

大面积地表放射性污染评价与治理技术现状

党海军, 张自禄

西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

摘要:介绍了大面积地表放射性污染的产生和危害,重点对世界上主要核试验场的大面积地表放射性污染状况、污染调查和治理技术等进行了综述,提出了我国大气层核试验场地表污染治理的思路和建议。

关键词:地表放射性;评价;治理;大面积污染

中图分类号:X591 文献标志码:A 文章编号:0253-9950(2014)S0-0006-07

doi:10.7538/hhx.2014.36.S0.0006

Progress on Evaluation and Treatment of Large-Area Surface Radioactive Contamination

DANG Hai-jun, ZHANG Zi-lu

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

Abstract: The origins and harms of large-area surface radioactive contamination is summarized, and especially the contamination level and treatment methodology of large-area radioactive surface contamination resulting from nuclear tests around the world are reviewed. The treatment path and technique suggestions for surface radioactive contamination in the Chinese atmospheric nuclear test site are proposed.

Key words: surface radioactive; evaluation; treatment; large-area contamination

自从 1860 年贝克勒尔发现放射性以来,人类对放射性和放射性物质的认识不断加深,并努力开发其在生产生活中的应用。20 世纪 40—60 年代,核武器的发展极大地推动了核技术的进步,也开创了核技术在工业生产和医疗等许多领域的应用。但是,这些放射性的研究与应用在给人类带来巨大利益的同时,也对人类赖以生存的环境产生了严重的污染。我国核技术发展已走过 60 年历程,目前核电事业和核技术应用均处于快速发展阶段。我国在 20 世纪 60 年代之前建立核工业体系的过程中,受当时经济条件和认识所限,很多

核设施在安全防护和环境保护方面因陋就简,遗留了一些环境污染问题。大面积区域地表放射性污染对人类健康和环境生态的影响最为直接,危害也最为深远,各国政府和科技工作者都对此极为关注,并开展了大量的污染调查评价和实验性的治理工作。我国大气层核试验场的污染治理工作起步很晚,在暂停核试验后才被提上议事日程。经过系统的污染调查,初步掌握了主要污染现状,但安全有效的治理工作依然任重道远。

本文拟对核试验场的大面积区域地表放射性污染的评价和治理工作进行简要综述,分析我国

大面积地表放射性污染区域的治理修复工作现状和发展思路。

1 大面积地表放射性污染的产生及危害

1.1 大面积地表放射性污染的产生

自然条件下,基于宇宙射线和地球本身产生的放射性核素一般不会给人类生存和环境生态带来危害。但20世纪40年代以来,随着核试验、核能产业、核医疗以及核科学研究等的快速发展和应用,人工辐射源和人工放射性物质的量大大增加,造成了明显的、甚至局部严重的环境放射性污染,其中造成大面积地表放射性污染的主要是核武器爆炸、严重的开放性核事故和矿业开采等。如1945年美国向日本广岛和长崎投掷的两枚核武器不仅瞬间毁灭了两座城市,造成数十万人的死亡,而且留下了长达半个世纪的放射性危害^[1]。1968年1月21日,美国一架携带4枚核弹头的B52轰炸机在格林兰岛图勒空军基地(Thule Air Base)附近坠毁,大量核武器装料物质被爆炸分散到冰雪海面上,约3.14 km²严重污染区的海底沉积的²³⁹Pu总量约 1.48×10^{10} Bq^[2]。1986年,前苏联的切尔诺贝利核电站由于反应堆堆芯爆炸造成了大量放射性物质泄漏,气载放射性扩散到欧洲大部分地区,上万平方米的区域地表受到不同程度的污染^[3-4]。2011年日本地震引发的海啸使得福岛核电站几台机组由于冷却故障等原因发生爆炸,大量放射性物质泄漏,产生了400平方公里的地表污染和更大面积的海洋环境污染^[5-6]。美国汉福特钚生产中心从20世纪40年代中期以来,向地面渗透池排放了 5×10^8 m³的放射性废水,其中含钚约200 kg,铀约100 t,当地成了全球土壤放射性污染最严重的地区。

