铀尾矿库滩面覆盖技术国内外现状

袁山琳[1],邓芝汶[1],谭文发[1,2],吕俊文[1,2]

(1.南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;
2.南华大学 土壤污染控制与修复重点实验室,湖南 衡阳 421001)

摘要:随着铀矿开采和冶炼工业的发展,铀尾矿库的数量不断增加。铀尾矿库对周边环境具有潜在危害,其退役治理迫在眉睫。铀尾矿库滩面覆盖是目前公认的有效方法之一,也是大多数实际退役工程采用的主要技术。笔者分析了铀矿库滩面覆盖技术的国内外现状,对铀尾矿库退役治理中的常用材料、技术措施及治理成效进行了阐述,旨在为铀尾矿库滩面覆盖工程提供技术参考。

关键词:铀尾矿库;覆盖层;氡析出率;退役治理

中图分类号:TD868;X591 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)04-0024-08

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2023.05.06

中国已发现的 200 余个铀矿床,矿石品位主要为 0.05%～0.3%。随着部分铀矿山和水冶厂退役,亟需治理的铀尾矿库的数量不断增加。因铀尾矿库对周边环境及动植物可能产生一定的危害,使得铀尾矿库退役治理成为必然[1]。

黄建兵通过在尾矿库表面覆盖黄土,有效降低了氡析出水平[2]。王锦等研究了红壤覆盖层性状对铀尾矿库滩面氡析出的影响,结果表明增加红壤覆盖层厚度和压实度,可降低氡扩散系数,从而降低铀尾矿库滩面的氡析出率[3]。谭凯旋等研究了不同覆盖材料及其覆盖厚度的降氡效果,建立了不同覆盖材料的覆盖厚度计算经验公式[4]。李向阳等研究了禾本植物对铀尾矿库滩面覆盖氡析出的影响,结果表明用腐殖土改良覆土后种植禾本植物,氡析出率明显降低[5]。李军达等研究了滩面多层覆盖低频振动前后的氡析出规律,结果表明在单向振动 4 个频率条件及叠加振动 4 个频率条件下,随着频率递增,模型表层裂隙增大[6]。

国外学者对铀尾矿库氡析出的影响因素及氡析出机制进行了研究,得出覆盖层厚度、覆盖材料压实度和含水率等均会影响氡析出[7-8]。Fernandes 等人通过剂量估计法评估了铀尾矿库在不采取任何修复措施下对环境的潜在影响,并得出尾矿中残余的黄铁矿氧化是金属和放射性核素向地下水中转移的关键因素[9]。Saidov 等人根据性能要求和特定地点条件(位于干旱、半干旱或潮湿地区),利用计算机模拟,设计出一种最具成本效益的覆盖系统,可提供长期(100 年)的保护[10]。

目前,关于铀尾矿库滩面覆盖技术国内外现状的梳理和比较鲜见报道。鉴于此,笔者综述了国内外铀尾矿库覆盖技术,比较了国内外铀尾矿库退役治理中的常用材料、技术措施与治理成效,以期为中国铀尾矿库滩面覆盖治理措施的制定提供参考。

1 中国铀尾矿库滩面覆盖技术

1.1 新疆某铀尾矿库

新疆某铀矿建于 1959 年,停产关闭于 1979 年,位于准噶尔盆地西侧、塔额盆地南缘,滩面面积约为 2.75 万 m^2,在滩面覆盖治理前,氡析出率为

收稿日期:2023-05-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(12075113);湖南省自然科学面上基金(2022JJ30480);湖南省教育厅科学研究重点项目(20A428)。

第一作者简介:袁山琳(1998—),女,湖北宜昌人,南华大学在读硕士,主要研究方向为放射性污染治理与技术。

通信作者简介:谭文发(1985—),男,湖南株洲人,博士,教授,主要研究方向为放射性污染治理与技术。

7.10 Bq/(m² · s)，超过限值 0.74 Bq/(m² · s)[11]。该尾矿库采取的治理方案：将尾矿渣平整压实后，先铺设 1 层 1.35 m 厚的压实黏土，在压实黏土时采用分层碾压方式；再铺设 1 层10 cm厚的细卵石作为过渡层；然后再在过滤层上铺设 40 cm 的碎石，防止生物及其他自然因素的侵蚀。该尾矿库退役治理工作于 2007 年竣工，根据监测结果，覆盖治理后氡析出率降至 0.15 Bq/(m² · s)。

