

中国铀矿冶辐射防护研究进展

唐好宸¹, 田野², 江国平²

(1. 华北电力大学, 北京 100006;
2. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 铀矿冶作为核燃料循环的源头产业,其辐射防护技术研究对于保障核能安全具有重要意义。通过系统梳理中国铀矿冶辐射防护技术的现状与进展,分析存在的问题及发展方向;发现中国铀矿冶辐射风险主要来源于氡及其子体的内照射和 γ 辐射的外照射,具有多源复合、路径交织的特征。近年来,中国辐射防护技术在监测技术数字化、防护设计优化以及废物治理创新等方面取得了新进展;但仍面临氡通风防护技术局限、健康风险评估方法不完善、监测网络覆盖不足,以及防护材料和设备性能不足等问题。未来,中国铀矿冶辐射防护需构建智能化安全管控平台,发展多学科融合的氡迁移模型,并完善标准体系;通过加强防护意识、优化防护技术与网络,在铀矿冶辐射防护领域实现从“风险控制”到“风险预防”的跨越,为全球铀资源开发提供安全技术支撑,助力核能可持续发展。

关键词: 铀矿冶;辐射防护;氡控制;废物管理;职业健康

中图分类号: TL75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0094-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.05.01

铀矿冶作为核燃料循环的源头产业,其开采过程中²³⁸U衰变产生的氡及其子体、 γ 辐射等复合污染备受关注。国际辐射防护委员会(ICRP)第137号文件指出,铀矿工氡子体暴露贡献了核工业80%以上的集体剂量。中国铀矿床多呈中小型分布,矿体赋存条件复杂,传统地下开采面临井下氡浓度波动大、 γ 辐射叠加等难题^[1]。某典型硬岩铀矿一采场氡活度浓度高达2104 Bq/m³^[2]。地浸工艺虽显著降低了直接职业暴露风险,但抽液孔氡气扩散等问题仍亟待解决。

目前,中国铀矿冶辐射防护研究在法律法规、制度、标准等方面已建立了一定的辐射安全管理体系^[3-5],保障了核技术利用的安全。同时,也在辐射防护技术方面取得了一定的突破。随着核辐射探测器新材料、新工艺不断涌现,核辐射测量的方法学基本成熟,监测防护仪器基本实现数字化,人员防护救治手段基本完善,环境核辐射监测与评价体系初步建立,技术装备软件化发展趋势明

显,一机多能的监测防护仪表开始出现。但中国铀矿冶辐射防护研究仍然存在一些问题和挑战:1)铀矿冶辐射防护研究的系统尚未形成,各研究领域的联系不够紧密,缺乏整体的规划和设计;2)铀矿冶辐射防护研究的技术水平相对较低,一些关键技术尚需突破;3)铀矿冶辐射防护研究的人才队伍较为薄弱,缺乏专业的科研人员。

基于公开的文献资料,系统梳理中国铀矿冶辐射防护的技术体系与创新路径,为构建安全、绿色的铀资源开发模式提供支撑。

1 中国铀矿冶辐射风险特征分析

铀矿冶辐射风险具有多源复合、路径交织的特征。在铀资源开采和提炼过程中,铀矿石或铀产品中的铀镭经放射性衰变产生的氡及其衰变产物^[6-8],被工作人员吸入后造成内照射,是铀矿冶工作人员职业辐射照射危害的主要来源,特别在铀矿山,内照射占总辐射剂量的85%以上^[9]。

从辐射源类型看,铀矿石中²³⁸U衰变产生

收稿日期: 2025-05-09

第一作者简介: 唐好宸(2004—),女,吉林人,在读学士,核工程与核技术专业。

通信作者简介: 江国平(1984—),男,江苏人,硕士,正高级工程师,主要从事地浸采铀与退役治理工作。

^{222}Rn ,其子体 ^{214}Po 释放的 α 粒子可引发呼吸道组织损伤;尾矿中 ^{226}Ra 持续衰变释放的 γ 射线与破碎工序产生的含铀气溶胶形成复合暴露场景。在工艺环节层面,地下矿井因通风受限导致氡活度浓度在 $40\sim 1\,732\text{ Bq/m}^3$ 范围内^[10],而地浸场站抽液孔氡释放量达 30.83 GBq/a ^[11],形成新的弥散路径。暴露途径的多样性进一步加剧辐射风险,矿工同时承受氡子体内照射与 γ 外照射,尾矿库周边 1.5 km 半径内土壤 ^{238}U 污染显著^[12-13]。这种多维度风险特征要求防护技术具备系统性与协同性。

