

调查研究核试验产生的放射性落下灰

热粒子与冷战

PIER ROBERTO DANESI



在进入下世纪之时,将有 2000 多次不同规模和类型的核爆炸试验被记录下来。所有这些核试验几乎都是在 20 世纪 90 年代结束的冷战期间进行的。

大气层核试验向环境散布了大量放射性残留物,这些残留物因试验类型、地点和当量的不同而分布在当地的地面(或水面)与对流层和平流层区之间。随之产生的携带放射性残留物的沉降作用导致了当地和全球的放射性落下灰。某些放射性核素的聚集能形成“热粒子”——含有放射性化学元素的微粒物质。

当地的放射性落下灰包括大颗粒放射性气溶胶、放射性粒子,它们一般沉积在试验场址周围方圆约 100 公里范围内。核武器试验场址所在地的放射性污染还归因于核装置安全试验常常散布的易裂变物质,它们释放后以各种各样形式存在,如铀

蒸汽、各种粒径的铀气溶胶、铀氧化物粒子、铀涂层颗粒和大块被爆炸试验毁坏的受铀污染的结构材料。

全球放射性落下灰包括对流层放射性落下灰和平流层放射性落下灰两部分。前者由气溶胶组成,它们不会被带出对流层顶,而且在平均滞留时间最多 30 天后沉降。在这段时间内,残留物在射入的纬度带内扩散,随后的路径受风的类型控制。平流层放射性落下灰由后来导致遍及全球的放射性落下灰的粒子形成,它们大多散布在进行核试验所在的半球,占长寿命裂变产物残留物的主要部分。

照片:澳大利亚南部马拉灵加前核试验场址上的一个纪念碑。IAEA 专家组在法属波利尼西亚穆鲁罗瓦试验场址收集供分析热粒子用的土壤样品。(来源:Danesi/IAEA)

核放射性落下灰通过内照射(归因于吸入空气中的放射性物质或食入被污染的食物)和外照射(归因于存在于地表空气或沉积在地面的放射性物质)使人受到放射性照射。在这些方面已做过广泛的研究。

就核试验来说,对始发事件性质的评估通常包括分

Danesi 先生是奥地利维也纳机构总部附近 IAEA 塞伯尔斯多夫实验室主任。

析沉积在地面上的放射性物质,但是,由于在核爆炸的时间和采集放射分析样品的时间之间放射性核素的组成会发生很大的变化,因此这类研究是有问题的。一种称作分离的过程使放射性残留物样品不能代表爆炸产物。

分离是从火球产生的放射性物质和惰性物质的凝结开始的。由于风、重力和原子云扰动的影响,混合物可能在凝结仍在进行之中时就开始分离了。凝结物的进一步分解是通过不同的过程进行的,包括残留物同惰性物质接触。

原子云形成时,冷却、凝结、凝聚、混合和分离诸过程几乎同时进行,但在不同云区中的程度不同;而且,初始放射性产物经过放射性衰变过程在基本形式上也发生了变化。

热粒子。科学地认识分离现象对于解释全球放射性落下灰和爆炸过程的核化学至关重要,对于评估污染和食入危害也非常有用。

根据分离模式,粒子的大小和类型的变化伴有放射化学成分的变化。放射性核素的性质和浓度以及粒子的大小和形状又是确定吸入或食入危害的因素。

其它重要的科学信息涉及放射性核素在粒子中存在的化学形式。同那些更活泼

且易获得的离子、原子和分子量小的粒子相比,存在于热粒子中的放射性核素一般来说相对不活泼。

为评价大气层放射性落下灰的短期和长期后果——尤其是来源于热粒子的放射性核素的泄漏——有关该源项的详细物理化学信息是必不可少的。通常,源项的特征限于沉积放射性核素的存量估计、活度水平或放射性浓度,而物理化学方面的信息有限。

粒子沉积后受到风化,伴生的放射性核素将随时间被活化迁移。粒子组成、可能的结构改变和沉积场地的化学条件将影响风化速率,而且,活化迁移的放射性核素还会和土壤及沉积物相互作用。

