

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.10.014

伴生放射性矿辐射环境风险评价体系研究

梁锦¹, 孔令丰^{1,2}, 宁健³, 丁智¹, 张衍津³

(1. 广东省辐射防护协会, 广州 514000;

2. 广东省生态环境厅, 广州 514000;

3. 广东省环境辐射监测与核应急响应技术支持中心, 广州 514000)

摘要: 伴生放射性矿在开采和加工过程中, 所含天然放射性核素会在不同物料中分离和富集, 可能通过废气、废水或固体废物扩散到环境中, 造成辐射污染。为评价伴生放射性矿的辐射环境风险, 从伴生矿产类别、工业活动、生产环节、生产工艺、地理位置、辐射水平、环境管理等角度梳理伴生放射性矿特点, 分析其辐射环境风险, 总结伴生放射性矿辐射环境风险的识别要素, 初步建立伴生放射性矿辐射环境风险评价体系。

关键词: 伴生放射性矿; 辐射; 环境风险; 评价

中图分类号: X34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2025)10-0154-08

引用格式: 梁锦, 孔令丰, 宁健, 等. 伴生放射性矿辐射环境风险评价体系研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(10): 154-161. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.10.014.

LIANG Jin, KONG Lingfeng, NING Jian, et al. Study on the Radiation Environmental Risk Assessment System of Associated Radioactive Minerals[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(10): 154-161. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.10.014.

伴生放射性矿是指非铀矿中天然放射性核素浓度较高的矿产, 如稀土矿和磷酸盐矿等。实践中, 通常以单个核素活度浓度超过 1 Bq/g 作为判断标准^[1]。伴生放射性矿含有天然放射性核素, 在开采和加工过程中, 这些核素会在不同物料中分离和富集, 导致部分产品和废物放射性超标。此外, 开采和利用这些矿产时, 天然放射性核素可能通过废气、废水或固体废物扩散到环境中, 造成辐射污染^[2], 同时可通过直接接触或食物链的方式进入人体, 损害人体健康^[3]。为评价伴生放射性矿的辐射环境风险, 本文通过梳理伴生放射性矿生产工艺流程以及可能存在的风险因素, 分析梳理伴生放射性矿开发利用在工业活动、生产工艺、所处位置、自然灾害、安全事故等维度的辐射环境风险因素及特点。采取量化赋分的方式, 初步建立伴生放射性矿辐射环境风险的评价体系。

1 伴生放射性矿辐射环境风险定义

根据《国家突发环境事件应急预案》, 突发环境事件是指污染物排放或自然灾害、生产安全事故等因素导致有毒有害物质进入环境介质, 可能造成环境质量下降、公众健康和财产安全受损、生态环境破坏或重大社会影响, 需紧急应对的事件, 包括大气、水体、土壤污染和辐射污染事件^[4]。本文关注伴生放射性矿辐射环境风险是指开发利用中放射性物质泄漏造成的环境污染事件的风险, 包括放射性污染和超标排放触发的辐射污染事件风险。

2 伴生放射性矿辐射环境风险分析

2.1 原料及其辐射水平

伴生放射性矿原料的量及其辐射水平也是其辐射环境风险需考虑的因素之一。伴生放射性矿涉及

收稿日期: 2025-03-28

基金项目: 生态环境部 2023 年核与辐射安全技术审评外协项目(NSCCG2023-044)

作者简介: 梁锦(1990—), 男, 学士; 通信作者: 宁健(1978—), 男, 硕士, 正高级工程师

很广,不同种类的伴生放射性矿开发利用原料放射性水平差别很大,在相当数量的有色、黑色矿冶、稀土矿冶、煤炭、化工、石材、石油天然气开采等领域的矿山都含有天然放射性,其放射性核素铀、钍、镭的含量高低差别很大,部分不同放射性核素含量详见表1。

表1 部分伴生放射性矿铀、钍、镭含量

Table 1 Contents of uranium, thorium and radium in some minerals associated with radioactivity /($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)

矿产类别	铀	钍	镭	备注
铝矿	0.197	0.125	0.148	—
铜矿	0.276	0.144	0.278	—
锡矿	0.441	0.045	0.412	—
铅、锌矿	0.157	0.008 9	0.960	—
稀土矿	0.414~1.48	1.60~9.80	0.260	—
磷矿	0.017~0.556	0.001 2	0.016	^{40}K 含量 0.25 Bq/g

