

环境监测概论

(第三分册)

环境监测概论编写小组

1979. 11.

目 录

第八章 放射性污染及监测及中子活化分析在环境监测中的应用

第一节 环境放射性污染的来源及危害.....	(1)
一、环境中的放射性.....	(1)
二、天然放射性本底.....	(3)
三、核试验环境污染.....	(12)
四、核工业的放射性污染.....	(17)
五、医疗照射.....	(20)
六、其它各方面来源的放射性污染.....	(27)
七、环境放射性物质进入人体的途径.....	(31)
八、电离辐射对人体的危害及防护标准.....	(33)
第二节 环境放射性监测.....	(39)
一、环境的监测计划.....	(39)
二、监测技术.....	(44)
三、监测方法.....	(49)
第三节 中子活化分析在环境监测中的应用.....	(56)
一、概述.....	(56)
二、基本原理与特点.....	(57)
三、样品和标准的制备.....	(59)
四、中子源.....	(60)
五、放射化学分离.....	(61)
六、放射性测量与仪器活化分析.....	(63)
七、应用实例.....	(64)

第九章 噪声污染监测

第一节	噪声的定义和噪音污染的特点	(66)
第二节	噪声的物理量和物理量度	(66)
一、	噪声的物理量	(66)
二、	噪声物理量度	(68)
第三节	噪声测量仪器	(71)
一、	传声器和前置放大器	(71)
二、	声级计和测量放大器	(72)
三、	频谱分析仪	(74)
四、	实时频谱分析仪	(75)
五、	声级记录仪	(75)
六、	磁带录音机	(76)
七、	校正装置	(76)
第四节	噪声测量方法	(76)
一、	噪声测量要点	(76)
二、	环境噪声测量	(77)
三、	机动车辆噪声测量	(78)
四、	工厂车间现场噪声测量	(78)
五、	声功率级测量	(78)
第五节	听力测试	(80)
一、	听力测试设备	(81)
二、	测试步骤	(82)

第十章 遥测遥感在环境监测中的应用

第一节	遥测相关光谱仪及其在大气污染监测中的应用	(84)
一、	相关原理	(84)
二、	遥测相关光谱仪	(89)
三、	遥测相关光谱法在大气污染监测中的应用	(90)
第二节	红外遥感技术	(95)
一、	红外遥感的物理机理	(95)
二、	红外遥感仪器	(99)
三、	遥感技术在环境监测方面的应用	(102)

第八章 放射性污染及监测及中子活化分析在环境监测中的应用

第一节 环境放射性污染的来源及危害

一、环境中的放射性

环境放射性的辐射源可分为天然辐射源和人工辐射源两大类，人类自从在地球上出现以来，就一直受天然辐射的照射，而且，直到几十年以前（不到一个世纪），人类还只是受着天然辐射的照射，但由于人工辐射源的启用，已经改变了这种状况。我们所谓的放射性污染，指的就是这种因人工辐射源的影响和危害所构成的对环境的污染。

天然辐射（也称为天然本底辐射）有两个来源，即来自地球外层空间的宇宙射线和地球本身的地球辐射。宇宙射线是地球之外宇宙间存在的混杂的高能辐射的统称。从外层空间进入地球大气的高能辐射称为初级宇宙射线，事实上，能穿透到海平面的初级宇宙射线是非常少的，因其大部分已经在大气上层的十分之一处被吸收。当初级宇宙射线进入大气后，它所带来的能量和粒子就与大气物质相互作用，产生的次级粒子和电磁辐射，我们称之为次级宇宙射线。生活在地球表面上的生物就是不时受着这种次级宇宙射线的辐射。在地球表面任何一点上，宇宙射线照射产生的剂量率都是相当恒定的，但随纬度而变化，而且随高度变化的更大。在中纬度海平面处的典型值约为 30 毫拉德/年。

在自然环境中存在的天然放射性核素可分为两类：一类是宇宙射线的粒子与物质相互作用不断产生的；另一类则是地球形成时本来就存在着的放射性核素以及它们的不断衰变的产物。而地球辐射就是由以不同数量存在于所有土壤、岩石、大气和水体中的这些天然放射性核素发出的，也包括这些放射性核素经由食物链或吸入转移到人体并沉积于人体组织中所发出的辐射。因此，地球的放射性就造成了对人的体外和体内两方面的照射。全世界绝大部分居民受到来自地球的内照射和外照射剂量率分别为 20 毫拉德/年和 50 毫拉德/年的照射。