1.2　辽宁某铀尾矿库

辽宁西部某铀尾矿库占地面积约 9.5 hm²，共堆存尾矿渣 44 万 t。该尾矿库治理方案：滩面覆土 1.1 m 并植被。经过退役治理后，尾矿库表面氡析出率降至 0.051 Bq/(m² · s)，满足氡析出率均值不超过 0.74 Bq/(m² · s)要求；γ 辐射剂量率均值降至 1.0×10^{-7} Gy/h，满足扣除本底后不超过 1.6×10^{-7} Gy/h 要求。从环境监测结果可知，滩面覆盖效果良好，植被生长茂密并形成了可自然更替的原生态草灌植物群落。

为了使退役尾矿库的状况与所处社会环境的发展变迁相协调，设想将该库区改建为绿色生态公园，将滩面覆盖由原来的单层黏土覆盖结构改造为复合覆盖层结构。复合覆盖层结构自上而下分别为：1)175 cm 厚的植被利用层(黏土、粉质黏土)；2)30 cm 厚的防生物侵扰阻隔层(鹅卵石)；3)30 cm 厚的导水层(级配碎石)；4)51.2 cm 厚的复合防渗层(HDPE 土工膜一布一膜，上覆钠基膨润土，下垫黏土)；5)50 cm 厚的底基层(级配碎石)；6)110 cm 厚的防氡屏蔽层(现有覆盖层)。预计经过此次改造，表面氡析出率降至8.13×10^{-3} Bq/(m² · s)以下[12]。

辽宁另一铀尾矿库滩面采用由黏土层(防氡层)、土壤层、土壤生长层、植被保护层组成的 4 层覆盖方式。将滩面铺平并覆盖 1.1 m 厚黏土，夯实。为避免治理后的滩面蓄水，滩面标高与溢洪道底坎标高保持一致，在滩面上开挖引水渠，挖出的尾矿砂按设计坡度填在堆积坝前的沉积滩面上。在覆土表面进行植被，防止水土流失。根据治理监测结果，尾矿库滩面氡析出率为 5.78×10^{-4}～1.10×10^{-2} Bq/(m² · s)，γ 空气吸收剂量率为 60～113 nGy/h[13]。

1.3　江西铀尾矿库

江西某铀矿库有大小 2 个尾矿库，大尾矿库与小尾矿库相连，大尾矿库主坝高差约 40 m，小尾矿库副坝高差约 30 m，尾矿库总库容为 2.7×10^{6} t。大尾矿库的退役治理方式是覆土治理，并修筑坝体和防洪设施，覆土后在土层上植被；小尾矿库的退役治理工程是采用覆土与水覆盖相结合的方式。退役治理后，大尾矿库氡析出率均值为 0.43 Bq/(m² · s)，小尾矿库的 γ 空气吸收剂量率均值为 45.6 nGy/h，均已达标[14]。大小尾矿库滩面覆盖工程于 2009 年 6 月竣工，退役治理后对尾矿库坝体和滩面进行了植草绿化，最终氡析出率为 0.052～1.260 Bq/(m² · s)，有部分点位超标，需进行进一步的跟踪处理；γ 辐射剂量率为 48～510 nGy/h，所有点位均达标[15]。

1.4　贵州某铀尾矿库

贵州某铀矿矿区面积达 1.17 km²，中心矿段面积为 0.33 km²。针对贵州降雨量大的气侯特征，该尾矿库采用了覆土植被的治理方式，利用植被绿化保护覆土设施的稳定性。根据监测结果，尾渣治理覆土前氡析出率为 3.32 Bq/(m² · s)，γ 空气吸收剂量率为 127.9×10^{-8} Gy/h；覆土后氡析出率为 0.47 Bq/(m² · s)，γ 空气吸收剂量率为 24.1×10^{-8} Gy/h，分别降低了85.8%和 81.2%；覆土植被后氡析出率为0.36 Bq/(m² · s)，γ 空气吸收剂量率为 18.0×10^{-8} Gy/h，分别降低了 89.2%和 85.9%[16]。