研究显示,一般情况下,在原始伴生放射性矿中所含有的放射性核素水平要大于固体废物中所含的放射性核素水平,部分原始伴生放射性矿中所含有的放射性核素水平与固体废物中所含的放射性核素水平持平,比值维持在1左右,只有在少数情况下,固体废物所产生的放射性核素水平要大于原料^[5]。此外,伴生放射性矿原料形状、大小、形态也会影响其贮存或后续冶炼工艺过程中的辐射环境风险,例如块状或大颗粒的原料对其研磨及粉碎要求高,也可能导致含放射性粉尘的增加或需使用到更多的溶液等;而粉末状或其他易溶于水的原料则对其防风或防水浸有更多的要求。

2.2 工业活动

根据《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录》(2020公告第54号),伴生放射性矿开发利用的工业活动分为采矿、选矿和冶炼等^[1]。

2.2.1 采矿

伴生放射性矿的采矿企业,主要集中在煤、铁等行业,这些矿石中原矿的放射性水平并不高,且矿石均是作为产品进行管理,管理相对规范,一般采矿活动不易导致放射性物质泄漏造成的环境污染,辐射环境风险不高。

但也有些例外,如根据全国第二次污染源普查^[5],包头白云鄂博矿的大量(约18亿t,其中约9亿t废石已经封场治理)的放射性水平 ^{238}U 在探测限以下, ^{232}Th 检测结果为1 440 Bq/kg, ^{226}Ra 检测结果为21 Bq/kg, γ 辐射剂量率为738 nGy/h,这些废石如果发生风险,一定会对环境造成辐射污染。再如某些矿山的渗出水的放射性水平较高,如辽宁弓长岭某

铁矿,露天采场渗出水中的铀的浓度达到10 mg/L(枯水期),丰水期也有1~2 mg/L,且水量大(一年达到数十万立方米),如果发生风险,导致渗出水流入到环境中,也会造成水体放射性污染。

2.2.2 选矿

选矿是伴生放射性矿开发利用的一个主要活动,主要集中在锆、钛、铌钽、稀土等行业,这些选矿工艺主要是重选、电选、磁选和浮选。根据第二次污染源普查,选矿过程中的放射性物质均进入到各类精矿中,尾矿中放射性水平较低,一般都低于豁免水平,大多与土壤中的放射性水平相当。精矿作为产品,管理相对规范,且比重大,在厂区内暂存量不大,不容易流散,基本不会造成突发辐射环境事件。且选矿过程中的水可重复利用,放射性物质很少溶解到水中,根据第二次污染源普查,选矿循环用水中的放射性水平均低于1 Bq/L^[6],不属于伴生放射性废水,因此不易发生突发辐射环境事件,辐射环境风险低。

2.2.3 冶炼

1) 火法冶炼

冶炼主要分为火法冶炼和湿法冶炼,采用火法冶炼的企业一般出现在钢铁、锆等行业。一般来说,火法冶炼过程中没有放射性废水产生,在废水方面不会产生辐射环境风险。放射性物质主要是分散到产品中或富集在尾渣中,存在的辐射环境风险主要是伴生放射性废渣。在火法冶炼的企业中,辐射环境风险主要体现在专门收集处置放射性废渣处置设施上。

2) 湿法冶炼

湿法冶炼过程中,由于使用到酸、碱等溶液,放射性物质进入到水溶液中形成伴生放射性废水,一部分放射性物质残留在溶解渣中形成伴生放射性废渣,伴生放射性废水的处理过程是将放射性物质从废水中转移到废渣中,也会产生伴生放射性废渣。例如稀土的生产过程中放射性核素大多残留在矿渣中,稀土生产工艺中产生的放射性废水的量和放射性水平均不是太高,有研究显示,正常情况下周围环境中水体放射性基本可处于本底水平内^[7],且部分工艺中产生的放射性废水可循环使用^[8],不对外排放;铌/钽冶炼工艺中产生的伴生放射性废水主要是萃余废水,放射性水平较高,但量不大^[9];氧氯化锆由于原料和生产工艺的特点^[10],放射性物质全部溶解到水中,造成废水中放射性水平较高且水量大,一个典型的氧氯化锆企业每年会产生10多万立方米伴生放射性废

水,部分氧氯化锆生产企业的母液中铀的含量达到数克/升的级别,也会产生数量较大的伴生放射性废渣,同时对稀土冶炼有关研究也提及稀土冶炼厂周边土壤环境可能对人体具有一定的健康风险^[11]。因此湿法冶炼阶段是最有可能产生突发辐射环境事件,存在辐射环境风险的环节。

