装置和密封源安全》, 在明确辐射安全基础设施和监管机构及其责任、设计和操作等安全要求的同时, 提出了辐射源安全评估的程序和方法[18], 有学者将其调整以适应对废密封源的安全评估与管理[19], 该类方法针对放射源设计、制造和应用的安全措施进行评估, 评估对象具体明确, 但需要详细而具体的放射源信息。IAEA 还针对废密封源钻孔式储存库概念形成了通用安全评价方法[20], 并在一些地区的废密封源钻孔储存实践中进行了应用[21-23], 该技术概念来源于放射性废物的地质处置, 但该安全分析方法较为复杂且分析费用昂贵, 需建立物理数学模型和获取大量参数。国内有学者[24] 建立放射源被盗丢失事故树, 并计算得出等效最小割集事故树, 但缺乏翔实的统计数据资料, 难以给出放射源被盗丢失的风险水平。也有学者通过建立风险评估矩阵表, 确定油田测井源库、钢铁行业和城市地区辐射风险事件的分值及等级排序, 并列出优先控制的风险种类及其危险因素[25-27], 该研究虽然获得了各种风险事件的危险等级排序, 但未阐述各种风险因素及其相互影响, 以及放射源贮存库环境风险水平及等级。笔者所在课题组采用模糊综合风险评估方法获得某公司放射源贮存库的总体风险水平及等级, 并确定 7 个二级风险因素为放射源贮存库的关键环境风险因素[28], 但评估过程复杂、专业性强, 且为半定量, 可操作性不强。因而, 需要在上述模糊综合风险评估研究基础上, 选择既能够反映放射源贮存库危险特性又能对其起决定作用的环境风险因素作为分级指标, 构建放射源贮存环境风险分级指标计算模式, 综合考虑其他风险因素影响后, 建立一种简单可行的放射源贮存库环境风险评估与分级方法, 以期为放射源风险管理提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　关键风险因素影响分析与分级指标确定方法

为考察文献 [28] 确定的放射源贮存危险指数、放射源贮存库建筑结构、放射源库贮存设施、放射源贮存库辐射防护设计、放射源贮存库安保措施及设备、放射源贮存库管理制度、可能暴露人群规模等关键风险因素对放射源贮存库环境风险的影响, 改变某关键风险因素等级取值, 保持其他因素等级取值不变, 按照文献 [28] 中矩阵运算过程计算放射源贮存库的综合评语集, 按最大隶属度原则判定风险等级[29-30]。当最大隶属原则有效度(α)≥0.5 时, 则认为最大隶属度原则有效; α<0.5 时, 判定最大隶属度原则低效或无效, 则需将综合评语定量化, 计算评价结果在各得分区间概率, 判定风险等级。

定量化处理的过程[30]: 在某风险因素不同等级取值条件下, 计算各等级取值的综合评语集(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5), 然后与风险等级划分区间边界值和中值组成的高、低和中评价矩阵进行合成运算, 计算最高得分($S_{高}$)、最低得分($S_{低}$)和中间得分($S_{中}$), 如式(1)~式(3)所示:

$$S_{高}=(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)\times\begin{bmatrix}1.0\\0.8\\0.6\\0.4\\0.2\end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S_{中}=(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)\times\begin{bmatrix}0.9\\0.7\\0.5\\0.3\\0.1\end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S_{低}=(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)\times\begin{bmatrix}0.8\\0.6\\0.4\\0.2\\0.0\end{bmatrix} \quad (3)$$

$L=S_{高}-S_{低}$, L 为评价结果所处的分值区间, 环境风险因素的某等级取值区间边界值处于该区间内, 分别计算边界值与 $S_{高}$和 $S_{低}$的长度 L_i(i=1,2, 代表边界值两侧的不同等级取值区间), 则 $P_i=L_i/L$, P_i 为在各等级取值区间的概率, 根据其大小判断评价结果风险等级。