1.5　湖南衡阳某铀尾矿库

湖南衡阳某铀尾矿库于 20 世纪 60 年代投入使用，是由 9 个坝段与 3 个山丘围栏而成的“平地型”大型铀尾矿库。库区内堆积了 1.882×10^{7} t 铀尾矿，滩面面积达 1.47 km²，平均 γ 辐射剂量率为 256×10^{-8} Gy/h。该铀尾矿库正在进行退役治理，现阶段滩面部分覆土，表面平均氡析出率约为 6.89 Bq/(m² · s)[17]，渗出水排至专门的收集池后抽出回灌。

2　国外铀尾矿库滩面覆盖技术

2.1　澳大利亚 Rum Jungle 铀尾矿库

澳大利亚采矿业发达，在矿山管理和环境治理方面拥有先进的经验和技术，处于国际领先水平。Rum Jungle 尾矿库于 1971 年关闭，遗留了 3 个尾矿库，总计1 000 万 t废渣。1983 年开始的修复工程主要是覆盖尾矿库，在尾矿下铺设排水管道以避免暴雨冲刷，并改变流经矿区的地表水流向[18]；然后在尾矿表面覆盖 1 层黏土和 1 层土

层，最后进行绿化。澳大利亚重视地貌植被的恢复，通常以种植树木为主[19]。

Rum Jungle 尾矿库对 50～100 m 的深坑采用水覆盖。当废堆与地下水无水力联系时，将铀尾矿放在露天矿坑底部或湖泊中，清除周围边坡废石，并铺一层厚的细沙；然后上层用天然水覆盖，形成社区健身、休闲娱乐场所和生态公园。但水覆盖技术易造成水体污染，在使用此方法前一定要确保覆盖水体不会和环境中的其他动植物进行物质交换[20]。

位于澳大利亚东部半干旱地区的镭山铀矿床，在修复 20 年后，放射性元素向周边环境扩散；为减少对周围土壤和沉积物的侵蚀和影响，需对尾矿库进行进一步的封顶和地形设计[21]。澳大利亚还有一种先进的联合处置治理技术，该技术是将粗粒矿石、细粒废石和惰性尾矿混合，使其形成惰性废石，最后排放形成较硬的滩面。滩面可供通行，并可形成稳定的外周界隔离墙[22]。

2.2 加拿大铀尾矿库

加拿大通常采用尾矿固化和地表植被覆盖法治理铀尾矿库。此法可有效防止浅层地下水的污染和降低放射性废物对人体的危害，防氡效果较好；但固化面积较大，影响地表的生态恢复[23]。

固化工艺有 Krofchak 工艺和 AECL 沥青化工艺。Krofchak 工艺是在铀尾矿中添加酸性或碱性添加剂，形成“惰性固体材料”，从而达到防污染效果；AECL 沥青化工艺是将干尾矿在双螺杆挤出机中与沥青在 125 ℃条件下混合，然后排放固化；还可将粉煤灰、石灰材料与含硅废物混合，形成类似于硅酸盐水泥的地质聚合物[24]。这类铀尾矿滩面覆盖技术存在成本高、覆盖材料可持续性差等问题，需要不断改进和优化来提高技术的应用效果。

地表植被覆盖层是利用石灰和超磷肥与种子混合，然后进行播种和维持施肥，促进土壤发育和植物生长。植物品种通常选取牧草，也常种植芦苇、金丝草、紫花苜蓿和红顶等植被[25]。