2.3 放射性废物

2.3.1 气态污染物

伴生放射性矿的开发一般都是露天作业,在开发过程中形成了大量的粉尘,此外伴生放射性矿开发利用单位的原料堆放场所、扬尘和生产工艺中破碎、研磨产生的各种粉尘都含有放射性核素^[12]。伴生放射性矿气态污染物根据其来源和性质,主要可以分为两大类:首先是氡、钍射气($^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$)这类气载污染物。这些气体是伴生放射性矿在开采、加工等过程中自然释放的,其释放速度相对缓慢,不会因生产工艺的改变、原材料的不同或突发事故而导致大量释放,不存在触发伴生辐射环境事件的风险。另一类气态污染因子则是粉尘中的放射性物质。这些物质在矿石破碎、研磨等过程中被释放,如果伴生放射性矿企业的过滤系统失效,则可能导致这些放射性物质进入大气中。但与氡、钍射气相比,粉尘中的放射性物质在释放量和影响范围上通常较小,通常不会触发辐射环境污染事件。

因此伴生放射性矿气态污染物基本上不会导致突发环境事件,其辐射环境风险也相对较低,可不予以关注。

2.3.2 放射性废水

伴生放射性废水排放导致放射性物质进入水体,存在两种主要情况:超标排放和误排。超标排放虽然在大多数情况下由于受纳水体的稀释能力而不会对水环境质量造成显著影响,但在特定条件下,如受纳水体的稀释能力不足且下游存在饮用水集中取水口时,这些放射性物质可能对公众健康构成威胁。相比之下,误排则更为严重。如果伴生放射性废水未经处理或处理不当而误排入水体中,将导致水体中放射性水平显著提高,辐射环境质量急剧下降。这种情况不仅会对水生生态系统造成破坏,还可能对饮用水安全构成严重威胁。放射性废水的误排和超标排放有可能导致辐射污染事件,存在辐射环境风险。

2.3.3 放射性固体废物

放射性固体废物在采矿、选矿及冶炼过程中均有产生。在采矿活动中极少数矿山会产生放射性水平较高的废石;火法冶炼过程中,伴生放射性矿的放射性

物质可能会分散到产品中或富集在尾渣中,一般来说,这类废渣的放射性水平不会太高;湿法冶炼的过程中,一部分放射性物质残留在溶解渣中形成伴生放射性废渣,伴生放射性废水的处理过程是将放射性物质从废水中转移到废渣中,也会产生伴生放射性废渣。

据资料介绍,我国伴生放射性固体废物处理处置率极低,累积贮存量巨大,多数地区和企业未建设贮存和处置设施,仅有部分国有大中型企业将生产产生的固废进行专门堆存和贮存堆库,很多中小企业都存在乱堆乱放问题^[12]。同时,由于伴生放射性核素的特殊性,伴生放射性固体废物无法进入工业固体废物填埋场、危险废物填埋场、核工业放射性废物处置场,长期暂存于企业厂区内,辐射环境安全隐患突出。但含放射性废石与放射性废渣,在正常情况下基本不会排放到环境中,需结合其他可能发生的事故,如放射性固体废物的数量、自然灾害、安全事故、企业管理不善或企业破产无人管理等因素,综合考虑伴生放射性矿的固体废物进入环境导致污染的可能性。

2.4 企业位置

企业所处位置涉及的辐射环境风险主要与周边是否存在环境敏感区域、水体,或企业所处位置的极端自然灾害如:台风、龙卷风、洪水、地震等的自然灾害的发生导致放射性物质流入环境,如台风对物料的吹散、抛撒;洪水对原料、中间产品及废渣的冲刷、浸泡;地震破坏设施导致放射性物料的泄漏等。伴生放射性矿企业需结合当地的气象、地理特征、往年的自然灾害发生频率及企业的具体地理位置开展辐射环境风险的分析。

2.4.1 台风/龙卷风

在伴生放射性矿的工业生产过程中,特别是锆钛选矿厂,因工艺需要而堆存大量原料。面临台风或龙卷风等极端天气时,堆放的放射性物料,尤其是露天堆放的物料,其安全性便受到了极大的挑战。例如在风力作用下,这些物料有可能被吹散到环境中,造成一定程度的放射性污染。

2.4.2 洪水

一般情况下,普通的洪水难以侵入厂区内部。当面对极端洪水灾害时,如超过百年一遇的特大洪水,需考虑其可能带来的辐射环境风险。一旦洪水涌入厂区内部,一是可能导致伴生放射性物料被浸泡,但由于天然放射性物质物理和化学性质,即使被洪水浸泡,一般也不会溶解在水中,导致水体中的放射性水平显著升高;其次是洪水足够强大,足以冲走厂区