但到目前为止,核武器地面试验是大面积地表放射性污染的主要来源。1945—1998年间,全世界有8个国家进行了不同目的、不同方式和不同威力的核试验2000多次,其中大气层核试验528次,总当量达 4×10^8 t之多,是大面积地表放射型污染的主要来源^[7]。地表放射性污染主要源于地面爆炸,约有50%~80%放射性沉降在300~400 km范围近区,其余进入大气层后扩散传播并最终形成全球沉降。核试验造成的污染核素主要包括裂变材料Pu(含Am)和U同位素、裂变产物⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、¹⁵⁵Eu以及中子活化产物核素⁶⁰Co、¹⁵²、¹⁵⁴Eu等。大气层核试验停止后,国际社会对大气层核试验造成的环境放射性污染及其对人类健康的影响非常关

切,开展了大量的调查和分析研究工作^[8]。

1.2 放射性污染的危害

放射性是原子核的性质,不随物质的物理化学行为而变化,因此放射性污染无法用一般的物理化学手段消除。长寿命的放射性核素可能长期存在于环境中,其电离辐射的后果只能依靠时间的推移而逐渐减小。大面积地表放射性污染的危害可分为对人类的直接危害、对生态环境的危害和对社会发展的影响3个方面。

1.2.1 放射性污染对人类的直接危害 放射性对人类的直接危害有急性损伤和长期效应两种。大剂量照射引起的急性放射性伤害可能使人或生物在很短时间内死亡,而更多的低剂量放射性污染对人和生物的长期效应具有累积效应和迟发效应,可诱发癌症、白血病等,并可能导致遗传变异。放射性污染对人的辐射危害可通过等效剂量来评估,一般分为外照射剂量和内照射剂量。即使是严重的核事故,短时间内较强的外照射都可以通过人员隐蔽、疏散和迁移等措施减小或避免,因此长期来看,大面积放射性污染对人类的影响都属于低剂量率的长期照射。除外照射外,环境中的放射性物质还可以通过食物链经消化道进入人体,或是经呼吸道进入人体。一些核素因生物周期和放射性半衰期长,一旦进入人体,其产生的 α 、 β 、 γ 射线将对机体产生持续的照射,保持着长期的危险性。因此,对大面积污染区域的治理都主要针对长寿命核素,如超铀核素²³⁵U、²³⁹Pu、²³⁸Pu、²⁴¹Am、²³⁷Np以及裂变产物⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、⁹⁹Tc、¹²⁹I等。

1.2.2 放射性污染对生态环境的长期危害 地表放射性污染会通过风蚀、雨蚀等气象过程,以及人类的生产活动和食物链传递而逐渐扩大污染区域,对自然生态环境产生长期危害,进而对人类产生间接影响。许多污染物,尤其是半衰期长的放射性元素,可能在自然界长期存在。即使原始污染域污染物的浓度很低,但经过特定生态过程的富集浓缩之后,就可积累到足以伤害生物的程度。同时,污染土壤的再悬浮也会将放射性核素引入大气环境,并随着大气输送而扩散,使得污染波及更广阔的区域。如切尔诺贝利核事故对下风向的白俄罗斯生态造成很大影响,据专家评估,白俄罗斯在事故后30年因生态影响引起的经济损失高达2350亿美元^[9]。

1.2.3 大面积放射性污染的社会危害 放射性污染事件的发生一般都会对公众造成较大的心理恐慌和阴影^[10],造成社会混乱。即使事件本身的

污染非常轻微,人们对居留附近区域生产生活的安全性过分担忧,致使要么花费巨大代价进行处理,要么放弃该区域的一切工农业生产及矿产资源开发等。如前苏联切尔诺贝利核电站事故发生后,政府先后调动 80 万人参加了核污染的清理工作,迁移居民 27 万;由于长期处于恐慌、紧张而导致的疾病或死亡的人数高于直接被辐射中毒的人数,自杀现象增加,核事故的受害者达 900 万人^[3]。美国科学家联合会 2002 年递交国会的一份听证报告认为:如果“脏弹”攻击发生在纽约这样的大城市,救护、治疗、搬迁、清理等所引起的损失将有可能超过数百亿美元。