上述在自然环境中本来就存在着的宇宙射线和天然放射性物质，我们统称之为天然放射性本底。它是判定环境是否受到放射性污染的唯一基准。天然辐射的来源及照射剂量列于表 8-1：

表 8-1 天然辐射之来源及世界居民所受的照射剂量

		来 源	照射剂量: 毫拉德/年		
			内	外	
天	宇宙射线	初级的宇宙射线 次级的宇宙射线	地球外层空间	30	/

天然 辐射	地 球 辐 射	氡、 ¹⁴ 碳等		宇宙射线产生的	50	20
		无衰变系列的天然放射性同位素： ⁴⁰ 钾、 ⁸⁷ 铷等				
	属于天然放射性系列	铀： ²³⁸ U, ²³⁵ U 钍： ²³² Th 镭： ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra ²²² 氡、 ²²⁰ 氡和它们的短寿命衰变产物 ²²² 氡的长寿命衰变产物	原先的，即地球生成时本来就存在的			

对环境造成放射性污染的人工污染源，主要有：核武器试验，核工业排放的各种放射性废物，以诊断医疗为目的所使用的电离辐射源和放射性同位素，以及带有各式各样的辐射源的各种装置设备（如夜光钟表、电视机）等。

由核试验造成对环境的污染在1963年达到了最高峰⁽²⁾，西德1963年对居民所受天然和人工辐射的剂量进行了调查，据他们发表的资料表明，来自核试验沉降物的照射约占当时人工辐射剂量的一半，年剂量率可达20—25毫拉德。自从1963年美苏签订“部分核禁试条约”，核试验对环境的污染已大为降低，1970年沉降物仅为1963年的十分之一左右。据联合国原子辐射影响问题科学委员会1972年的报告中估计，1955—1970年世界上所有大气层核试验产生的放射性环境污染对全世界人口造成的平均照射剂量（包括内、外照射）约为4毫拉德/年。

目前，由于辐射在医学上的广泛应用，已使医用射线源成为主要的环境人工污染源。据美国国际放射防护委员会主席摩尔根在1969年的估计，在美国由人工辐射源产生的有遗传意义的剂量当量中，医学照射占94%，而核试验环境污染产生的照射剂量仅占4—5%，其余的1—2%则由其他人工源如职业照射、彩色电视、夜光表等产生的。但应指出，虽然这种放射学诊断检查每年都要增加百分之几，但即使在发达国家和地区，由于医疗水平和习惯，发展也很不平衡，何况在世界上大部分居民还不容易接近这些现代化的医用设备，因此医疗照射剂量的统计结果常常相差几倍，甚至二、三十倍。如泰国1970年的调查有遗传意义的剂量最大仅为5.17毫拉德/年（占人工辐射源产生的56.4%），而美国国家科学院1970年估计，美国每人受到医疗照射剂量年平均可达73毫拉德/年。

人工辐射的来源及其照射剂量估计示于表8—2。

表8—2 人工辐射的来源及其照射剂量估计^(7, 3)

分 额	来 源	年 剂 量 估 计					
		美国1969、1970		西 德 1963			
		毫拉德/年	%				
人	放射性沉降物	核 试 验	大 地 气 层 下 他	3—4	4—5	21*	50

工 辐 射 源	放射性三废	核 工 业	矿 水 冶 厂 铀精制厂及元件加工厂 气体扩散厂 反应堆 核燃料后处理厂 核企业事故	0.003			
	医疗辐射	致电离辐射源		72	约94	18	43
		放射性同位素药物		1			
	其 他	辐射源失控			1—2	3	7
一般民用							

* 来自核试验的沉降物的污染在1963年达到了最高峰，大约是1970年沉降物的十倍。

二、天然放射性本底

前已述及，人类从来就处于天然辐射的照射之中。这些辐射有来自地球外的宇宙射线和来自地球环境本身的天然放射性核素的辐射。“天然放射性本底”就是表示这种自然界本来就存在的高能辐射和放射性物质。

天然放射性本底的调查与研究一直是为人们所重视的，这不仅是因为它可提供关于小剂量辐射对遗传效应的研究数据，更主要的还因为在环境污染的放射性监测中，它是判定人工辐射源是否造成环境污染的重要基准。