内的伴生放射性物料或废水,由于洪水的冲刷和搬运作用,它们可能会分散到更广泛的区域,从而增加对环境的潜在影响,但即使在这种情况下,考虑到极端洪水的量极大的特殊性和天然放射性物质的特性,水体中的辐射水平也不太可能达到需要触发辐射环境事件的程度。综上所述,伴生放射性矿开发利用企业在面对极端洪水灾害时,虽然存在一定的辐射环境风险,但由于天然放射性物质及洪水的特性,这种风险相对较小。

2.4.3 地震

一般伴生放射性矿开发利用的抗震等级较弱,但出于安全考虑,相关的建构筑物在设计时都会严格遵循当地的抗震规范。在正常情况下,放射性的物料往往储存在经过特殊设计和加固的设施中,地震并不会直接导致放射性固体物料进入环境。但对于厂区内的放射性废水或含放射性溶液,当其贮存设施遭到地震损坏时有可能溢出到厂区环境,甚至扩散到厂外,对土壤造成污染,是有可能触发辐射环境事件的。但是伴生放射性矿开发利用厂区内贮存的放射性废水或溶液的量一般相对较少。即使发生泄漏,其造成的污染范围通常也局限于厂区或厂外的小范围区域。

2.5 安全事故

安全事故的辐射环境风险是指在生产过程中发生安全生产事故,在处置的过程中放射性物质进入环境中,发生次生环境灾害,导致放射性物质进入环境。

2.5.1 火灾

伴生放射性矿开发利用企业在火灾情境下放射性物质可能会因火势蔓延、消防措施等因素,面临放射性物质泄漏的风险。例如在消防的过程中,放射性物质可能随着消防用水进入厂区或环境中。其风险程度取决于多个因素,包括伴生放射性矿开发利用的类型、火灾发生的具体部位以及厂区的消防应急能力等。以选矿厂为例,由于其主要处理的矿物中放射性元素并未浸出,且一般不溶于水,因此在发生火灾时,放射性物质泄漏到厂区甚至厂外环境的可能性较小。然而,对于独居石或铈/钽及氧氯化锆的生产车间情况则大不相同。其加工过程中产生的放射性废水、废渣等都需要经过集中的收集处置。如果生产车间发生火灾,有可能导致放射性溶液泄漏,不仅会对厂区内的设备和人员造成污染和伤害,还可能通过地下水、地表水等途径进入周围环境,对生态系统和公

众健康构成威胁。

2.5.2 爆炸

爆炸事故对于伴生放射性矿企业的辐射环境风险不仅源于其潜在的火灾隐患,也在于可能导致的放射性物质的抛洒。当爆炸发生时,火势的蔓延可能使得放射性物质通过各种途径流入环境,造成潜在的环境污染和辐射风险。

其次,对于采矿企业来说,由于其开采活动主要在地下进行,因此地面上的爆炸事故相对较少。即便在地下发生爆炸,由于地层的阻隔作用,放射性物质进入地表环境的可能性也较小;对于选矿企业通常会对矿石进行破碎、磨细、筛分等处理,发生爆炸的可能性较小;而对于湿法冶炼企业,在冶炼过程中涉及大量的化学反应和液体处理,爆炸的风险则相对较高,爆炸产生的冲击波和火焰可能将放射性物质抛洒到周围环境中,或者因爆炸造成的火灾在消防过程中导致放射性物质流入环境,造成环境污染和辐射风险。

2.5.3 尾矿库垮坝

伴生放射性矿固体废物被集中贮存于尾矿库中时,如果管理不当,是有可能引发次生辐射环境污染的。在合理的设计寿期范围和合适的运营、应急措施下,发生垮坝安全事故的概率较小,但一旦事故发生,由于其伴生放射性矿固体废物量很大其后果可能比较严重。

2.5.4 运输事故

伴生放射性物料在运输过程中,如发生翻车等交通事故,散落的伴生放射性物料无疑会对周围环境构成潜在威胁。通常伴生放射性物料的放射性水平通常较低,且单车次运输的放射性物料量较小,散落的物料通过及时地收集和处理,其放射性污染风险是可以得到有效控制的,一般不会导致辐射污染事件。

2.6 辐射环境管理

伴生放射性矿的辐射环境管理,在防范辐射环境风险中尤为重要。《伴生放射性矿辐射环境保护管理办法(征求意见稿)》(试行)^[13]中明确指出,伴生放射性矿开发利用单位、伴生放射性固体废物处置单位,必须建立健全辐射环境管理机构,并制定详尽的辐射环境管理制度。这些机构与制度不仅要求具备完善的规章制度,还需配备专业、有丰富经验的辐射环境管理人员。企业在设施、制度或人员方面的配置情况也在一定程度上体现其在辐射环境管理方面的风险。