大多数评价放射性核素污染迁移及后果的模型均假定放射性核素以离子或低分子量形式存在,这可能容易导致过高估计放射性污染的短期后果。

另一方面,若放射性粒子相当不活泼(经常如此),放射性核素将会在风化后才进行迁移,结果会低估放射性污染的长期后果。

那么显然,除非将热粒子的作用考虑进去,否则模型的预测效果会受到大量不确定因素的影响。

热粒子的存在还会使一

些在处理土壤和沉积物污染时所做的假设不成立。这包括把表面放射性浓度或总放射性浓度换算成不同数量级的单位(例如,把 Bq/cm^2 换算成 Bq/m^2 或 Bq/km^2 ,反之亦然)当作合理运算这种经常性假设。

下面举例说明研究核武器试验场热粒子的具体方法。

在澳大利亚南部进行的研究

从 1953 年到 1963 年,联合王国在澳大利亚南部的马拉灵加和伊谬实施了一项核武器试验计划。在这些现已完全恢复的场地上,曾进行过 9 次核爆炸试验和几百次小规模试验。

大型核爆炸的当量在 1 千吨和 27 千吨之间,而小型试验仅涉及到铀、钚及短寿命放射性核素的燃烧和爆炸扩散。这些试验的环境影响曾由澳大利亚辐射实验室(ARL)进行过广泛的研究,并一直是许多出版物的主题。

马拉灵加最严重的钚污染是 12 次系列安全试验造成的,22 公斤钚(和类似数量的铀-235)被释入环境。这些物质是常规爆炸扩散的,而且没有或几乎没有发生核反应。钚被垂直射入高达

800 米的天空,并被盛行风扩散到相当远的地方,造成陆地大面积污染,在远离爆炸点数千公里以外也能发现铯。

ARL 发现铯基本上呈三种形式存在——涂敷在金属件、塑料、电线和铅砖等部分实验装置材料的表面;微小的碎屑或颗粒,而且不是肉眼总能看得见的,但是用 γ 监测器很容易探测到;和细小的扩散物质,由受污染的土壤颗粒和大小与之相同的再凝聚铯粒子构成。

这类物质的样品收集后,筛分至直径为 45 微米的颗粒,以确定质量和放射性浓度。结果表明,直径为 250—500 微米这部分颗粒一般质量最大,但大部分放射性(约 41%)却集中在 45 微米以下的颗粒部分中,该部分的质量仅占总质量的 5%。

把质量最小的部分进一步分成 7 个空气动力学粒级,粒径从 45 微米到小于 3 微米。用这种方法还找出了粒径小于 7 微米的可吸入部分。

在镭-241 的放射性活度为 25 Bq 的 800 克土壤样品中还找到了一些粒子,将它们用二元分离法细分成单个粒子,发现样品的全部放射性活度包含在分离出的这 54 个热粒子上。单个粒子中

镭-241 的放射性活度估计在 0.1-2.0 Bq 之间,其平均直径约为 20 微米。

该研究还鉴别出大量次毫米级热粒子,并用高分辨率 γ 射线光谱测定法进行分析(以确定铯-239 与镭-241 的比率)。还用质子诱发 X 射线发射光谱测定法分析了 5 个放射性活度在 30 Bq—5 kBq 范围内的次毫米级粒子,以获得其元素组成和均匀性方面的信息。

在这些直径为几百微米的粒子中,发现铯和铀均匀地分布在粒子表面。鉴别出的主要元素有:铝(1.8%)、钾(2.3%)、钙(1%)、铁(23%)、铅(1.9%—35%)、铀(2.9%—0.8%)和铯(19%)。在模拟肺液中进行的溶解研究表明,这些粒子没有明显的可溶性。

在法属波利尼西亚进行的研究

在法属波利尼西亚进行的热粒子调研工作由一个专家小组完成,这一工作是 1998 年完成的国际穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁放射学状况研究的一部分。从 1966 年 7 月到 1974 年 9 月,曾在那里进行过 41 次大气层核试验。另外,在穆鲁罗瓦环礁北端通常称为科莱特地区的地表进行了 5 次安全性试验。

这 5 次安全性试验的目的是研究核装置的核心部件在模拟故障爆炸条件下的行为。核心部件用常规爆炸破坏,结果每次试验期间有约 3.5 公斤铯-239(呈分得非常细小的铯和铯氧化物形式)。尽管在 1982—1987 年开展了大规模的净化作业,但在科莱特地区的地表和环礁湖附近的沙滩上留下了铯热粒子。