当然，人们最关心的还是“天然放射性本底”对于人类的照射。这种本底辐射的剂量平均为每年 100 毫拉德，少数高本底地区可高十倍，统计表明，在天然辐射中，四分之一（约 25 毫拉德）来自宇宙射线，二分之一左右（约 50 毫拉德）来自地球辐射，包括空气中的氡等，另有四分之一来自体内的放射性。

1. 宇宙射线

前已述及，宇宙射线表示地球之外宇宙间存在的混杂的高能辐射。我们将从外层空间进入地球大气的高能辐射称为初级宇宙射线，当初级宇宙射线和地球的大气物质碰撞立即产生的各种次级粒子和电磁辐射，称之为次级宇宙射线。

初级宇宙射线 初级宇宙射线的起源目前仍不很清楚。但是，我们知道，大部分观察到的辐射起源于我们的银河系。此外，在太阳活动期间，也会由太阳产生太阳宇宙射线。

初级银河系宇宙射线主要由高能质子组成的，它是由星际空间进入太阳系的，除了质子外，约有 10% 的 ^4He 离子。还有一小部分重粒子、电子、光子和中子。初级宇宙射线近似荷电组分列表 8—3。其粒子的能量，从几十亿电子伏到上限约为 10^{17} — 10^{19} 电子伏。

表 8—3 1952年和1954年在北纬51度上初级银河系宇宙射线成分

质 子 数	垂直通量密度，粒子/米 ² ·秒·立体弧度
1	1300
2	88
3—5	1.9
6—9	5.7
10—19	1.9
20或20以上	0.5

在能量为 10^{10} 电子伏以下的初级宇宙射线，有两种作用过程使其通量密度发生变化。一是受地球磁场的影响，使低能荷电粒子偏斜而返回到空间去。这个影响与纬度有关，在极区，荷电粒子的偏斜远比赤道为小。其结果，宇宙射线的强度随地球纬度的降低而减小，赤道和纬度 45° 之间差别最大。在海平面，纬度的影响仅是10%，但是随着海拔高度的增加而影响增大。另一点低能质子通量密度的强度也随11年的太阳活动周期而变化，在太阳活动最大期间密度最小，反之为最大，这个现象称为调制。

次级宇宙射线 当初级宇宙射线粒子进入大气时，其高能粒子与大气中元素的粒子产生核反应，低能粒子因电离而损失能量。在发生核反应时，产生次级的质子、中子和介子，这许多次级粒子具有足够的能量，能进一步与氮和氧核发生各种各样的核反应，并生成很多反应产物，其中较重要的有 ^3H 、 ^7Be 和 ^{10}Be 等，宇宙射线在大气中产生的放射性核素，已探测到的共有20种，（见表8—4）。从辐射剂量的观点来看，值得重视的只有碳—14，其次是氚。

表 8—4 宇宙射线产生的放射性核素

放射性核素	计算的大气产率, 原子/厘米 ² ·秒	半衰期	β 辐射的最大能 量, 千电子伏
^3H	0.20 *	12.3年	18
^7Be	8.1×10^{-2}	53天	电子俘获
^{10}Be	4.5×10^{-2}	2.5×10^6 年	555
^{14}C	2.5	5730年	156
^{22}Na	8.6×10^{-5}	2.6年	545(β^+)
^{24}Na	3.0×10^{-5}	15.0小时	1389
^{28}Mg	1.7×10^{-4}	21.2小时	460
^{26}Al	1.4×10^{-4}	7.4×10^5 年	1170
^{31}Si	4.4×10^{-4}	2.6小时	1480
^{32}Si	1.6×10^{-4}	700年	210
^{32}P	8.1×10^{-4}	14.3天	1710
^{33}P	6.8×10^{-4}	25天	248
^{35}S	1.4×10^{-3}	87天	167
^{38}S	4.9×10^{-5}	2.9小时	1100
^{34}Cl	2.0×10^{-4}	32.0分	2480
^{36}Cl	1.1×10^{-3}	3.1×10^5 年	714
^{38}Cl	2.0×10^{-3}	37.3分	4910
^{39}Cl	1.4×10^{-3}	55.5分	1910
^{39}Ar	5.6×10^{-3}	270年	565
^{81}Kr	1.5×10^{-7}	2.1×10^5 年	电子俘获