3 伴生放射性矿辐射环境风险评价

按伴生放射性矿的辐射安全风险分析,从企业位置与自然灾难、原料与工艺、放射性废物、安全事故及辐射环境管理五个维度对其进行评价。

3.1 企业位置与自然灾难

3.1.1 安全距离

伴生放射性矿企业与周边居民区、水源地、耕地等环境敏感区域的距离是考量其辐射环境风险的重要指标之一。项目组参考环境影响评价的范围,将居民区安全距离划分为四个等级,500 m 以外为最安全,赋予 0 分;>300~500 m 为较安全,赋予 1 分;>100~300 m 为一般安全,赋予 3 分;而 100 m 以内则视为存在较高风险,赋予 5 分。类似地,也对水源地和耕地的安全距离进行了类似的划分和评价。

3.1.2 自然灾害

在自然灾害方面,主要考虑台风、洪水和地震等因素,可依据企业所处位置的历年自然灾害发生频次及相应等级对其辐射环境风险予以评价(表 2)。根据企业所在地台风发生的频次对其赋分,如 5 年内未发生台风,可以理解该区域为台风极少发生区域,台风带来的风险极低,将赋予 0 分;若近 5 年内发生过台风,根据台风的最大风级及次数赋予 1~3 分,不同地区的伴生放射性矿企业可按实际情况调整。对洪水和地震的辐射环境风险进行了类似的划分和评价。

表 2 企业位置与自然灾难辐射环境风险评价指标

Table 2 Radiation environment risk assessment indicators of enterprise location and natural disasters

评价项目	评价指标
居民区安全距离	500 m 以外赋予 0 分;
	>300~500 m 赋予 1 分;
	>100~300 m 赋予 3 分;
	100 m 以内赋予 5 分
水源地安全距离	1 000 m 以外赋予 0 分;
	>500~1 000 m 赋予 1 分;
	>100~500 m 赋予 3 分;
	100 m 以内赋予 5 分
企业位置、自然灾害(20分)	1 000 m 以外赋予 0 分;
	>500~1 000 m 赋予 1 分;
	>100~500 m 赋予 2 分;
	100 m 以内赋予 3 分
台风或龙卷风	5 年内未发生赋予 0 分,5 年内发生过,按最大风级、次数对企业的影响赋予 1~3 分
洪水	5 年内未发生赋予 0 分,5 年内发生过赋予 1 分
地震	5 年内未发生赋予 0 分,5 年内发生过,按最大震级及对企业的影响赋予 1~3 分

3.2 原料与工艺

原料与工艺方面,重点关注了原料的年处理量、

辐射水平以及堆放方式等因素。在原料年处理量方面,伴生放射性矿企业对原料处理量所带来的潜在风险,从 1 分到 3 分进行了细致的划分。同时以伴生放射性矿的基本限值 1 Bq/g、综合利用限值 10 Bq/g 为基对原料的辐射水平进行了量化赋分评价,以确保企业在处理高辐射水平原料时能够采取相应的防护措施。原料堆放方面,根据有无固定场所,是否露天堆放划分为 3 个等级。工艺方面,根据采矿、选矿、冶炼和工艺的先进程度进行评价。具体指标见表 3。

表 3 原料与工艺辐射环境风险评价指标

Table 3 Radiation environment risk assessment indicators of raw material and process

评价项目	评价指标
原料年处理量	10 t 以下赋予 0 分,>10~100 t 赋予 1 分,
	>100~1 000 t 赋予 2 分,>1 000~10 000 t 及以上赋予 3 分
原料与工艺(15分)	1 Bq/g 以下赋予 0 分,>1~10 Bq/g 赋予 1 分,>10~100 Bq/g 赋予 2 分,>100~400 Bq/g 赋予 3 分,400 Bq/g 以上赋予 4 分
	原料堆放
工艺	开采、选矿赋 1 分;火法冶炼赋 1 分,湿法冶炼按不同先进程度的工艺赋 3~4 分

3.3 安全事故

安全事故方面,特别关注火灾、爆炸、尾矿库垮坝以及运输事故等可能引发放射性污染的事件。以安全事故导致放射性物质进入环境的可能性及进入环境的放射性物质质量进行赋分,伴生放射性开放利用企业可根据企业的实际情况调整赋分比例(表 4)。在尾矿库垮坝方面,尾矿库理论上越接近设计首期,发生事故的的概率及验证程度越大,因此本文根据尾矿库的设计寿命和垮坝的严重程度,从 1 分到 10 分进行了细致的划分。这样的划分有助于企业提前识别潜在的安全隐患,并采取相应的预防措施。运输事故则根据运输路线是否经过环境敏感点对其进行划分。