2.3 日本 Ningyo-toge 铀尾矿库

位于冈山县和鸟取县边界附近的 Ningyo-toge 尾矿库，利用不同性质的天然材料构建了多重覆土结构。最下层设置坡度为 5% 的调整层，使地表的雨水通过排水层排出铀尾矿库，从而减少雨水渗入量。在坡度调整层上设置膨润土混合层作为侧方排水所必需的难透水性层，通过破碎混合装置将土壤和膨润土混合，膨润土混合层最大粒径为 9.5 mm。在膨润土混合层上设置保护层，保护层包括下部过滤层、排水层、上部过滤层和植被层，其中：下部过滤层为 20 cm 厚的土壤层，主要是为了防止膨胀的膨润土混合土流出及排水层堵塞；排水层厚 30 cm，可将雨水从侧面排出，需采用至少百年一遇的最大降水量；上部过滤层由 20 cm 厚的砂组成，是为了防止上层渗透泥水造成排水层堵塞；植被层设置在覆土的最上层，通常厚 30 cm，以防止植被侵蚀覆土表面(图 1)。

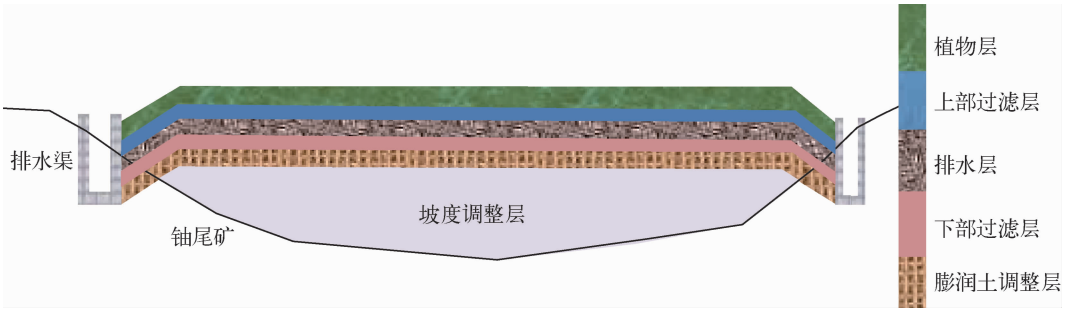


图 1 Ningyo-toge 铀尾矿库滩面覆盖图

Fig. 1 Covering layer of Ningyo-toge uranium tailings pond

通过对沉降率、地下温度、渗透雨水排水量和氡析出率等指标的监测，检测滩面覆盖效果，每隔 10 年左右对覆盖工程开展全面调查，并进行维护管理，主要包括观察堤坝的裂缝、采集钻孔芯、测量抗压强度和密度等。另外，对来自地表的风力侵蚀、水力侵蚀和冻融侵蚀进行分析，并对覆盖层干燥收缩、因坡度降低引起的排水功能障碍、动物的覆土翻挖，以及植物生长引起的根侵入等采取

对策[26]。

2.4　德国 Helmsdof 铀尾矿库

德国 Helmsdof 铀尾矿库位于萨克森州 Zwickau 市以南约 20 km 处，是位于丘陵区的尾矿库。该铀尾矿同时采用滩面土壤覆盖和滩面水下覆盖技术。其中滩面土壤覆盖技术分别采用厚约 1 m 的黏土和采矿废石覆盖。由于库内长期积水，即使采用抽水方法使滩面出露表面变干，孔隙水也很难排出，所以先在滩面上铺 1 层土工布，然后在其上铺 1 层土工格栅，最后再铺 1 层土工布。用专用机械向深处尾矿层内插入竖向塑料排水带，快速排水以减少覆盖后的沉降度。由于库区内水量较大，为加速工程进度，在库的滩面最低处（即水深最深处）进行“水下覆盖”，即滩面水下覆盖技术，现场工作人员在浮船上用专用管路将覆盖材料送往水下，用专用的检测系统控制覆盖的位置和覆盖厚度[27]。

2.5　印度 Jaduguda 铀尾矿库

Jaduguda 尾矿库位于辛格邦地区（恰肯德邦），尾矿量每年达 30 万吨，尾矿浆通过管道排放到尾矿池中[28]。为了避免尾矿池中的氡气溢出导致附近生物受到危害，采用物理-生物覆盖方式进行处理，先在尾矿库上覆盖 30 cm 厚的土壤层，然后在土壤覆盖层播种植物种子用于吸收放射性核素。