通过关键风险因素等级取值变化对放射源贮存库环境风险水平的影响分析, 确定对放射源贮存库

的环境风险等级起着决定性作用的风险因素，并以此作为分级指标。

1.2 分级指标计算模式的确定方法

根据分级指标和环境风险等级取值区间连续的特点，以分级边界及其对应的取值作为输入，采用 SPSS 22.0 软件进行回归分析，得到分级指标与环境风险等级取值的定量表征，构建放射源贮存库环境风险评估与分级计算基本模型。

考虑文献 [28] 中触发风险因素、安全减缓因素、敏感风险因素等一级环境风险因素作用的影响，并考虑与放射源贮存危险指数并列的二级风险因素——放射性核素毒性的影响，引入相应的校正系数对分级指标计算基本模型校正。采用文献 [28] 的计算过程，分别考察上述放射源贮存库的一级环境风险因素和放射性核素毒性的不同等级取值的影响，将所得综合风险评语结果进行定量化处理[30]，计算不同等级取值对应的高、低和中得分之间的平均变化率，从而分别量化各风险因素影响程度，作为放射源贮存风险分级指标计算模型校正系数的取值。

1.3 环境风险等级划分及标准的确定方法

放射源贮存库的环境风险主要来自于放射源，其等级划分参考放射源分类的相关标准，按照发生辐射事故造成的人员伤害程度（死亡、病残、暂时性损伤、超年剂量照射、无人员伤害），将放射源贮存库环境风险划分为一级（重大）、二级（很大）、三级（较大）、四级（较小）、五级（一般）共 5 个等级，分别用数字 1~5 表示。

综合触发风险因素、安全减缓因素、敏感风险因素和放射性核素毒性的影响，考虑其修正系数均取值最大的条件下，根据放射源贮存危险指数分级边界设定，将边界值代入建立的放射源贮存库环境风险分级指标计算模式，得到放射源贮存库的环境风险分级指标值，以此确定环境风险等级划分标准。