作为上述国际研究的一部分,一个科学家小组对穆鲁罗瓦和方阿陶法(包括科莱特地区)陆地环境中的残留污染物进行了评估。IAEA 的塞伯斯多夫实验室组织和协调了一项取样活动,并在 1996 年的夏天付诸实施,随后对约 300 个样品进行了全面的放射化学测量。(见第 24 页文章。)

对科莱特地区残留污染物的分析确认了含铯热粒子的存在。从珊瑚礁碎片和碎珊瑚岩中分离出 20 个相对较大的粒子,粒径从 200 微米到 1 毫米。用高分辨率 γ 射线光谱测定法对这些粒子进行了测量,以估计其放射性活度和铯-239 与镭-241 的比值。测量发现铯-239 的放射性活度在 5—300 kBq 范围内,尽管也发现了一个粒子的放射性水平约为 1 MBq。粒子中镭-241 的放射性活度在 0.2—5.6 kBq 范

围内。此外,还用光学显微镜和微 X 射线荧光对其中 6 个直径在 200 到 500 微米之间的热粒子进行观察研究。观察结果表明,有些粒子具有光滑、透明且密实的特征,而其它的则表面粗糙,甚至可能是较小粒子的聚集物。

除了铀以外,还发现这些粒子中含有其它元素;包括铀和镭,其浓度是铀的百分之一到十分之一;钙(表明它们有碳酸钙基质);铁(表明它们的金属特性);氟(最可能来自海盐),以及痕量的锰、镍、铬、钴和钛(可能反映了盛装安全性实验用裂变材料的不锈钢容器的组成)。

为估计铀在珊瑚碎片中的分布,还将 1053 克样品筛分成 7 个粒径。用高分辨率 γ 射线光谱测定法测量各个粒径部分中铀和镭的放射性活度,结果表明,99.9% 的质量和 95.8% 的放射性活度存在于大于 250 微米的粒子中。

然而必须指出的是这项研究并没有排除粒径小于 10 微米(含可吸入部份)且铀-239 放射性活度为几百贝可的粒子的存在。对 6 个热粒子的血清模拟物体外溶解性的研究表明,铀溶解的量在所有情况下均小于粒子中铀初始量的 0.07%。这表明

溶解特性类似于马拉灵加核试验场粒子的溶解特性。

未来的要求

研究热粒子对正确评估被核武器试验污染的场地的辐射危害意义重大。然而,迄今所做的研究都只是提出了更多的问题而没有找到最终答案。这表明,通过对碎片进行放射化学、化学和物理分析所获得的有关热粒子和粒子分级的信息,从所产生的粒子的多样性和需要研究的数量变量来看还是显得太少、太分散。因此,控制热粒子的形成、化学与放射化学组成和物理与形态特性及其在自然环境中行为的复杂现象,现仍未被完全了解。

很明显,导致热粒子形成及其在生态系统中行为的现象非常复杂。因此任何概括性结论的得出都必须谨慎。普遍认为,要在该领域取得更大的进展,需要多学科专家组共同努力。他们应包括物理化学家、无损微量分析技术方面的专家、放射化学家、核物理学家和保健物理学家。

还必须指出的是除核试验外,还有其它来源向环境释放各种粒径和含铀系元素、裂变或活化产物组分的

热粒子。例如,1957 年温茨凯尔反应堆大火;1968 年 B-52 轰炸机在图勒坠毁;1978 年 Cosmos 卫星在加拿大坠毁;以及 1986 年切尔诺贝利核事故。为核武器计划生产裂变材料的核设施也一直向环境释放热粒子。

总之,任何加工核材料的设施都向周围环境释放少量(但可探测到)的放射性和非放射性同位素。这些释放的形式可以是废物流、气溶胶或粒子,并且可在距释放点一定距离的下风处或下游处发现,但从辐射危害角度看它们通常是微不足道的。

研究核试验产生的热粒子的现代分析技术同样可用于研究其它环境放射源。借助这些技术,科学家能测量到被释放放射性物质中存在的非常少量的化学元素和同位素,从而提供有关这些物质形成过程的信息。

希望在以后的几年里,在被核武器试验和各种类型核事故污染的场址及核附近的场地开展更多的热粒子研究工作。仪器分析技术方面的进步将有益于这项工作。进而可以更好地了解热粒子在评估辐射危害,以及在提供有关产生热粒子的设施类型和用途的信息方面的作用。 □