对不同植物的不同部位吸收放射性核素的研究表明，铀主要富集在根和芽中，甜根子草根中的铀比活度达 30.95 Bq/kg，棉叶珊瑚花的芽中铀比活度达 9.36 Bq/kg[29]。利用植物吸收放射性核素可从源头上处理污染物，但随着植物凋落物的分解和移动，可能产生二次污染；特别是由于凋落物移动，可能会污染场外环境。所以在同时采用滩面覆盖和植物修复技术时，需对植被及时清理和种植。

2.6　其他国家的铀尾矿库滩面覆盖技术

美国使用黏土覆盖和沥青乳胶覆盖技术处理铀尾矿库，采用了不同材料进行覆盖（表 1），沥青乳胶覆盖效果好，但不同覆盖层类型的覆盖效果相差较大；在黏土覆盖方式下，不同覆盖层类型的覆盖效果差别较小，降氡效率均达 85%以上。为了防止植物根部和动物对覆盖层的破坏作用，一般还须采用生物阻隔措施，选用直径 2.5～18.0 cm的砾石和卵石铺设 30 cm 厚的阻隔层，再铺设 0.3～0.6 m 厚的黏土[30]。

俄罗斯的退役铀尾矿滩面覆盖技术，一般需先覆盖 1.0 m 厚的土层，在其上再覆盖 0.2 m 厚的石块和 0.3 m 厚的生长层，总厚度达到 1.5 m，最后在上面植被。治理后的表面氡析出率为 6.5×10^{-4} Bq/(m^2 · s)[31]。因磷会和金属离子形成沉淀，从而将铀固定在地下，使铀不容易随环境迁移[32-33]，所以俄罗斯部分尾矿库还用磷肥废渣进行覆盖治理。

罗马尼亚阿拉德区的 Barzava 铀尾矿修复过程包括建造梯田，然后覆盖 1.5 m 厚的鹅卵石、黏土和未受污染的土壤，治理后 γ 射线吸收剂量和铀比活度分别降为 114 nSv/h 和 51 Bq/kg，均接近当地环境背景水平，且在周围的土壤、地表水、地下水中均没有发现任何放射性污染物[34]。

表 1　美国退役铀尾矿沥青乳胶、黏土材料覆盖效果

Table 1　Covering effect of asphalt latex and clay material for uranium tailings pond in United States

覆盖方式	覆盖层类型	平均氡析出率/[Bq/(m^2 · s)]		降氡效率/%
		密封前	密封后	
沥青乳胶覆盖	沥青乳胶密封	10.8	1.98	75.5
	沥青乳胶填料混合密封	16.4	0.04	99.9
	热硫化沥青喷洒密封	16.4	0.24	99.3
黏土覆盖	1.8 m 灰质黏土/1.2 m 页岩	24.2	0.07	99.8
	1.8 m 灰质黏土/1.2 m 膨润土	22.8	0.53	97.6
	1.8 m 灰质黏土/1.2 m 压密灰质黏土	14.8	0.24	98.3
	3.0 m 灰质黏土	8.36	0.98	88.2

3 国内外覆盖技术比较

国内外覆盖技术基本采用多层覆盖，但因覆盖材料、材料覆盖厚度等存在差异，导致治理后的覆盖效果不同(表 2)。中国目前地浸采铀主要以酸法和“CO_2+O_2”浸出为主[35]，覆盖技术主要采用黏土作为防氡层，以级配碎石、鹅卵石作为排水层和阻隔层，以土工布作为防渗层。而美国大多数矿体中的碳酸钙浓度大于 1.5%，一般使用碱法浸出[36]，美国通常以黏土等覆盖为主，部分采用沥青乳胶覆盖防止氡析出。国内外采用的浸出方法不同，在覆盖技术上也存在差异。

由于各国执行的标准和地质环境条件不同，采用的防氡层也存在差异。中国选择在植被保护层上种植草；澳大利亚、美国等更重视地貌植被的恢复，从而选择种树，并采用水保护层；加拿大等采用地质聚合物层，如粉煤灰、石灰、硅酸盐等，防止氡析出。