表 4 安全事故辐射环境风险评价指标

Table 4 Radiation environment risk assessment indicators of safety accidents

评价项目	评价指标
火灾、爆炸	火灾、爆炸可能会导致有少量放射性溶液或物料流入环境的赋 2 分;导致有大量放射性溶液或物料流入环境的赋 3 分;导致有极大量放射性溶液或物料流入环境的赋 5 分
	安全事故(20分)
尾矿库垮坝	在设计寿命前期赋 1 分,中期赋 3 分,后期赋 5 分,超出设计寿命的赋 10 分。无尾矿库 0 分
运输事故	运输线路中有经过环境敏感点的赋 5 分,无环境敏感点的则赋 0 分

3.4 放射性废物

在放射性废物方面,对废水产生的量、废水放射性核素浓度、放射性固体废物的量及核素活度等多个指标进行了评价。以废水产生的量为例,根据年放射性废水排放量的不同,从1分到5分进行了划分(表5)。废水放射性核素浓度方面,参考《伴生放射性矿开发利用环境辐射限值》(征求意见稿)关于液体流出物排放限值对其进行划分。综合考虑了废水的去向和受纳水体的自洁能力等因素,以全面评估废水排放对环境的潜在影响。同时,对固体废物的贮存量与核素活度浓度进行了相应的划分。固体废物存储方面,依据是否有专门的存储场所进行评价。防渗措施方面则根据其是否满足要求的防渗措施进行评价。

表5 放射性废物辐射环境风险评价指标
Table 5 Radiation environment risk assessment indicators of radioactive waste

评价项目	评价指标
废水产生的量	年放射性废水排放量 1 000 m ³ 赋1分,每增加一倍增加1分,最高5分
废水放射性核素浓度	放射性废液中铀小于0.3 mg/L,钍小于0.3 mg/L,镭-226小于1.1 Bq/L的赋0分;每增加10倍增加1分,最高5分
废水去向	受纳水体流量可稀释所排出的放射性废水的赋0分,不足以稀释的赋5分;受纳水体的自洁能力使得在接纳放射性废水后仍可保持相应的水质及生态要求的赋0分,不足以维持的赋5分
放射性废物(35分)	固体废物的量
	0~1 000 t 赋1分; >1 000~2 000 t 赋2分; >2 000~5 000 t 赋3分; >5 000~10 000 t 赋4分; 10 000 t 以上赋5分
	固体废物产生核素活度浓度
	铀(钍)系单个核素活度浓度不超过1 Bq/g的固体废物赋0分;铀(钍)系单个核素活度浓度超过1 Bq/g不超过100 Bq/g的固体废物赋3分;铀(钍)系单个核素活度浓度超过100 Bq/g的固体废物赋5分
	固体废物存储方式
	有专门的存储场所赋0分;无专门固定的存储场所赋5分
	防渗措施
	存储场所有满足要求的防渗措施的赋0分;存储场所有防渗措施但不满足要求的赋3分;存储场所无防渗措施的赋5分

3.5 辐射环境管理

在辐射环境管理方面。则主要关注了企业的规章制度、管理岗位(人员)以及其他因素。在规章制度方面,企业是否建立完善的辐射环境管理制度,并定期对制度进行更新和完善,是其辐射安全管理工作是否完善的体现,根据其完善程度进行划分(表6)。同时,企业是否设置专门的辐射环境管理岗位,并配备熟悉辐射环境管理的人员,也是辐射环境管理中关键的因素,根据岗位设置与人员资质对其进行划分。而对于停产无人管理且有未处理的废水、渣及原料的企业,建议可直接将其风险等级列为高风险。

表6 环境管理辐射环境风险评价指标

Table 6 Radiation environment risk assessment indicators of environmental management

评价项目	评价指标	
辐射环境管理(10分)	规章制度	规章制度完善的赋0分,不完善的视其程度赋1~5分
	管理岗位(人员)	设置有专门辐射环境管理岗位且配有对辐射环境管理熟悉人员的赋0分;设置有专门辐射环境管理岗位,未配置对辐射环境管理熟悉人员的赋3分;无则赋5分

4 伴生放射性矿辐射环境风险等级

可依据伴生放射性矿五个维度的辐射环境风险评价指标,建议分别设置为四个风险等级:稍有风险、一般风险、较高风险、高风险(表7)。例如:20分及以下为稍有风险;21~40分为一般风险;41~60分为较高风险;61分及以上为高风险。

表7 伴生放射性矿企业辐射环境风险级别

Table 7 Radiation environment risk assessment level of enterprises engaged in minerals associated with radioactivity

风险级别	高风险	较高风险	一般风险	稍有风险
评分	61分及以上	41~60分	21~40分	20分及以下
管理对策	跟踪关注,需要即行整改	重点关注,需要限期整改	一般关注,日常管理完善	普通关注,日常管理改善