2 结果与讨论

2.1 关键风险因素影响与分级指标确定

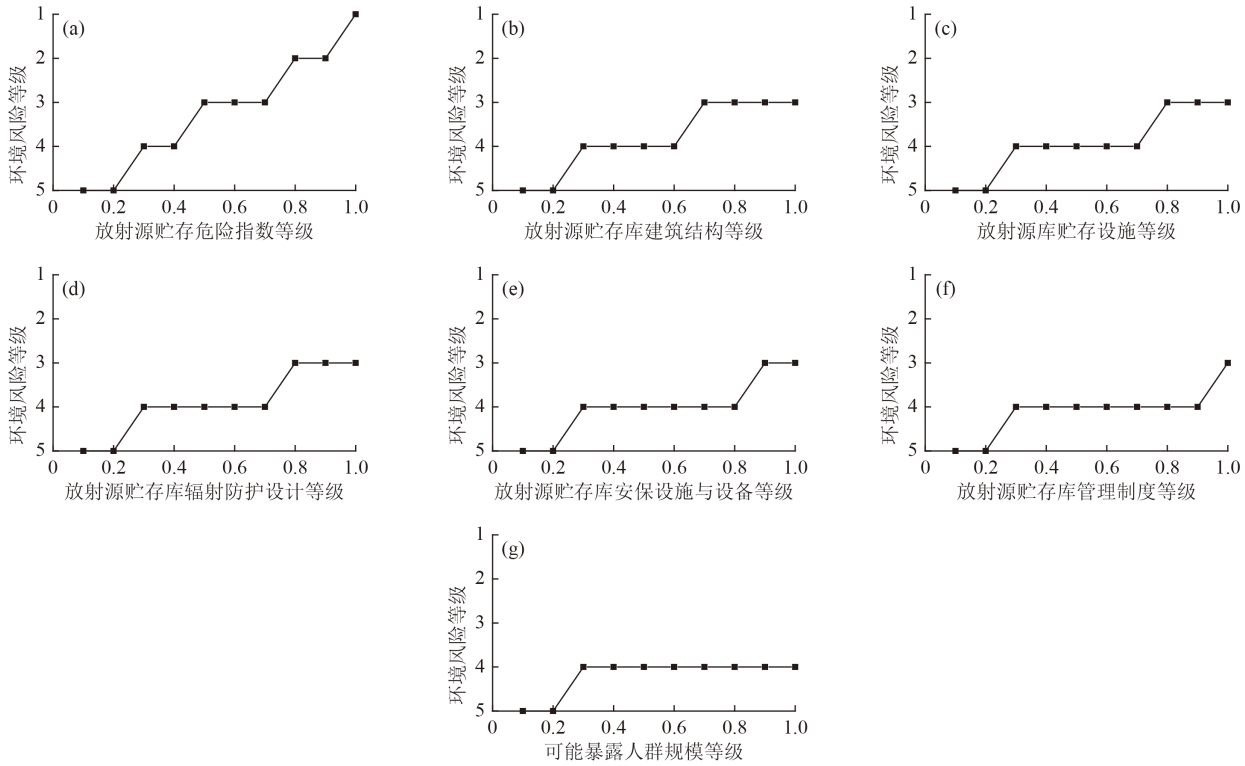
2.1.1 关键风险因素影响

放射源贮存库的关键风险因素等级取值对其环境风险等级水平的影响见图 1。由图 1(a)可知，随着放射源贮存危险指数等级取值的提高，放射源贮存库的环境风险等级快速提升，放射源贮存危险指数提高到 0.2 以上，其对放射源贮存库环境风险等级的影响快速增大，其等级取值区间变化基本与放射源贮存库的环境风险等级水平变化趋势一致。由图 1(b)~图 1(g)可见，随放射源库建筑结构、放射源库贮存设施、放射源贮存库辐射防护设计、放射源贮存库安保措施及设备、放射源贮存库管理制度、可能暴露人群规模等关键风险因素等级取值的变化，放射源贮存库环境风险等级水平发生不同变化，等级取值提高到 0.2 以上，各关键风险因素对放射源贮存库环境风险等级的影响有所增加，但即使各关键风险因素等级取值最高，放射源贮存库的环境风险等级也仅能达到三级。由此可知，这些关键风险因素对放射源贮存库的环境风险等级提升作用有限。通过上述关键风险因素不同等级取值对放射源贮存库环境风险的影响程度及规律的比较分析可知，放射源贮存危险指数是放射源贮存库环境风险的主导风险因素，虽然其他关键风险因素对放射源贮存库环境风险等级有一定影响，但放射源贮存库环境风险评估与分级应主要考虑放射源贮存危险指数的影响。

2.1.2 分级指标确定

上述关键风险因素影响分析结果表明，放射源贮存危险指数对放射源贮存的风险水平等级具有决定性作用，其等级取值决定着放射源贮存库风险水平及等级，因而本研究以放射源贮存危险指数作为分级指标。

根据 IAEA 安全导则第 RS-G-1.9 号《放射源的分类》[15]、原国家环境保护总局发布的《关于发布放射源分类办法的公告》（2005 年第 62 号）[31] 和原卫生部颁布的 GBZ/T 208—2008《基于危险指数的放射源分类》[16]，放射源分类主要依据放射性核素活度及其危险活度，实际上放射源的潜在危险主要来自于放射性核素种类及其活度。因而，放射源监管中通用安全评估方法也是在设定场景下以放射源的放射性核素活度为基础估算事故后果的辐射剂量，以此来评价放射源安全措施的有效性[19]。在深垂直钻孔式储存库的安全分析中，放射源的放射性核素种类及活度是最相关的变量，可根据模拟估算的辐射剂量，确定钻孔储存库的放射性核素活度限值[21-22,32]；即使废放射源或放射性废物的近地表或岩洞处置方式，也是基于所处置的放射源或放射性废物的放射性核素活度模拟计算获得辐射剂量，据此评估处置系统的环境安全性[33-35]。另外，在重大危险源辨识相关研究和标准等文献中，均认为危险化学品重大危险源辨识依据是危险化学品的危险特性及其数量，因而临界量的确定是重大危险源辨识的基础，也是判断是否构成危险化学品重大危险源的关键因素[36-39]；有研究和标准将危化品总量与其临界量的比值经校正后的计算值作为重大危险源的分级指标[40-41]。



注: 环境风险等级数值越小, 表示风险等级越高。

图 1　关键风险因素对放射源贮存库环境风险等级的影响

Fig.1　Impact of key risk factors on environmental risk levels of radioactive source repositories