表 2 各国覆盖技术的覆盖层材料厚度、特点及成效

Table 2 Covering material thickness, characteristics and effectiveness of covering technology in different countries

国家	覆盖技术	覆盖层(自下而上)			特点	成效
		名称	材料	厚度/cm		
澳大利亚	土覆盖	排水层	管道		降低氡析出率的同时减少了雨水渗入	氡析出率大大降低
		防氡防渗透层	黏土	25		
		土壤层	土壤	25		
		土壤生长层	土壤	15		
		植被保护层	树	10		
	水覆盖	防氡层	黏土		覆盖水体与环境中其他动植物不进行物质交换	不需要大量的回填材料，既控制了废墟的氡析出，又取得了较好的经济和社会效益
		水保护层	天然水	100		
加拿大	固化和地表植被覆盖	地质聚合物层	粉煤灰、石灰、硅酸盐		成本高、覆盖材料的可持续性差，需要进一步改进和优化	防氡效果好，固化面积较大，会影响地表生态环境
		土壤生长层	土壤	50		
		植被保护层	牧草和豆荚			
日本	多层覆盖	坡度调整层	水泥、土壤		使地表的雨水通过排水层排向场外	防氡效果较好，地基不稳固时需要进行地基改良
		膨润土混合层	膨润土、土壤	25～50	防侧方排水进入尾矿区，保护膨润土混合层，防止其产生裂纹导致防渗性能和氡析出抑制性能降低	
		下部过滤层	土壤	20		
		排水层		30		
		上部过滤层	砂	20		
		土壤生长层	土壤	30		
		植被保护层	结缕草			
德国	多层覆盖	排水层	土工布 土工格栅 土工布		排水及防止树根植入和风雨侵蚀	表面氡析出率降至 0.1 Bq/(m²·s)
		黏土植物保护层	黏土、采矿废石	100		

表 2(续)

Table 2(continued)

国家	覆盖技术	覆盖层(自下而上)			特点	成效
		名称	材料	厚度/cm		
印度	物理-生物覆盖	防氡层	土壤	30	用植物从源头上减少氡的析出,降低成本和维护难度	铀主要富集在根和芽中,时间越长,植物吸收的越多
		植被保护层	甜根子草、白茅草、紫叶鸭拓草、羽萼木、鳄嘴花、万年麻或棉叶珊瑚花			
美国	土覆盖	防氡层	黏土	30	采用复合材料可以减少氡析出率	平均氡析出率降至 0.068 Bq/(m²·s)
		排水层	砾石	15		
		阻隔层	砾石和卵石	30		
		生长层	植物	90		
		岩石层	砾石	30		
	沥青乳胶覆盖	防氡层	沥青、乳胶			平均氡析出率降至 0.04 Bq/(m²·s)
俄罗斯	多层覆盖	防氡层	土壤	100	总厚度达 1.5 m	氡析出率降至 6.5×10⁻⁴ Bq/(m²·s)
		阻隔层	石块	20		
		生长层	植被	30		
罗马尼亚	多层覆盖	防氡层	土壤	100	前期需建造梯田	周围的土壤、地表水、地下水中均没有发现放射性污染物
		排水层	鹅卵石	10		
		防水层	黏土	20		
		生长层	土壤、植物	20		
中国	多层覆盖	防氡屏蔽层	土壤	110	防渗	表面氡析出率降至 8.13×10⁻³ Bq/(m²·s)以下,γ 辐射剂量降至 1.3×10⁻⁷ Gy/h 以下
		底基层	级配碎石	50	导水	
		复合防渗层	黏土 HDPE 土工膜 纳基膨润土	51.2	防渗	
		排水层	级配碎石	30	导水	
		阻隔层	鹅卵石	30	导水	
		植被利用层	黏土、粉质黏土	175	防渗、防侵蚀	