2 世界上主要的地面核试验场

美国是世界上第一个拥有核武器、唯一使用核武器、且拥有核武器最多的国家,拥有以本土内华达(Nevada)核试验场为主,包括太平洋埃尼维托克岛、比基尼岛、约翰斯顿岛、阿姆奇特卡岛和圣诞岛 5 个海岛试验场的庞大核试验场体系。其中内华达核试验场自 1951 年开始共进行了 110 次地面和大气层核试验,造成了 120 km² 区域的污染。

俄罗斯(前苏联)是世界上第二个拥有核武器的国家,拥有塞米巴拉金斯克(Semipalatinsk)、新地岛(Novaya Zemlya)、西伯利亚等 10 多个核试验场,其中位于现哈萨克斯坦境内的塞米巴拉金斯克核试验场面积 18 500 km²,从 1949—1963 年间共进行了 116 次大气层核试验,造成约 350 km² 大面积污染^[11]。在新地岛进行了 88 次大气层核试验,主要为高空核爆炸,仅有一次在地面残留了放射性物质,地表辐射剂量率小于 10 μSv(1992 年),其余大部分地区处于本底水平^[12]。

英国是世界上第三个拥有核武器的国家。由于国土面积小,英国的核试验场设在海外,大气层核试验主要在澳大利亚的蒙蒂贝洛岛、武麦拉、马拉林嘎和太平洋的圣地岛进行。从 1952 年 10 月 3 日爆炸了它的第一颗原子弹到 1962 年,英国共进行了 21 次大气层核试验。位于澳大利亚的马拉林嘎核试验场进行了 6 次近地面试验和 500 次核材料化爆实验,造成了大面积地表放射性污染。

法国是世界上第四个拥有核武器的国家,1960—1974 年间在本土以外撒哈拉沙漠南部的因埃核试验场和南太平洋的法属波利尼西亚核试验场(称“太平洋试验中心”)进行了 50 次大气层核试验(包括 5 次安全试验),也造成了大面积严重污染。

中国只有一个核试验场,大气层核试验场区位于新疆维吾尔自治区的罗布泊地区^[13],20 世纪 60 年代,中国开始发展核武器,共进行了 20 多次大气层核试验,在地面爆炸区域造成了一定程度的放射性污染。

3 大面积地表放射性污染的评价与治理

3.1 大面积地表放射性污染评价调查

对于大面积放射性污染的治理,污染调查与评价是治理方案制订和治理效果确认的基础。污染调查是采用多种方法对地表污染的程度、污染分布和主要污染核素进行分析,了解污染的现状和历史演变,并预测未来可能的变化。污染评价则是根据调查结果和有关标准和要求,按照不同的使用情景计算污染引起的集体剂量,并确定相应的污染等级,以便于针对不同级别的污染区域采用不同的治理或修复手段,寻求污染清除与经济成本的最佳平衡。

世界各有核国家一直以来十分重视核试验场的放射性污染调查。美国在 1957—1958 年对内华达试验场的某次安全试验(Coulomb C)场地进行了污染调查。在后来的几十年里,各有核国家都对其核试验场进行了放射性环境调查与评估,一般都在停止核试验后进行系统的工作,但也有在进行核试验期间对特定场地进行调查分析,以指导后续的试验规划,如典型的美国内华达场地的调查前后持续 30 多年。英国在停止核试验后,于 1967 年对马拉林嘎地区进行了初步、简单的治理,但为了明确污染情况,澳大利亚辐射研究所(ARL)仍进行了多次源项调查,并组建国际水平的评价组在 1987—1989 年间进行了更加详细的调查与评估,确定 Pu 的污染面积为 127 km²(含量为 10~200 Bq/m²),以 Pu 和 Am 为主要危害核素,Pu/Am 活度比为 7.4±0.6。Pu 的形态以 PuO₂ 为主,以吸入性气溶胶为剂量注入的主要途径^[14-15]。中国在大气层核试验期间在场区周边和全国进行了系统的全球沉降监测,从 1964 年的 21 个监测站逐渐增加至 1971 年的 45 个,部分监测站一直运行到 20 世纪 90 年代初^[16-18],在地下核试验期间也对首次竖井试验场地地下水中的放射性核素浓度变化及扩散进行了监测,以了解核试验对环境可能产生的污染和危害^[19-20]。