与危险化学品重大风险源的辨识与分级相似, 放射源贮存库作为放射源的聚集场所, 潜在风险主要来自于所贮存放射源的放射性核素种类、现有活度及其危险活度。综上所述, 选择放射源贮存危险指数作为分级指标可以体现放射源的危险特性, 反映放射源贮存库风险的本质特征。

2.2　分级指标计算模式建立及分级标准

2.2.1　计算模式的建立

放射源贮存危险指数属于连续变量, 其等级取值区间也是连续的, 放射源危险指数与其等级取值之间可建立数学函数关系。以放射源危险指数分级边界及其对应的取值边界作为输入, 采用 SPSS 22.0 软件进行回归分析, 模型及参数见表 1。

由表 1 可知, R 为 0.971, 说明二者关系具有高度相关性; R^2 为 0.943, 揭示自变量能够解释 94.3% 的因变量变异, 并且 P<0.01, 表明该回归分析具有统计学意义。从而得到放射源危险指数与其等级取值的定量表达:

$$y = 0.438 + 0.123 \times \lg x \tag{4}$$

式中: y 为放射源危险指数等级取值(因变量); x 为放射源贮存危险指数(A/D, 自变量)。

设 R_s 表示放射源贮存风险的分级指标, 则分级指标的基本计算模型如下:

$$R_s = 0.438 + 0.123 \times \lg(A/D) \tag{5}$$

由关键风险因素的影响分析可知, 其他风险因素对放射源贮存风险水平具有一定影响, 因而引入其他风险因素的影响相关的校正系数, 则分级指标的计算模型如下:

$$R_s = \alpha \times \beta \times \delta \times \varepsilon \times \left[0.438 + 0.123 \times \lg\left(\frac{A_1}{D_1} + \frac{A_2}{D_2} + \cdots + \frac{A_n}{D_n}\right)\right] \tag{6}$$

式中: R_s 为放射源贮存风险分级指标; α 为放射源核素毒性校正系数; β 为触发风险因素校正系数; δ 为安全减缓校正系数; ε 为敏感风险因素校正系数; $\Sigma A_i/D_i=(A_1/D_1+A_2/D_2+\cdots+A_n/D_n)$ (i=1,2,⋯,n) 为放射源贮存危险指数; A_1, A_2, ⋯, A_n 为每种放射源当前活度, Bq; D_1, D_2, ⋯, D_n 为与各放射源放射性核素相对应的危险活度, Bq。

2.2.2　分级指标参数确定

放射源当前活度(A)由下式计算得到:

$$A = A_0 \times \exp[\frac{(t_1 - t_2)\ln 2}{T_{1/2}}] \tag{7}$$

式中: A_0 为放射源的初始活度, Bq; t_1 为放射源出厂日期; t_2 为计算放射源当前活度日期; $T_{1/2}$ 为放射源放射性核素的半衰期, a 或 d。

放射源危险活度(D)取自《放射源的分类》(IAEA RS-G-1.9)[15]。

表 1 模型摘要及参数估计值

Table 1 Model summary and parameter estimation

项目		取值
模型摘要	R	0.971
	R^2	0.943
	F	65.722
	$df1$	1
	$df2$	4
	显著性	0.001
参数估计值	常量	0.438
	$b1$	0.123

注: 模型摘要指对数方程; 参数估计值指因变量(y)。

分别计算放射性核素毒性、触发风险因素、安全减缓因素和敏感风险因素对放射源贮存环境风险的作用影响程度, 得到校正系数 α、β、δ、ε, 相关取值见表 2。

2.2.3 环境风险等级划分标准

将放射源贮存危险指数分级边界代入分级指标计算模型, 得到对应的放射源贮存库风险分级指标 R_s, 从而得到放射源贮存库风险等级划分标准(表 3), 以此确定放射源贮存风险的级别。