2 中国铀矿冶辐射防护研究进展

中国铀矿冶辐射防护研究涵盖铀矿冶设施、铀尾矿库和铀矿区环境领域。其中,铀矿冶设施辐射防护研究聚焦于矿内辐射防护设计、监测方法、剂量评价及防护措施;铀尾矿库辐射防护研究涉及库区辐射环境评价、渗漏监测、氡及其子体浓度预测及防护措施;铀矿区环境辐射防护研究则包括大气、水体、土壤等环境介质的辐射监测、风险评价及治理技术。

2.1 辐射环境监测技术

无人机、卫星遥感等技术的应用,实现了对大面积辐射环境的快速、精准监测,提高了监测效率和精度。通过实时数据分析和预警,可及时采取防护措施,降低辐射危害。自2004年起,铀矿冶系统通过个人剂量计获取了职业辐射照射剂量实测数据^[14]。随着监测技术提升,可借助更精准数据剖析铀矿冶职业辐射照射剂量偏高的原因,并据此进行技术与生产改进。个体剂量监测体系的完善为职业健康管理奠定了基础。TLD-1000型剂量计将测量不确定度控制在10%以内,而铀化学分离-ICP-MS法的检测限达 10^{-12} 级,实现了对内照射的精准评估。

2.2 氡气防控领域

中国形成了以通风优化为核心的工程防护体系。压抽联合式通风技术的应用使有效风量率提升至70%,满足《铀矿井排氡及通风技术规范》^[15-16]。某铀矿井改造后,回风段氡活度浓度从 $5\,100\text{ Bq/m}^3$ 降至 600 Bq/m^3 ^[17]。动态监测技术的突破尤为显著,KF608型氡监测仪实现井下实时数据采集^[18],SCARD EQF3220设备可区分结合态与未结合态氡子体^[19],这些动态监测技术

可为精准防护提供数据基础。俄罗斯红石矿的 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 预热入风技术^[20],为中国技术升级提供了重要参考。氡气的防控技术除氡的瞬时与连续监测技术提升外,还包括对氡的渗流-扩散析出规律开展相应的氡析出控制技术研究,如控氡通风技术、氡密闭技术、快速封堵技术等。

2.3 废物治理领域

硬岩矿山的铀尾矿、废石堆放场地表面析出氡的速率,一般等于表面积与表面氡析出率的乘积,通过有序堆放、减小堆场表面积、压实堆场等处理手段,使尾矿库氡析出率稳定在 $1\text{ Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以下^[21]。而膨润土作为覆土材料易被暴雨冲刷、后期植被存活率低,建议采用下层膨润土-上层黄土覆盖的结构,在提高植被存活率的同时有效降低覆土厚度、降低成本^[22]。

郭栋清等总结了近年来含铀废水处理技术在化学、物理及生物领域取得的显著进展。化学法以传统沉淀法(苏打-石灰/铁盐絮凝)为基础,结合零价铁还原(铀去除率99.4%)及超声波强化(缩短反应时间、减少铁粉用量),以及协同可渗透反应墙(PRB)技术(铀质量浓度可降至 $56\text{ }\mu\text{g/L}$)可实现高效除铀^[23],但需解决含铀污泥二次污染问题。物理法中,吸附法(石墨烯水凝胶吸附量 898 mg/g)和膜过滤(纳滤/反渗透去除率 $>95\%$)技术成熟,离子交换(强碱性树脂吸附率 $>98\%$)及蒸发浓缩(热泵蒸发净化系数 $>1\times 10^5$)适用于不同场景,但面临膜污染、高能耗等挑战。地浸采铀生产过程中产生的放射性废水,排入蒸发池进行自然蒸发,以降低废水处理成本。通过风能辅助强制蒸发技术增加废水与空气的接触面积可实现立体蒸发效果。在自然蒸发条件较差的地区或季节,采用机械蒸汽再压缩(MVR-Mechanical Vapor Recompression),利用蒸发系统自身产生的二次蒸汽及其能量,将低品位蒸汽经压缩机的机械做功提升为高品位蒸汽,同时产生的冷凝水可达标排放或回用,减容率达95%^[24]。生物法通过微生物还原[U(VI)被还原为U(IV)]和植物修复(如黑小麦+柠檬酸螯合)实现绿色治理^[25],但修复周期长。