表 1 对比了主要大气层核试验场的地表污染状况及调查方法。大面积地表污染调查主要有以下方法和手段:

表 1 主要大气层核试验场地表污染状况及调查方法^[6]
Table 1 Surface radioactive contamination level and survey methods of atmospheric nuclear test sites^[6]

No.	试验场 (Test site)	地表土壤中 污染核素量 (Surface radionuclide activities)/Bq	污染土壤中 ²³⁹ Pu 比活度 (²³⁹ Pu content in contaminated soil)/(Bq·g ⁻¹)	污染土壤中 ¹³⁷ Cs 比活度 (¹³⁷ Cs content in contaminated soil)/(Bq·g ⁻¹)	污染土壤中 ⁹⁰ Sr 比活度 (⁹⁰ Sr content in contaminated soil)/(Bq·g ⁻¹)	地面最大 照射剂量率 (Maximum surface radiation dose rate)/ (mGy·a ⁻¹)	Pu 气溶胶 活度浓度 (Pu aerosol content)/ (μBq·m ⁻³)	重要技术手段 (Main techniques)
1	内华达 (Nevada)(1990)	3.4×10 ¹³ (²³⁹ Pu)	0.37~370	0.37~370	0.37~370			航测,就地测量、取样分析(Aerial survey, field measurement, sampling and analysis)
2	比基尼岛 (Bikini) (1999)	1.03×10 ¹⁷ (²³⁹ Pu, 环礁沉积物 (Atoll sediment))	0.008~0.32	0.02~2.3	0.32~2.0	0.006~3	0~270 Bq/g	航测,就地测量、取样分析、再悬浮测量、海 底沉积物分析(Aerial survey, field meas- urement, sampling and analysis, re-suspen- sion analysis, marine sediment analysis)
3	塞米巴拉拉斯克 (Semipalatinsk) (1994)		3~14 (0.001~14) ^[12]	1~50 (0.040~3.5) ^[12]	0.1~11 (0.040~25) ^[12]	0.9~300		航测,就地测量、取样分析(Aerial survey, field measurement, sampling and analysis)
4	新地岛 (Novaya Zemlya)		2.5×10 ⁻⁴ (海底沉积物 (Marine sediment)); 8×10 ⁻³ Bq/m ³ (海水(Seawater))	3 kBq/m ²	2 kBq/m ²	70~105		航测,就地测量、取样分析(Aerial survey, field measurement, sampling and analysis)
5	马拉林嘎 (Maralinga)	5.34×10 ¹³ (²³⁹ Pu); 1.78×10 ⁹ (²³⁵ U); 1.10×10 ¹¹ (²³⁸ U)	0~20	0.08~6.7		0.6~35	10~1 000	航测,就地测量、土壤分层取样、气溶胶测 量(Aerial survey, field measurement, sam- pling and analysis, aerosol analysis)
6	穆鲁罗厄和方加陶 (Mururoa Atoll and Fangataufa)	4.30×10 ¹³ Bq (²³⁹ Pu, 焦湖沉积物 (Lagoon sediment))	0.000 6~0.36				110~2 000	陆海取样分析、空腔取样分析、气溶胶分析 (Sampling and analysis, aerosol analysis)

(1) 资料数据分析:通过对所有核爆炸事件的时间、威力和性质的统计,估算可能的污染放射性总量及核素分布、污染区域分布等,为调查方案制定提供基础数据。

(2) 航空放射性测量:用 NaI 探测器进行快速、大范围的特征 γ 射线扫描,确定地表放射性污染的分布范围和等级,查找可能存在的热区,为制定就地测量和取样分析方案奠定基础;航空测量主要针对剂量率和 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{152}Eu 等 γ 计数率,调查速度快,可在几天内完成上千平方公里的面积调查。