4　建议

1)铀尾矿库覆盖需要耗费大量的材料,不同国家采用的覆盖材料不同,治理成效有待时间考证。国外采用的固化技术能很好地降低氡的析出,中国可将建筑垃圾与尾矿砂混合形成地质聚合物固化层,在降低氡析出的同时达到“以废治废”的目标。

2)覆盖技术与生物修复相结合的治理方法能够很好地还原生态形貌,但耗时长,可将植物生长层所需的黏土进行改良,以缩短植物生长周期。

3)中国应因地制宜,在吸取现有经验基础上,结合不同尾矿库周边环境的实际情况,提前制定修复治理规划,同时加强研究成本低、性能优、防氡效果好的材料,以期取得更大的社会环境效益。

参考文献:

[1]　贺龙,李艳琴,李彬春,等. 矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响[J]. 环境科学,2017,38(2):752-759.

[2] 黄建兵.某铀矿山废石场及尾砂库氡污染调查[J].环境监测管理与技术,2001(2):27-30.

[3] 王锦,刘永,章求才,等.红壤覆盖层性状对铀尾矿库滩面氡析出影响的试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(3):159-163.

[4] 谭凯旋,胡寒桥,刘泽华,等.不同覆盖物抑制铀尾矿氡析出的效果[J].矿物学报,2012,32(2):233-237.

[5] 李向阳,陈振兴,汪弘,等.禾本植物对覆土铀尾矿库滩面温度与氡析出的影响[J].有色金属(冶炼部分),2022(8):113-120.

[6] 李军达,李向阳,刘永,等.低频振动对铀尾矿库滩面多层覆盖层控氡效果影响的研究[J].工业安全与环保,2022,48(4):21-24.

[7] ONGORI J N, LINDSAY R, NEWMAN R T, et al. Determining the radon exhalation rate from a gold mine tailings dump by measuring the gamma radiation[J]. Journal of Environmental Radioactivity,2015,140:16-24.

[8] KOZLOWSKA B, MAZUR J, KOZAK K, et al. Investigation of the influence of chamber construction parameters on radon exhalation rate[J]. Nukleonika,2016,61(3):269-273.

[9] FERNANDES H M, FRANKLIN M R, VEIGA L H S, et al. Management of uranium mill tailing:geochemical processes and radiological risk assessment [J]. Journal of Environmental Radioactivity,1996,30(1):69-95.

[10] SAIDOV V, KESSEL D S, KIM C L. Conceptual design of a cover system for the degmay uranium tailings site[J]. Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology,2016,14(2):189-200.

[11] 李玉雷,张娟.某退役铀尾矿库滩面覆盖层稳固性分析[J].中国矿业,2014,23(S2):96-98.

[12] 吴冬,李岩,王剑,等.某退役铀尾矿库保护性开放利用方案研究[J].铀矿冶,2017,36(4):306-311.

[13] 杜月华,石敏,王明明,等.辽宁某铀尾矿库科学试验场综合研究[J].核安全,2016,15(4):22-26.

[14] 张乾,杨亚新,张卫民,等.退役铀尾矿库周边环境的放射性水平调查与分析[J].科学技术与工程,2020,20(10):4166-4171.

[15] 熊觐,万明.江西某铀矿退役治理情况及讨论[C]//中国环境科学学会核安全与辐射环境安全专业委员会,中国核学会辐射防护分会,中华医学会放射医学与防护学分会,等.第三次全国天然辐射照射与控制研讨会论文汇编.[出版者不详],2010:483-485.

[16] 封维华.铀矿山退役治理覆土的植被绿化[J].铀矿冶,2010,29(1):37-40.

[17] 李先杰,蔡振民,何文星,等.铀尾矿库滩面含水量分布与氡析出率预测[J].铀矿冶,2005(3):145-148.

[18] 谢李娜,周建伟,徐文.澳大利亚尾矿治理现状及先进技术综述[J].环境工程,2015,33(10):72-76.

[19] MUDD G M. The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints[J]. Resources Policy, 2010, 35(2):98-115.

[20] HARRIES J R, RITCHIE A I M. Rehabilitation measures at the Rum Jungle mine site[M]//Environmental Management of Solid Waste: Dredged Material and Mine Tailings. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,1988:131-151.