2.4 辐射防护设计

自20世纪90年代以来,先进铀采冶技术在铀矿冶系统广泛应用,虽提升了经济效益,但也带来了新的辐射防护挑战。然而,相关辐射防护技

术研究未能同步跟进,亟待加强。人员防护手段主要通过防护服、面具、呼吸防护装具等穿戴式装备进行防护。如针对高 γ 辐射剂量场所采取的个体防护措施中,通过“三层布”(外层普通面料/中层防水透气层/内层防护层)结构设计可实现多功能防护层组合,采用空心球状核纤维材料将中子吸收剂包裹于特殊纤维结构中,能使新型防护服密度降低至 0.72 g/cm^3 (较传统材料减少68%)^[26],在 10 Gy 辐射剂量下屏蔽效能达 215.3 Sv/h 。研究还发现通过调控纤维缺陷分布可改善其力学性能,其动态拉伸强度随加载速率提升而增强,在 10 mm/s 速率下弹性模量达到峰值;防电磁屏蔽性能随频率升高呈下降趋势,但整体效果显著。这些创新使防护服兼具轻量化(较传统铅服减重50%)、耐辐照(损伤深度降低50%)和穿着舒适性提升等特点。而针对铀矿冶的辐射防护设计研究仍较少,如氡及铀矿尘的防护等。

3 铀矿辐射防护研究存在的问题

3.1 防护模式局限

维持维护期的硬岩铀矿山辐射环境影响减少,但回风井、工业场地、尾矿(渣)库等设施仍多露天释放氡气,放射性源项仍会持续向环境释放,未降低至辐射影响最小化水平^[27]。

3.2 健康风险评估方法局限

基于流行病学统计的矿工肺癌相对危险度估算存在个体差异,难以指导个性化防护。已报道的风险评估研究中,暴露途径考虑不全面,仅考虑经口摄入和呼吸两种方式,未纳入皮肤接触或土壤-食物链迁移等潜在暴露渠道,可能导致风险评估不全面^[28];模型参数(如儿童/成人的日均摄入量、暴露频率等)可能基于标准化假设,未结合本地人群行为特征校准,存在参数偏差风险;未评估放射性核素长期衰变(如 ^{226}Ra)及土壤垂向迁移对风险的动态影响,缺乏时间维度的风险演化分析;管理体系中,部分尾矿库尚未建立数字化监测平台,数据孤岛现象制约协同治理。

3.3 辐射环境监测网络局限

现有的监测技术仍无法满足对铀矿辐射环境与个人剂量的高效、准确和实时监测需求^[29-31]。同时现有氡迁移模型未考虑温湿度动态耦合效应。此外,监测数据的处理和分析能力也相对较

弱,难以对辐射环境变化进行及时、准确的预测。

3.4 辐射防护材料和设备局限

中国在辐射防护材料和设备方面的研究主要是缺少对高氡释放源项的控制与处理设备的研发,及时准确氡致内照射个人剂量监测设备的研发等。这导致了我国铀矿冶辐射防护技术的整体水平相对较低,难以满足铀矿辐射防护的需求。辐射防护技术的发展日新月异,未来辐射防护技术要在新材料、新技术、新方法和新设备等方面取得更多突破,为辐射防护工作提供更加科学、有效和人性化的技术支持。

4 未来发展趋势与建议

面向“十四五”核能发展规划,铀矿冶辐射防护需聚焦三大方向。一是构建5G+AI的智能安全管控平台,研发智能化监测设备与控制设备,实现辐射参数的实时感知与自主决策调控,如通过多物理场耦合建模技术的突破提升防护设计的科学性;基于COMSOL平台构建氡渗流-扩散耦合模型,综合考虑岩体裂隙与大气湍流的影响;智能监测网络的构建体现信息化转型,通过遗传算法驱动的动态调度系统优化作业路径,降低人员受照剂量。二是发展多学科融合的氡迁移模型,集成大气动力学与放射化学的最新成果,精准预测工作场所和环境中的辐射水平。三是完善标准体系,制定地浸矿山相关专项标准^[32-33]。通过“一带一路”倡议输出中国在尾矿治理与监测等领域的技术规范,提升全球铀资源开发的安全阈值。通过加强防护意识、研发防护装备、优化防护网络等手段,建立铀矿冶辐射防护的坚实壁垒。