2.3 案例应用

以某公司放射源贮存库为案例, 在对放射源库现场调查、资料收集与分析基础上, 利用本研究得到的基于放射源贮存危险指数的环境风险评估与分级方法开展该放射源贮存库的环境风险评估。为降低环境风险等级水平, 该公司 2019 年按照上级主管单位的管理要求, 对部分废旧放射源进行了整备并外运送贮。按式(7)计算得到目前贮存的放射源放射性核素种类及其总活度, 钴-60 为 2.02×10^{15} Bq, 铱-192 为 1.06×10^{12} Bq, 按式(6)中放射源贮存危险指数定义计算得到放射源贮存危险指数为 6.73×10^{4}。该放射源贮存库涉及的放射性核素主要为钴-60 和铱-192, 毒性分组为高毒。根据该放射源库场址特点、建造和运行情况、周边环境敏感特点等资料和数据, 得到某公司放射源贮存库环境风险分级指标各参数取值, 见表 4。

将表 4 中各参数代入式(6), 计算得到分级指标 R_s 为 0.74, 根据环境风险等级划分标准(表 3), 该公司放射源贮存库的环境风险等级为二级。

该公司部分废旧放射源外运前, 放射源贮存危险指数为 2.08×10^{6}, 采用本研究的环境风险评估与分级方法可得该公司的环境风险分级指标 R_s 为 0.87, 风险等级为一级, 与文献 [28] 的评估结果一致; 外运部分废旧放射源后的环境风险评估结果为二级, 主要由于在部分废旧放射源外运后, 该放射源贮存库

表 2 校正系数分级取值

Table 2 Grading and values of the correction coefficients

系数类别	等级	取值
放射性核素毒性校正系数(α)	极毒	1.4
	高毒	1.2
	中毒	1.0
	低毒	0.9
	其他	0.8
触发风险因素校正系数(β)	一级	1.00
	二级	0.96
	三级	0.92
	四级	0.88
	五级	0.83
安全减缓因素校正系数(δ)	一级	1.00
	二级	0.90
	三级	0.81
	四级	0.71
	五级	0.60
敏感风险因素校正系数(ε)	一级	1.00
	二级	0.96
	三级	0.92
	四级	0.88
	五级	0.83

表 3 放射源贮存库风险级别和分级指标 R_s 的对应关系

Table 3 Correspondence between radioactive source repository risk levels and classification index R_s values

放射源贮存风险分级	R_s
一级	≥0.80
二级	0.57~0.80
三级	0.44~0.57
四级	0.20~0.44
五级	<0.20

表 4 某公司放射源贮存环境风险分级指标参数取值

Table 4 Parameter values of environmental risk classification index of radioactive source storage of a company

参数	等级	取值
放射源贮存危险指数		6.73×10^{4}
α	高毒	1.2
β	四级	0.88
δ	四级	0.71
ε	二级	0.96

采取了控制放射源数量增长、保持稳定风险水平的一些措施，以使其能够达到主管部门风险管理的要求，这也表明评估结果反映了放射源贮存库管理现状。由此可见，本研究建立的环境风险评估与分级方法能够将半定量、模糊性的评估指标利用数学方法实现定量化的表征，简单实用、可操作性强，可适用于放射源贮存库的环境风险管理。

3　结论

（1）放射源贮存危险指数是放射源贮存库环境风险的决定性因素，其等级取值变化主导着放射源贮存库的环境风险等级水平变化，其他关键风险因素虽对放射源贮存库环境风险水平等级有一定影响，但作用有限。因此，本研究以放射源贮存危险指数作为风险分级指标。由于放射源贮存的潜在危险来自于放射源的放射性核素种类及活度，放射源贮存危险指数反映了放射源贮存库的危险特性，体现了放射源贮存库风险的本质特征，是表征放射源贮存库环境风险较为适合的分级指标。

（2）基于放射源贮存危险指数及其等级取值区间连续性特点，采用数学统计分析方法进行回归分析，确定了放射源贮存库环境风险分级指标的定量表征模型，并引入校正系数，建立了放射源贮存库环境风险评估与分级计算模型。

（3）案例应用结果表明，采用本研究建立的环境风险评估与分级方法对某公司放射源整备外运后的环境风险评估结果为二级，基本可以反映放射源贮存库环境风险的现状；而对该公司整备外运废旧放射源前的环境风险评估结果与其前期评估结果一致，并且评估过程简单易行，因此，本研究提出的基于放射源贮存危险指数的环境风险评估与分级方法具有较强的适用性和良好的可操作性。

参考文献

[1] 赵庆会, 史蕾, 王辉. 废旧放射源回收再利用的可行性分析 [J]. 中国辐射卫生, 2015, 24(4): 383-385.