5 结束语

从伴生放射性矿的矿产类别、工业活动、生产环节、生产工艺、地理位置、辐射水平、辐射环境管理等维度对伴生放射性矿开放利用的辐射环境风险进行了分析,总结了辐射环境风险评价指标,初步建立了伴生放射性矿辐射环境风险评价体系。所建立的风险评价体系是伴生放射性矿辐射环境管理中的一种探索,评价维度、评价指标及评价体系的完善有待进一步实践与研究。风险等级的划分亦需结合评价体系的实践及伴生放射性矿企业的实际情况进一步验证其合理性。

参考文献

[1] 生态环境部. 关于发布《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录》的公告[EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202011/t20201127_810163.html.
Ministry of Ecology and Environment. Announcement on the Release of the "List of Supervision and Administration of Radiation Environment for the Development and Utilization of Mineral Resources" [EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202011/t20201127_810163.html.

[2] 刘华, 罗建军, 马成辉, 等. 第一次全国污染源普查伴生放

- 射性污染源普查及结果初步分析[J]. 辐射防护, 2011, 31(6): 334-341.
- LIU H, LUO J J, MA C H, et al. Investigation and analysis of NORMs based on the first nationwide pollution source survey[J]. Radiation Protection, 2011, 31(6): 334-341.
- [3] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发国家突发环境事件应急预案的通知[EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-02/03/content_9450.htm.
- The General Office of the State Council. General Office of the State Council concerning the national emergency preplans for environmental emergency notice[EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-02/03/content_9450.htm.
- [4] 朱小皎, 肖笔夫, 谷洪, 等. 某稀土冶炼厂及周边土壤放射性水平调查及风险评估[J]. 辐射防护, 2024, 44(3): 233-239.
- ZHU X J, XIAO B F, GU H, et al. Investigation and risk assessment of soil radioactivity levels at a rare earth refining factory and surrounding area[J]. Radiation Protection, 2024, 44(3): 233-239.
- [5] 刘永, 陈逸凡, 丁悦, 等. 伴生放射性矿放射性污染现状及其防治管理对策[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2020, 21(4): 1-5.
- LIU Y, CHEN Y F, DING Y, et al. The current situation of radioactive pollution of associated radioactive minerals and its countermeasures of prevention and management[J]. Journal of University of South China (Social Science Edition), 2020, 21(4): 1-5.
- [6] 生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.
- Ministry of Ecology and Environment. The Second National Pollution Census Bulletin[EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.
- [7] 宁健, 汤泽平, 程晓波, 等. 2020—2022年某伴生放射性矿辐射环境特征分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(12): 115-121.
- NING J, TANG Z P, CHENG X B, et al. Analysis of radiation environment characteristics of an associated radioactive mine from 2020 to 2022[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(12): 115-121.
- [8] 帅震清, 朱世富, 赵北君. 稀土湿法生产过程中放射性核素的迁移及对公众所致辐射剂量研究[J]. 核动力工程, 2003, 24(6): 593-596.
- SHUAI Z Q, ZHU S F, ZHAO B J. Study on radio-nuclides transfer and radiation doses of the public in some rare-earth mine wet refining processes[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(6): 593-596.
- [9] 黄朕. 钽铌矿冶炼中的放射性污染及活度计算方法[J]. 能源研究与管理, 2020(3): 91-95.
- HUANG B. Radioactive pollution and activity calculation method in tantalum niobium ore smelting[J]. Energy Research and Management, 2020(3): 91-95.
- [10] 罗六保, 温盛红, 谢志鹏. 氧氯化锆湿法生产工艺及其废渣处理研究进展[J]. 化学研究, 2016, 27(6): 791-796.
- LUO L B, WEN S H, XIE Z P. Progress in wet process of zirconium oxychloride production and its waste residue treatment[J]. Chemical Research, 2016, 27(6): 791-796.
- [11] 李冠超, 史天成, 杨波, 等. 某稀土冶炼厂及周边环境土壤中放射性核素分布特征与风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 119-126.
- LI G C, SHI T C, YANG B, et al. Distribution characteristics and risk assessment of radionuclide in soils of a rare-earth smelter and its surrounding environment[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8): 119-126.
- [12] 滕柯延, 曾宇峰, 谢树军, 等. 我国伴生放射性矿废物处置现状研究[J]. 核安全, 2022, 21(6): 13-18.
- TENG K Y, ZENG Y F, XIE S J, et al. Research on the status of domestic NORM waste disposal in China[J]. Nuclear Safety, 2022, 21(6): 13-18.
- [13] 生态环境部. 关于公开征求《伴生放射性矿辐射环境保护管理办法(试行)(征求意见稿)》和《伴生放射性废水处理与排放技术规范(征求意见稿)》意见的通知[EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202109/t20210915_943290.htm.
- Ministry of Ecology and Environment. Notice on Soliciting Public Opinions on the "Administrative Measures for Radiation Environmental Protection of Associated Radioactive Mines (Trial) (Draft for Public Comment)" and the "Technical Specifications for the Treatment and Discharge of Associated Radioactive Wastewater (Draft for Public Comment)" [EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202109/t20210915_943290.htm.