5 结语

历经六十余年发展,我国铀矿冶辐射防护已从单一工程措施迈向系统化、智能化防护体系。辐射剂量监测和辐射剂量防护对于铀矿辐射防护研究具有重要意义。通风技术的迭代创新、监测网络的全面覆盖与废物治理的生态转型,共同构筑起铀资源开发的安全屏障。

未来需重点突破氡迁移精准预测、健康效应追踪评估等科学难题,推动防护技术从“风险控制”向“风险预防”跨越。通过多学科协同创新与国际化标准建设,引领全球铀矿冶辐射防护技术的革新浪潮,为核能可持续发展贡献中国智慧。

参考文献:

- [1] 初旭阳,胡鹏华,杨明理,等.北方某露天铀伴生矿辐射防护实践和剂量估算[J].铀矿冶,2023,42(1):73-79.
CHU Xuyang, HU Penghua, YANG Mingli, et al. Radiation protection and dose estimation of an open-pit uranium associated mine in north China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(1): 73-79 (in Chinese).
- [2] 叶勇军,丁德馨,李向阳,等.用地积累指数法对铀矿排风井周边土壤辐射污染的安全评价[J].铀矿冶,2008,27(3):138-141.
YE Yongjun, DING Dexin, LI Xiangyang, et al. Application of the index of geo-accumulation in safety assessment of radioactive pollution in soil near uranium mine exhaust outlet[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2008, 27(3): 138-141 (in Chinese).
- [3] 刘晓超,曹凤波,徐乐昌,等.中国铀矿冶放射性废物管理战略研究[J].铀矿冶,2024,43(4):72-75.
LIU Xiaochao, CAO Fengbo, XU Lechang, et al. Strategy research on radioactive waste management of uranium mining & metallurgy in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4): 72-75 (in Chinese).
- [4] 生态环境部,国家市场监督管理总局.铀矿冶放射性废物辐射环境管理技术规定:GB 14585—2024[S].北京:生态环境部,2024.
- [5] 丁叶.地浸采铀技术标准体系构建研究[J].铀矿冶,2023,42(2):52-58.
DING Ye. Construction of technical standard system for in-situ leaching uranium mining [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(2): 52-58 (in Chinese).
- [6] 王亚兰,徐乐昌,张辉,等.某酸法地浸铀矿山氡释放特征研究[J].铀矿冶,2024,43(3):93-99.
WANG Yalan, XU Lechang, ZHANG Hui, et al. Investigation on radon release characteristics of an acid in-situ leaching uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3): 93-99 (in Chinese).
- [7] 王亚兰,徐乐昌,戴相南,等.某地浸铀矿山辐射环境水平调查研究[J].铀矿冶,2025,44(3):123-130.
WANG Yalan, XU Lechang, DAI Xiangnan, et al. Investigation of radiation environment level in an in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(3): 123-130 (in Chinese).
- [8] 刘晓超,杜娟.伴生放射性矿山辐射安全管理现状与对策[J].铀矿冶,2013,32(2):104-108.
LIU Xiaochao, DU Juan. The status of radioactive associated mine's radiation safety management and countermeasures[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(2): 104-108 (in Chinese).
- [9] 李先杰,邓文辉,薛建新,等.关于我国铀矿冶个人剂量约束值的讨论[J].辐射防护,2008(1):13-17.
LI Xianjie, DENG Wenhui, XUE Jianxin, et al. Discussion about individual dose constraint value at uranium mine and mill in China[J]. Radiation Protection, 2008(1): 13-17 (in Chinese).
- [10] ZHANG H, GAO J, BAI Y L, et al. Delimiting radiation protection distance of underground uranium mining and metallurgy facilities: A case study in China[J]. Heliyon, 2022, 8(12).
- [11] 张辉,牛洁,邓君,等.某 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀场抽液钻孔氡浓度与释放量的估算[J].同位素,2023,36(3):320-328.
ZHANG Hui, NIU Jie, DENG Jun, et al. Estimating the discharge amount of radon from production wells of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ uranium mine[J]. Journal of Isotopes, 2023, 36(3): 320-328 (in Chinese).
- [12] 赵浩舟,王卫红,王哲,等.小尺度下某铀尾矿库周边土壤铀污染与空间自相关性研究[J].原子能科学技术,2018,52(9):1704-1709.
ZHAO Haozhou, WANG Weihong, WANG Zhe, et al. Study on uranium pollution and spatial autocorrelation of soil around uranium tailing bank on small scale[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(9): 1704-1709 (in Chinese).
- [13] 洪加标.某铀尾矿库周边环境土壤和地表水放射性水平测量与健康风险评估[D].抚州:东华理工大学,2017.
- [14] 王治海.伴生放射性矿开发利用的辐射环境监测管理及防护策略[J/OL].中国辐射卫生,1-10[2025-05-14].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1206.R.20250307.1245.002.html>.
WANG Zhihai. Radiation environment monitoring, management and protection strategies for the development and utilization of associated radioactive ores [J/OL]. Chinese Journal of Radiological Health, 1-10 [2025-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1206.R.20250307.1245.002.html> (in Chinese).
- [15] 李先杰,张哲,胡鹏华,等.铀矿井降氡优势通风方式研究[J].辐射防护,2024,44(1):80-84.