[2] 国家核安全局. 核安全年报 (2022)[EB/OL].[2024-01-05]. http://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqnb/.

[3] 曲淑英. 生产测井用密封源的存储与辐射防护 [J]. 油气田环境保护, 2016, 26(3): 26-28.
QU S Y. Storage and protection of sealed radioactive source for production logging[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2016, 26(3): 26-28.

[4] 闫学文, 薛向明, 杨雪, 等. 某高校放射源库辐射场的 MCNP 模拟及分析 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, 36(2): 54-59.
YAN X W, XUE X M, YANG X, et al. MCNP simulation and analysis of radiation fields in radioactive source storehouses in a certain university[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, 36(2): 54-59.

[5] 张则菊, 李春苗, 秦斌, 等. 放射源存储及运输辐射环境污染情况监测与分析 [J]. 四川环境, 2020, 39(6): 161-165.
ZHANG Z J, LI C M, QIN B, et al. Monitoring and analysis of radioactive environmental pollution of storage and transportation of radioactive sources[J]. Sichuan Environment, 2020, 39(6): 161-165.

[6] 蔡小杰, 王小胡, 熊铁军, 等. 放射源库环境核辐射剂量研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(4): 621-624.
CAI X J, WANG X H, XIONG T J, et al. Environmental nuclear radiation dose assessment of radioactive source bank[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, 42(4): 621-624.

[7] International Atomic Energy Agency. Code of conduct on the safety and security of radioactive sources[R]. Vienna: IAEA, 2004.

[8] International Atomic Energy Agency. Guidance on the import and export of radioactive sources[R].Vienna: IAEA, 2005.

[9] International Atomic Energy Agency. Guidance on the management of disused radioactive sources[R]. Vienna: IAEA, 2018.

[10] VAZ P. Radiological protection, safety and security issues in the industrial and medical applications of radiation sources[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, 116: 48-55.

[11] International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series No. GSG 12: organization, management and staffing of the regulatory body for safety[R]. Vienna: IAEA, 2018.

[12] International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series No. GSG 13: functions and processes of the regulatory body for safety[R].Vienna: IAEA, 2018.

[13] BACIU A, STERN W. Establishing a sustainable regulatory framework for the security of radioactive sources through harmonization with a safety regulatory framework[R]. New Jersey:the Institute of Nuclear Materials Management, 2020.

[14] International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1344: categorization of radioactive sources[R]. Vienna: IAEA, 2003.

[15] International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series No. RS-G-1.9: categorization of radioactive sources[R].Vienna: IAEA, 2006.

[16] 卫生部. 基于危险指数的放射源分类: GBZ/T 208—2008[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2008.

[17] 王晓涛, 陈栋梁. 我国核技术利用的辐射安全监管现状 [J]. 环境与职业医学, 2013, 30(4): 295-297.
WANG X T, CHEN D L. Radiation safety supervision of nuclear technology utilization in China[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2013, 30(4): 295-297.

[18] International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series No. RS-G-1.10: safety of radiation generators and sealed radioactive sources[R]. Vienne: IAEA, 2006.

[19] MAHMOUD N S. Safety assessment methodology in management of spent sealed sources[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 118(1/2/3): 1-8.

[20] International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1824: Generic post-closure safety assessment for the disposal of disused sealed sources in narrow diameter boreholes[R]. Vienna: IAEA,

2017.

[21] COTA S, HIROMOTO G, GHARBIEH H, et al. Preliminary post-closure safety assessment for a borehole-type repository for disused sealed radioactive sources in Brazil[J]. Progress in Nuclear Energy, 2018, 103: 74-80.