* 引自参考文献13。

宇宙射线的剂量 由上述的介绍可以看出射线中致电离的成份和中子成分所产生的剂量。经近三十年来的研究表明，由宇宙射线照射产生的剂量率都是相当恒定的，但随纬度而

变化，中纬度海平面处典型值约为30毫拉德/年，而且随高度变化更大，大约每升高1.5公里，剂量率就增加一倍。

还必指出，由于超音速运输飞机系统的大规模发展，还提出一个乘客和机务人员将接受宇宙射线照射的剂量率问题，这不仅是因为在高空处的剂量率始终要比低空的高，而且还可能偶尔由于耀斑产生强烈太阳质子流，使剂量率在短时间内大量增加；若在11年的太阳活动周期期间，那种银河系宇宙射线强度还有约两倍的变化。虽然，目前超音速飞机一般都带有辐射警报装置，当剂量率超过规定的水平时，使驾驶员能够采取躲避行动，把飞机驾驶到较低的高度去。无论如何，当在12公里高度航行着的普通喷气机中，吸收剂量率约为600微粒德/小时或0.7微拉德/公里；在20公里高度航行的超音速飞机中，吸收剂量率是1700微粒德/小时，这也近似地相当于0.17微拉德/公里*。

2. 地球辐射

地球辐射是由以不同数量存在于所有土壤、岩石、大气和水体中的那些放射性核素发出的，还包括这些放射性核素经由食物链或吸入转移到人体并沉积于人体组织内所发出的辐射。因此，地球的放射性就造成了对人的体外和体内两方面的照射。

内照射 天然放射性核素分成两类：一类是宇宙射线的粒子与物质相互作用不断产生的；另一类则是地球形成时本来就存在着，即原生的放射性及它们的衰变产物。

前已述及，由宇宙射线产生的放射性核素有20种，下面仅从辐射剂量的角度讨论其中两种重要核素。

氡——约有90%的天然氡存在于水圈中，10%在平流层。地表水中天然存在的氡，是高能宇宙射线在大气中与氮和氧相互作用而产生的。最近，直接测定它的产生率为 0.20 ± 0.05 核/Cm²·秒。这个数值相当于生产率为1.6兆居里/年，也相当于在稳定状态下生物圈中氡的贮量为28兆居里。假定人体内和地面水的氡氢比基本相同的情况下，计算出的天然氡产生的内照射（对软组织）剂量率在0.6—2.5微拉德/年的范围。

还应指出，环境中氡的人造来源也是不可忽视的，由于核爆炸（其中大部分是热核反应中没有用完的氡）将有大量的人造氡被释放到环境中来⁽¹⁵⁾，核动力工业废物排放也占有不少的份额。

¹⁴碳——碳是所有形式的生命的基本元素之一，因此，它参与了地球上大多数的生物过程和地球化学过程。¹⁴碳与稳定同位素¹²C（98.89%）和¹³C（1.11%）共存，通常其含量极少而且变化不定。

天然¹⁴C是宇宙射线的中子在高层大气同氮相互作用，按¹⁴N(r, p)¹⁴C核反应产生的，目前还不确知其产率，但最近由计算得到在一个太阳活动周期内的平均产率为 2.5 ± 0.5 原子/秒·厘米²和 1.98 原子/秒·厘米²。若产率取2原子/秒·厘米²，则相当于年产率为0.03兆居里/年，也相当于稳定态的贮量为280兆居里β。核试验和热核试验对大气中¹⁴C的增加也有贡献。

¹⁴碳存在于大气的二氧化碳中、地球的生物圈中和溶于海洋的碳酸氢盐中，对十九世纪生长的树木进行测定得到的地球生物圈中天然放射性为 6.13 ± 0.03 微微居里/克碳。人体全身平均碳含量为18%，若其比放取6.1微微居里/克碳，则整个人体的平均剂量将有1.02毫