[21] LOTTERMOSER B G, ASHLEY P M. Physical dispersion of radioactive mine waste at the rehabilitated Radium Hill uranium mine site, South Australia[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2006,53(3):485-499.

[22] WILLIAMS D J. Placing soil covers on soft mine tailings[J]. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2005(3):491-512.

[23] 周注谋.加拿大铀矿山放射性废物管理[J].铀矿冶,1995,14(1):1-5.

[24] AL-HASHIMI A. Uranium tailings disposal: review of current technology[J]. International Journal of Environmental Studies,1992,42(1):53-62.

[25] HAW V A, RITCEY G M, SKEAFF J M, et al. Uranium tailings research at the Canada Centre for Mineral and Energy Technology(CANMET)[R]. Atomic Energy of Canada Ltd.,1982.

[26] SAITO H, TORIKAI K, FUKUSHIMA S, et al. Environmental remediation for the upstream of Yotsugi mill tailings pond, Ningyo-toge uranium mine[R]. Japan Atomic Energy Agency,2016.

[27] 高尚雄,叶开发,李承,等.德国铀尾矿库退役治理技术考察报告[J].铀矿冶,2003,22(4):208-211.

[28] JHA V N, SETHY N K, SAHOO S K, et al. A comparison of radioactivity level in discharged waste and natural sources in uranium mineralized areas of Singhbum, Jharkhand[J]. Radiation Protection and Environment,2005,28:284-286

[29] SINGH L, SONI P. Concentration of radionuclides in uranium tailings and its uptake by plants at Jaduguda, Jharkhand, India[J]. Current Sci-

ence，2010：37-49.

[30] 潘英杰. 浅谈国外铀尾矿库的退役治理[J]. 铀矿冶，1998，17(2)：102-110.

[31] 潘英杰. 浅谈俄罗斯铀废石场尾矿库退役治理的安全环保标准[J]. 铀矿冶，2016，35(2)：118-123.

[32] FRASER T D，LYNCH D H，GAIERO J，et al. Quantification of bacterial non-specific acid (phoC) and alkaline (phoD) phosphatase genes in bulk and rhizosphere soil from organically managed soybean fields[J]. Applied Soil Ecology，2017，111：48-56.

[33] WETTERLIND J，FORGES A C R D，NICOULLAUD B，et al. Changes in uranium and thorium contents in topsoil after long-term phosphorus fertilizer application[J]. Soil Use and Management，2012，28(1)：101-107.

[34] FLOREA N，DULIU O G. Rehabilitation of the Barzava uranium mine tailings[J]. Journal of Hazardous，Toxic，and Radioactive Waste，2013，17(3)：230-236.

[35] 王海峰，徐屹群，汤庆四，等. 我国地浸采铀矿山采区浸出率现状分析[J]. 东华理工大学学报(自然科学版)，2017，39(9)：66-70.

[36] 荣耀，荣恪萱. 国外地浸铀矿山地下水修复技术[J]. 铀矿冶，2021，40(2)：158-164＋178.

Research Status of Uranium Tailings Pond Covering Technology at Home and Abroad

YUAN Shanlin[1]，DENG Zhiwen[1]，TAN Wenfa[1,2]，LÜ Junwen[1,2]

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering，University of South China，Hengyang 421001，China；
2. Key Laboratory of Soil Pollution Control and Remediation，University of South China，Hengyang 421001，China)

Abstract：With the development of uranium mining and milling industry，the number of uranium tailings pond is increasing. It has potential harm to the surrounding environment. Therefore，exploring an environmental and effective way to control the pollution sources is to be imminent. Uranium tailings pond covering technology is an effective method recognized at home and abroad，and is also the main technology used in most practical projects at present. The status of uranium tailings pond covering technology at home and abroad is reviewed，the common materials，technical measure，and the governance effectiveness of decommissioning uranium tailings pond are described，in order to provide reference for the surface covering engineering technology of uranium tailings pond.

Key words：uranium tailings pond；covering layer；radon exhalation rate；decommissioning treatment