Study on the Radiation Environmental Risk Assessment System of Associated Radioactive Minerals

LIANG Jin¹, KONG Lingfeng^{1,2}, NING Jian³, DING Zhi¹, ZHANG Yanjin³

(1. Guangdong Radiation Protection Association, Guangzhou 514000, China;

2. Department of Ecology and Environment of Guangdong Province, Guangzhou 514000, China;

3. Guangdong Environmental Radiation Monitoring and Nuclear Emergency Response Technical Support Center, Guangzhou 514000, China)

Abstract: With the rapid economic development, the demand for mineral resources is increasing day by day. Associated radioactive minerals, as a special type of mineral resource, refer to non-uranium ores containing elevated concentrations of natural radionuclides, such as rare earth ores and phosphate ores. In practice, a single nuclide activity concentration exceeding 1 Bq/g is commonly adopted as the criterion for identification. The exploitation and processing of associated radioactive minerals may lead to the redistribution and enrichment of natural radionuclides in intermediate products and residues, some of which could exceed regulatory radioactivity thresholds. Natural radionuclides released through exhaust gases, wastewater, or solid waste during these activities may disperse into environmental media, posing risks of environmental radiological contamination. This study has developed a radiation environmental risk assessment system of associated radioactive minerals through systematic analysis of risk determinants and characteristics in their extraction and processing. Focuses on the environmental risks arising from associated radioactive minerals, defined as the risks of environmental pollution events caused by radioactive substance leakage into atmospheric, aquatic, or terrestrial environments due to pollutant emissions, natural disasters, production accidents, or other emergencies during resource development and utilization. This includes risks of radiation pollution events triggered by radioactive contamination or excessive emissions. The research team has analyzed the production processes and potential risk factors of associated radioactive minerals, identifying radiation environmental risk characteristics of the development and utilization of associated radioactive minerals across multiple dimensions including industrial activities, production processes, locations, natural disasters, and safety incidents. A quantitative scoring methodology has adopted to assess radiation environmental risks during the development and utilization of associated radioactive minerals, where each evaluation dimension incorporating multiple weighted risk factors based on their respective hazard potentials. Aggregated dimensional scores enable preliminary enterprise classification into different hierarchical risk levels. From the radiation environmental risk assessment system for associated radioactive minerals, the radiation environmental risks could be classified some major clusters: 1) Enterprise location includes distances from boundaries to designated sensitive zones (human settlements, drinking water resources, and arable land), and region-specific natural disasters (typhoons, tornadoes, floods, and earthquakes). 2) Raw material includes the facility's annual throughput, radiation levels, storage methods, and processing technology. 3) Safety accidents include fire incidents, explosive accidents, tailings dam breaches, and radioactive material transport emergencies. 4) Radioactive waste includes liquid effluent volume, aqueous phase radionuclide concentration, solid radioactive waste arisings, and nuclide-specific activity. 5) Environmental management includes regulatory provisions, designated organizational roles, personnel competence, and ancillary factors. In this study, the radiation environmental risk assessment results are categorized into four distinct levels based on total evaluation scores. Slight Risk (≤ 20 points) needs general attention and daily management enhancement. Moderate Risk (21–40 points) requires standard attention and daily management refinement. Elevated Risk (41–60 points) demands focused attention and timely rectification. High Risk (≥ 61 points) demands tracking attention and instant rectification. For example, enterprises that are engaged in the extraction and utilization of associated radioactive minerals with production cessation, lack of management, and the presence of radioactive wastewater, waste residues, and raw materials can be directly defined as having an extremely high radiation environmental risk, and thus are assigned a high risk level. This study proposes a radiation environmental risk assessment system for associated radioactive minerals, representing an exploration approach to the management of radiation environments in associated radioactive minerals. The assessment system, including its dimensions, indicators, and methodology, requires further refinement through additional research and practical application. Additionally, the risk categorization scheme requires validation through practical application, accounting for the real-world operational conditions of the assessment system and the actual conditions of associated radioactive minerals enterprises.

Key words: minerals with radioactive; radiation; environmental risk; assessment