- LI Xianjie, ZHANG Zhe, HU Penghua, et al. Study on the dominant ventilation method for radon reduction in uranium mine[J]. Radiation Protection, 2024, 44(1): 80-84(in Chinese).
- [16] 李先杰, 张哲, 胡鹏华, 等. 我国铀矿通风降氡的发展历程[J]. 辐射防护, 2021, 41(1): 9-16.
- LI Xianjie, ZHANG Zhe, HU Penghua, et al. The development history of uranium mine ventilation in China[J]. Radiation Protection, 2021, 41(1): 9-16(in Chinese).
- [17] 刘再道, 曾令国, 谭建华, 等. 氡渗流控氡技术在某铀矿井通风中的应用[J]. 铀矿冶, 2012, 31(3): 152-157.
- LIU Zaidao, ZENG Lingguo, TAN Jianhua, et al. Application of radon permeation controlling technique to a uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2012, 31(3): 152-157(in Chinese).
- [18] 胡龙飞, 招国栋, 胡鹏华, 等. 我国铀矿井通风降氡的现状、问题及对策[J]. 铀矿冶, 2018, 37(1): 55-58.
- HU Longfei, ZHAO Guodong, HU Penghua, et al. Present situation, problems and countermeasures of radon reduction in uranium mine well in China[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2018, 37(1): 55-58(in Chinese).
- [19] 叶勇军, 尚善伟, 周宁, 等. 放射性矿山氡及氡子体浓度特征的氡暴露有效剂量估算[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3133-3137.
- YE Yongjun, SHANG Shanwei, ZHOU Ning, et al. Estimation of effective dose from radon exposure based on radon and progeny concentration characteristics in radioactive mines[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(8): 3133-3137(in Chinese).
- [20] 李先杰, 赵永山, 邓文辉, 等. 俄罗斯近阿尔贡矿山化工联合体铀矿井通风防护简介[J]. 铀矿冶, 2006(3): 163-165.
- LI Xianjie, ZHAO Yongshan, DENG Wenhui, et al. Introduction to ventilation and protection in underground uranium mine of Russia Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006(3): 163-165(in Chinese).
- [21] 吴桂惠, 周星火. 铀矿冶尾矿、废石堆放场地的辐射防护[J]. 辐射防护通讯, 2001(6): 33-36.
- WU Guihui, ZHOU Xinghuo. Radiation protection for tailings and waste rock pile site in uranium mine and mill[J]. Radiation Protection Bulletin, 2001(6): 33-36(in Chinese).
- [22] 李娜娜. 某铀矿山废石堆多层覆土治理效果实验研究[J]. 世界核地质科学, 2023, 40(4): 1044-1055.
- LI Nana. Experimental study on treatment effect of a uranium minewaste rock piles by covering multi-layer soils[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(4): 1044-1055(in Chinese).
- [23] 郭栋清, 李静, 张利波, 等. 核工业含铀废水处理技术进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(1): 14-20.
- GUO Dongqing, LI Jing, ZHANG Libo, et al. Progress in the treatment technology of uranium-bearing wastewater in nuclear industry[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(1): 14-20(in Chinese).
- [24] 王占龙, 杜娟, 李利, 等. MVR 处理中性地浸采铀矿山蒸发池废水技术研究[J]. 铀矿冶, 2023, 42(2): 89-96.
- WANG Zhanlong, DU Juan, LI Li, et al. Study on MVR technology for treating evaporation pond wastewater from neutral in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(2): 89-96(in Chinese).
- [25] 孟华, 刘涛涛. 地浸采铀技术及水污染治理[J]. 绿色科技, 2016(8): 33-35.
- MENG Hua, LIU Taotao. The in-situ leaching uranium technology and the treatment of water pollution problem[J]. Journal of Green Science and Technology, 2016(8): 33-35(in Chinese).
- [26] 陶武彪, 杨奋理. 核辐射防护服材料与设计的研 究 与 创 新 [J]. 化 纤 与 纺 织 技 术, 2024, 53(2): 134-136.
- TAO Wubiao, YANG Fenli. Research and innovation on materials and design of nuclear radiation protective clothing[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2024, 53(2): 134-136(in Chinese).
- [27] 梁家玮, 刘晓超, 孙娟, 等. 硬岩铀矿山维持维护期间的 环 境 管 理 [J]. 铀 矿 冶, 2024, 43(4): 106-111.
- LIANG Jiawei, LIU Xiaochao, SUN Juan, et al. Environmental management during the maintenance period of hard rock uranium mines[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4): 106-111(in Chinese).
- [28] 李冠超, 蒋文波, 钟丽艳, 等. 某钽铌厂及周边土壤放射性水平调查与健康风险评估[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(12): 112-119.
- LI Guanchao, JIANG Wenbo, ZHONG Liyan, et