(3) 现场就地核物理测量:主要使用便携式表面污染仪、照射量率仪、车载 HPGe 就地 γ 谱仪等设备进行现场测量,鉴别地表污染中的核素并进行定量,可识别高于环境本底数倍以上的污染,具备原位、无扰动和数据代表性强等特点;美国能源部 RIDP 项目和澳大利亚在马拉林嘎核试验场调查中均采用了就地测量技术,现场就地核物理测量在中国大气层核试验场污染调查中也发挥了重要作用;

(4) 放射性取样分析:现场取样分析是准确分析土壤、空气、植物和生物样品中放射性污染核素含量的唯一手段,并可以同时获得不同核素之间的比值等指纹信息,为大量样品的核素替代测量和航空、地面核物理测量提供基准,也可为污染源项判别分析提供高准确度和精确度的数据;取样分析方法的灵敏度高,随着分离技术和测量仪器的发展对多数核素可达 $\mu\text{Bq/g}$ 的探测水平,但劳动强度大,分析周期长,一般从取样到获得数据需要 1 个月以上的时间。

3.2 大面积地表放射性污染治理技术

环境整治是核试验场污染治理的关键环节,包括污染区的清污和管控。各有核国家都根据各自实际制定了合理有效的措施,主要原则包括依据标准和法规、关注场地土地利用、因地制宜分类治理等。在治理产生的废物管理方面,目前主要有废物转移场外处置、分级就地处置、弹坑就地掩埋等方案。到目前为主,世界上主要的核试验场均对地表污染进行了不同程度的治理,主要采用工程机械方法,直接有效,易于评估,但成本较高,局限性较大。其次也采用场地植被恢复和植物修复等措施。

3.2.1 内华达等美国核试验场清污治理 美国从 20 世纪 60 年代就开始了污染区治理,并一直持续到现在,主要内容包括地表放射性污染热区的污染土壤清除、大面积污染区域机械收集及粒度分级减容、浅埋废物的回取处置或封闭。根据实际情况,整治后不同区域达到了正常使用、限制

使用和限制准入的标准。对地下核试验场污染区,当前的主要工作是监测和评价,没有也不会进行污染治理。地表污染治理的方法包括土壤铲除、沥青固定、真空吸尘、深层翻耕掩埋和废物固化等,同时在场内建造了低水平放射性废物管理填埋场来处置治理中收集的放射性废物。美国对比基尼试验场和埃尼威托克试验场等也采取了盐水冲洗、土壤刮除、深翻换土和作物修复等治理措施,污染的金属、水泥和珊瑚土堆采用就地掩埋方式处置,水泥堆的掩埋处理标准为 6.22 Bq/m^2 (主要是表面污染),珊瑚土的清污标准 0.5 Bq/g 。

3.2.2 马拉林嘎核试验场的清污治理 英国在马拉林嘎核试验场主要进行了 7 次大气层核试验和数百次化爆实验。由于核爆炸高度较高,地表残留放射性污染并不大,且主要是短寿命的裂变产物和活化产物,只有一次核试验(Tadje)造成了小面积的 Pu 污染。主要的 Pu 污染来源于一点安全试验,有 22 kg 的 Pu 材料被分散在 Taranaki 区域,形成了 4 条放射羽。停止核试验后,英国于 1967 年对这一地区进行了初步、简单地治理,将严重污染区的污染物集中到 21 个土坑中用水泥浇灌盖,目的是将土壤中的 Pu 含量降低至 40 Bq/g ,但是这次行动没有达到预期目标。因此,澳大利亚根据进一步的污染调查结果,确定非居住区边界和移土治理边界,前者控制 ^{241}Am 的面活度 3 kBq/m^2 ,关键人群组长期居住接受的剂量小于 5 mSv/a ,50 年后的癌症发生率小于 10^{-4} 。非居住区包括核试验爆心区域和 Pu 落下灰污染区,面积 120 km^2 ,主要以竖立篱笆围隔和警示限制人员进入。移土边界是需要将土壤从地表移除的区域,控制 ^{241}Am 面活度 40 kBq/m^2 ,人员进入控制区域 72 h,最大年有效剂量小于 5 mSv 。在治理方案中,高污染土壤采取集中坑埋,严重污染的坑内物采取现场电极加热玻璃固化技术,将污染物转化为化学稳定的玻璃体和晶体产物。清理后的区域采用覆盖净土、重新植被的手段治理,以保证表面污染浓度限制在标准之下,且后人不易再次翻挖施工^[14-15]。治理后,场地长期居住的土著居民吸入的有效剂量不同地点的上限值为 $0.3 \sim 3.2 \text{ mSv/a}$,其中大部分地区小于 1 mSv/a 。