[22] OFORIWAA P O, AN H X, LIANG M C, et al. Research on safety assessment of disposal options of disused sealed radioactive sources in ghana: focus on disposal system analysis[C]//The proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering.Tsukuba:Japan Society of Mechanical Engineers, 2019.

[23] BATES E, MIDGLEY J. Features, events, and processes prioritization for deep borehole disposal concepts in crystalline rock and shale[C]//2022 ANS Annual Meeting.Anaheim: Transactions of the American Nuclear Society, 2022.

[24] 贺长兴, 尹在哲. 基于故障树分析法的放射源丢失事故分析 [J]. 中国辐射卫生, 2011, 20(4): 471-475.

[25] 魏澜波, 王兆平, 李厨荣, 等. 某油田测井放射源库风险评估探讨 [J]. 工业卫生与职业病, 2014, 40(2): 144-146.

[26] 冯加武. 钢铁企业辐射风险评估与控制对策研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.

[27] 罗丽娟. 上海市电离辐射风险评估和应急评价系统研究 [D]. 上海: 东华大学, 2012.

[28] 孙朋, 伏亚萍, 严源, 等. 基于模糊综合评价法的某公司废放射源库环境风险评估研究 [J]. 环境科学与管理, 2023, 48(1): 189-194.
SUN P, FU Y P, YAN Y, et al. Study on environmental risk assessment of waste radioactive source storage of A company based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Environmental Science and Management, 2023, 48(1): 189-194.

[29] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.

[30] 朱小飞, 王永君, 李大军. 模糊评价中最大隶属度原则有效性检验 [J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 135-137.
ZHU X F, WANG Y J, LI D J. The effectiveness test of the maximum membership principle in fuzzy comprehensive evaluation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(5): 135-137.

[31] 国家环境保护总局. 关于发布放射源分类办法的公告: 2005 年第 62 号 [EB/OL]. [2024-01-10]. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/gg/200910/t20091021_171607.htm.

[32] FINSTERLE S, MULLER R A, GRIMSICH J, et al. Post-closure safety analysis of nuclear waste disposal in deep vertical boreholes[J]. Energies, 2021, 14(19): 6356.

[33] LEE S, KIM J, KIM S. Preliminary post-closure safety assessment of disposal options for disused sealed radioactive source[J]. Economic and Environmental Geology, 2016, 49(4): 301-314.

[34] LEE S, KIM J. Preliminary post-closure safety assessment of disposal system for disused sealed radioactive source[J]. Journal of Soil and Groundwater Environment, 2017, 22(4): 33-48.

[35] MITRAKOS D, KONTOGIANNI V, KAVOURA K, et al. Preliminary safety assessment for planning near surface disposal of low-level radioactive waste in Greece[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2023, 263: 107163.

[36] European Parliamentand of the Council. Directive 2003/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2003 amending Council Directive 96/82/EC on the control of major-accident hazards involving dangerous substances : Seveso Ⅱ Directive 2003/105/EC [S/OL]. (2003-12-31)[2024-01-01]. https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do? uri=CELEX:32003L0105:EN:HTM.

[37] Australia National Occupational Health and Safety Commission (NOHSC). Control of major hazard sources: National Standard NOHSC 1014-2002 [S]. Canberra: Australian Government Publishing Service, 2002.

[38] 刘骥, 师立晨, 孙猛, 等.《重大危险源辨识》标准修订研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(4): 9-12.
LIU J, SHI L C, SUN M, et al. Study on the revision of standard for "Identification of major hazard installations" (GB18218-2000)[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 4(4): 9-12.

[39] 王喜奎, 吴宗之, 孙猛, 等. 关于重大危险源辨识标准修订的探讨 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 162-166.
WANG X K, WU Z Z, SUN M, et al. Probe into the revision of criteria for major hazard installation identification[J]. China Safety Science Journal (CSSJ), 2007, 17(1): 162-166.

[40] 魏利军, 吴宗之. 一种简单可行的危险化学品重大危险源分级方法 [J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(12): 45-50.
WEI L J, WU Z Z. A simple and feasible grading method for major dangerous chemical hazard installations[J]. China Safety Science Journal , 2009, 19(12): 45-50.

[41] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 危险化学品重大危险源辨识: GB 18218—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.