- al. Investigation and health risk assessment of soil radioactivity level in tantalum-niobium plant and its surroundings [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(12):112-119(in Chinese).
- [29] 石军,刘佳波.辐射环境监测在辐射环境影响评价中的应用研究[J]. *环境与生活*, 2024(6):85-87.
SHI Jun, LIU Jiabo. Research on the application of radiation environment monitoring in radiation environment impact assessment [J]. *Environment and Life*, 2024(6):85-87(in Chinese).
- [30] 肖云鹏,朱奇健,林珂.核辐射环境监测与辐射防护方法研究[J]. *中国高新科技*, 2024(8):154-156.
XIAO Yunpeng, ZHU Qijian, LIN Ke. Research on nuclear radiation environment monitoring and radiation protection methods[J]. *China High and New Technology*, 2024(8):154-156(in Chinese).
- [31] 张红涛,汤冠军,孔亮,等.我国关停铀矿冶设施辐射环境监测状况及对策探讨[J]. *核安全*, 2022, 21(5):28-32.
- ZHANG Hongtao, TANG Guanjun, KONG Liang, et al. Analysis and discussion on radiation environmental monitoring situation of the shut-down uranium mining and milling[J]. *Nuclear Safety*, 2022, 21(5):28-32(in Chinese).
- [32] 连国玺,宋立权,谢占军.铀矿冶辐射防护标准体系研究[J]. *铀矿冶*, 2011, 30(2):82-88.
LIAN Guoxi, SONG Liquan, XIE Zhanjun. Research of radiation protection standard system in uranium mining and metallurgy[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2011, 30(2):82-88(in Chinese).
- [33] 于志翔,廉冰,王彦,等.关于我国核环境标准体系建设分析与研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2023, 43(2):418-433.
YU Zhixiang, LIAN Bing, WANG Yan, et al. Analysis and research on the construction of our country's nuclear environmental standard system[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2023, 43(2):418-433(in Chinese).

Research Progress on Radiation Protection of Uranium Mining and Metallurgy in China

TANG Yuchen¹, TIAN Ye², JIANG Guoping²

(1. North China Electric Power University, Beijing 100006, China;

2. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: As the primary industry in the nuclear fuel cycle, uranium mining and metallurgy plays a critical role in ensuring nuclear energy safety, making research on its radiation protection technologies highly significant. This paper systematically reviews the current status and progress in radiation protection technologies for uranium mining and metallurgy in China, while analyzing existing challenges and future development directions. The radiation risks in China's uranium mining and metallurgy industry are characterized by multi-source complexity and intertwined pathways, primarily stemming from internal exposure to radon and its progeny as well as external exposure to gamma radiation. In recent years, China has made progress in digital monitoring technologies, optimized protection designs, and innovative waste management solutions. However, the challenges remain, including limitations in radon ventilation protection technology, incomplete health risk assessment methods, insufficient coverage of monitoring networks, and inadequate performance of protective materials and equipment. Moving forward, China's uranium mining and metallurgy radiation protection efforts should focus on building an intelligent safety management platform, developing interdisciplinary radon migration models, and refining standard systems. By strengthening protection awareness, optimizing technologies and monitoring networks, the industry can achieve a transition from "risk control" to "risk prevention," providing global uranium resource development with safety technology support and contributing to the sustainable development of nuclear energy.

Key words: uranium mining and metallurgy; radiation protection; radon control; waste management; occupational health