3.2.3 塞米巴拉金斯克核试验场污染评价 1990 年,前苏联的塞米巴拉金斯克试验场归还哈萨克政府后,哈萨克政府组织多个研究机构开展了试验场污染情况调查^[21-23],并在 1997 年获得了

联合国大会就呼吁国际社会帮助哈萨克政府消除塞米巴拉金斯克核试验场影响的支持。试验场的清污和治理分2个阶段,第一阶段在1998—2000年对1/3面积进行调查和清理,用干净土壤进行污染区覆盖,并对污染区进行警示隔离;用混凝土封闭试验设备和构件,并关闭坑道、发射井等核试验基础设施。第二阶段,试图将试验场部分地区转化为经济区,对部分区域进行了表面清污和废物掩埋,运用农业技术修复受干扰土地。IAEA评估认为,考虑当地人口密度很低,可以不对该试验场进行过多干预以降低辐照水平。

3.2.4 罗厄试验场和方加陶试验场环境整治 法国对罗厄试验场和方加陶试验场的环境整治主要包括用沥青对污染区地表污染物进行固定、对热区的钚粒子进行清理、封堵试验井口、拆除和销毁核试验设施与材料等,并对部分废物进行适当的储存管理,对试验场进行长期监测。

3.2.5 典型核事故下的大面积放射性污染治理 目前,事故下大面积放射性污染治理较为典型的案例是切尔诺贝利核事故和图勒战机坠毁事故。图勒事故发生后,美国和丹麦迅速启动了污染清洁和废物回收^[24-25],划定了禁入区域。为防止污染冰雪融化后引起放射性物质扩散,在丹麦政府要求下,美国收集了表面层污染冰雪运到图勒基地,用钢制储箱海运至美国南加利福尼亚州的萨瓦纳河(Savannah River),武器残骸则送往德克萨斯州的潘泰克斯(Pantex)进行评估检验,报道称93%的污染物质被从事故现场清除,共计2 100 m³的融化水和30箱混杂污染物,耗资940万美元(相当于现在6 300万美元)。美国空军为监测气载污染水平开展的鼻孔擦拭测试发现约3.4%的样品检测到 α 放射性,但都在可接受水平以下。事后,针对残留污染的科学监测一直持续到2003年,事故海底沉积物取样分析表明Pu的污染发生了一定迁移,但这次事故遗留的放射性风险是微不足道的^[26]。

以上治理后的部分核试验场已经实现了分区限制性或无限制性允许人员进入,允许矿业和旅游开发、甚至农耕放牧等长期居住活动,显示了较好的治理效果。因此,对核试验场大面积区域污染进行科学合理的污染治理是非常必要的。

4 我国大气层核试验场地表放射性污染治理思路

核试验场的地表放射性污染主要发生在大气层

核试验场。与其他有核国家相比,我国的核试验次数很少,地面试验次数和爆炸威力更为有限,因此整体污染核素的总量有限。主要的放射性污染分布在试验弹坑和地面零点附近区域,以及自然水动力和风力迁移造成的局部洼地(如冲击淤泥区)和植被丛区域。与其它核试验场一样,我国大气层场区的主要污染核素包括核材料、裂变产物及中子活化产物核素等,如²³⁹Pu、²³⁸Pu、²⁴⁰Pu、²⁴¹Pu、²⁴¹Am、²³⁸U、²³⁵U、¹³⁷Cs、⁹⁰Sr、¹⁵²Eu、⁶⁰Co、¹⁵⁴Eu和¹⁵⁵Eu等。根据公开的核试验信息和沉降规律预测,我国大气层核试验场的地表污染很小,较强的污染主要在弹坑附近,面积很小,只有弹坑中心土壤中Pu的最大浓度可达200 Bq/g,属中等放射性污染水平,其余大部分区域属低污染水平。场区整体剂量水平很低, γ 附加剂量率大于48.9 nGy/h(相当于年有效剂量0.3 mSv)的区域面积小于0.4 km²,大于162.9 nGy/h(相当于年有效剂量1 mSv)的区域面积仅小于0.1 km²。但土壤中污染核素分布复杂,不连续,有热点存在。在主要核素中,易迁移的⁹⁰Sr和¹³⁷Cs会有一定的垂直分布,而其他核素如²³⁹Pu、²⁴¹Am等主要分布在3 cm的表层土壤中。

我国在大面积地表放射性污染方面的实践不多,许多尾矿多采取暂时堆存、下游围栏和适度监管等措施,针对大气层核试验场的治理还没有正式展开。污染治理是一项复杂的综合性的工作,涉及到政治、经济、社会 and 军事等各方面的因素。针对我国大气层核试验场污染物总量低、污染范围小、属极端干旱的荒漠半封闭型盆地、地域生产生活条件差等特点^[13],污染治理应该突出重点、科学规划、注重效益、兼顾全局,以较小的经济代价换取最优的治理效果。按照IAEA建议,对无人区,剂量水平为0.1~1 mSv/a时可以根据实际整治,剂量水平为1~10 mSv/a时通常要求整治。如澳大利亚Maralinga试验场²³⁹Pu的允许残留为1 310 mBq/g,对应²⁴¹Am为65 mBq/g;而美国埃尼威托克环礁的污染清除标准为²³⁹Pu的活度浓度15 000 mBq/g以上的土壤干预清除,以下的土壤原地不动。借鉴国外经验和IAEA相关原则,我国大气层核试验场污染治理可采取以下几种措施:

(1) 热粒子收集:对地面核爆炸的中心区域,存在近区沉降的热粒子,可采用适当技术手段收集;这类废物总量很少,可采用熔融固化和水泥固化后就地在一定深度下处置,或直接深井填埋;

(2) 高污染区地表土壤清除:如果以年有效剂

量 0.3 mSv 作为清污干预的标准(相当于土壤中核素活度浓度²³⁹Pu 1 020 mBq/g; ²⁴¹Am 1 230 mBq/g; ¹³⁷Cs 360 mBq/g; ⁶⁰Co 90 mBq/g),我国大气层核试验场只需要对约 0.4 km² 面积的地表土壤进行整治,假设对表面 5 cm 厚的土壤需要收集,则废物总量将达 20 000 m³;收集的废物属于低水平放射性废物,可集中就地浅埋;

(3) 土壤翻耕:大面积的极低水平地表污染可以采用土壤深耕将地表污染物转移到几十厘米之下,这种方法能将地表放射性剂量水平降低至 1/3~1/2;

(4) 污染固定:为了防止地表污染面积的扩大,可在风道和汇水区设置深沟、围栏等措施限制污染沙土向场外迁移;

(5) 长期监测:对治理后的污染区域进行长期监测,评价治理效果,及时制定进一步的防治计划。

参考文献:

- [1] Frank R B. Downfall: the end of the imperial Japanese empire[M]. New York: Penguin Publishing, 2001: 1-10.
- [2] Aarkrog A. Radioecological investigation on Thule accident[J]. USAF Nuclear Safety, 1970: 74-79.
- [3] Shcherbak Y. Ten years of the Chernobyl era[J]. Scientific American, 1996(4): 44-54.
- [4] Geraskin S A, Dikarev V G, Zyablitskaya Y Y, et al. Genetic consequences of radioactive contamination by the Chernobyl fallout to agricultural crops[J]. J Environ Radioact, 2003, 66(1/2): 155-169.
- [5] Yamamoto M, Takada T, Nagao S, et al. An early survey of the radioactive contamination of soil due to the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, with emphasis on plutonium analysis [J]. Geochem J, 2012, 46(4): 341-353.
- [6] Toshihiro W, Yoshiharu N, Shinya S, et al. Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima[J]. J Environ Radioact, 2013, 124: 246-254.
- [7] 吕敏,乔登江,朱焕金,等.核爆炸与核试验[M].北京:原子能出版社,2005:1-5.
- [8] 喻名德,杨春才.核试验场及其治理[M].北京:国防工业出版社,2007:1-20.
- [9] 石雷,丁保君.切尔诺贝利核事故对白俄罗斯生态环境的影响[J].环境与可持续发展,2012(1):93-96.
- [10] 刘晴,扈洁琼.世界不会忘记:切尔诺贝利核爆炸 19 周年祭[J].现代职业安全,2005(6):74-77.
- [11] 谈成龙.前苏联核试验场:塞米帕拉金斯克的环境初评工作[J].世界核地质科学,2004,21(1):62.
- [12] 张炎译.俄罗斯核试验对新地岛核试验场的影响[J].国外核新闻,2004(6):29-30.
- [13] 胡东生,张华京,庞西磊,等.罗布泊核试验区自然环境变化的地球卫星观测分析[J].中国工程科学,2008,10(9):31-38.
- [14] 王旭东,梁宇,王永仙,等.澳大利亚核试验场整治中的几个问题[J].辐射防护通讯,2006,26(2):37-74.
- [15] 许振华. Maralinga 核试验场清污治理简介[C]//“21 世纪初辐射防护论坛”第四次会议暨低中放废物管理和放射性物质运输学术研讨会论文集,北京:中国核学会,2005:196-203.
- [16] 朱昌寿编著.中国环境放射性水平及卫生评价[M].北京:人民卫生出版社,1992.
- [17] 李树庆,祝汉民,吴复寿,等.中国近海放射性水平[M].北京:海洋出版社,1987.
- [18] 潘自强,刘森林,等编著.中国辐射水平[M].北京:原子能出版社,2010.
- [19] 丁浩然,褚玉成,倪惠云.地下核爆炸现象学概论[M].北京:国防工业出版社,2002:21-29.
- [20] 涂国荣,党海军,成曦,等.高放废物处置类比研究与核试验场区地下水中核素迁移早期研究概况[M]//中国核科学技术进展报告(第一卷):核化学与放射化学分卷,北京:原子能出版社,2010:266-270.
- [21] Belykh E, Evseeva T, Geras'kin S, et al. Estimation of radioactive contamination of soils from the “Balapan” and the experimental field technical areas of the Semipalatinsk nuclear test site[J]. J Environ Radioact, 2012, 109: 52-59.
- [22] Evseeva T I, Geras'kin S A, Majstrenko T A, et al. Assessment of soil degradation in areas of nuclear explosions at the Semipalatinsk nuclear test site[J]. Biophys, 2011, 56(4): 747-754.
- [23] Zhumadilov K, Ivannikov A, Zharlyganova D, et al. ESR dosimetry study for the residents of Kazakhstan exposed to radioactive fallout on 24, August 1956[J]. Radiat Meas, 2011, 46(9): 793-769.
- [24] Ole W L, Aarkrog A, Lars B J, et al. Danish health physics activities at Thule during the clean-up period[J]. USAF Nuclear Safety, 1970: 80-81.
- [25] Frankenstein G E. Ice operatuions radioecological investigation on Thule accident[J]. USAF Nuclear Safety, 1970: 82-83.
- [26] Nielsen S P, Roos P, Dahlgaard H, et al. Thule expedition 2003; studies on radioactive contamination and particles[M]//Oughton D H, Kashparov V. Radioactive Particles in the Environment, Part II, Netherlands: Springer, 2009: 93-109.