* 以上皆假定其线质因数为1.0。

表 8—5 一些无衰变系列的原生放射性同位素

放射性核素	在岩石圈里的丰度(PPm)	半衰期, 年	α 射线的能量或 β 射线的最大能量·千电子伏(1)	γ 射线能量Kev(1)
40K	3	1.3×10^9	β 1314 (89)	1460(11)
50V	0.2	6×10^{15}	β ? (30)	783(30), 1550(70)
87Rb	75	4.8×10^{10}	β 274 (100)	
115In	0.1	6×10^{14}	β 480 (100)	
138Ia	0.01	1.1×10^{11}	β 210 (30)	810(30), 1426(70)
147Sm	1	1.1×10^{11}	γ 2230 (100)	
176Lu	0.01	2.2×10^{10}	β 430 (100)	88(15), 202(85), 305(95)

(1) 括弧里的数字表示每次衰变的百分产额

在无衰变系列的那些天然放射性核素中, 只有 ^{40}K 和 ^{87}Rb 是重要的, 它们的化学性质相类似。

^{40}K ——尽管 ^{40}K 的同位素丰度仅为 0.0118%, 但它却是内照射的主要天然来源。土壤中 ^{40}K 的放射性强度比 ^{238}U 和 ^{232}Th 平均高一个数量级。在海水中, ^{40}K 的放射性占总放射性的绝大部分, 其浓度约为 300 微微居里/升。钾主要是通过食物进入人体的, 在人体中钾的含量是极其稳定的, 因此食物成分的改变对所受辐射的剂量影响很小。也就是说, 钾在食物链中的行为对于估计人体所受到的照射量没有实际意义。体内钾的含量因组织和器官不同而大不相同, 一些组织如肌肉、脑和血液细胞含量最高, 约 0.3% 的钾, 在骨中约为湿骨头(不带骨髓)重量的 0.05%, 而脂肪中则不含钾, 根据组织中平均钾含量为 0.2%, 可以算出软组织的剂量率最高, 达 19 毫拉德/年, 骨髓中剂量稍小, 为 15 毫拉德/年。

^{87}Rb ——纯 β 辐射体 ^{87}Rb 的同位素丰度是 27.85%, 铷在全身的平均浓度为百万分之十七; 而在骨、卵巢和睾丸中, 其含量分别为 10, 4.5 和 12 微克/每克湿组织。根据 ^{87}Rb 在体内的浓度, 估计了由于它的衰变而在全身造成的剂量率约为 0.6 毫拉德/年, 性腺的平均剂量率约为 0.3 毫拉德/年。

铀和钍在整个地壳中广泛分布着, 平均说来, 它们的放射性浓度相同, 在其衰变链中, 铀和钍通过土壤到植物而进入生物圈, 然后再到食草动物和人体, 位于衰变链后面一点的氡是一种气体, 它以某一比例离开土壤进入大气并衰变成固体元素的同位素, 成为环境中放射性重要的贡献者。属于铀系和钍系的放射性核素, 我们可以将其分成四个单独子系来考虑, 即: 铀*、 ^{232}Th ; 镭和 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 和它们的短寿命衰变产物以及 ^{222}Rn 的长寿命衰变产物。

铀——联合国原子辐射效应科学委员会 1966 年曾估计在岩石圈中 ^{238}U 的代表性含量约为 2.8PPm, 一般说来, 火成岩和花岗岩比沉积岩含铀的浓度高, 然而某些海洋起源的沉积岩含铀浓度却很高, 空气含铀量很少, 城市空气中观测到的浓度从 10 微微克/立方米直到 1500 微微克/ M^3 不等。海水中铀的浓度分布是相当均匀的, 浓度为 2—3.7 微克/升(在沿海岸的水含铀量较低), 而在淡水中, 铀的浓度变化很大, 在 0.024—200 微克/升的范围内。有关铀在人体及其食物中的浓度的资料很少, 在英国、美国、苏联和法国, 看来代表性摄入量

* 在高浓度情况下, 对铀的同位素应考虑它们的化学毒性问题, 而不是其放射危害。

量为每天1微克，而在苏联的某一地方却达到了每天30微克，采用 Spiers方法计算所得到的在一些组织中的相应剂量在0.03—0.8毫拉德/年。

²³²钍——象铀一样，钍在酸性岩石中比在碱性岩石中含量更丰富些。在独居石中，钍的含量可达10%，巴西和印度一些地区这种矿石特别丰富。钍主要通过各种物理—化学过程很容易被植物根部吸收，但钍在嫩枝中的浓度与镭相比较都是微不足道的，虽然不曾看到关于²³²Th摄入量的资料报道，但据肋骨的测量结果也极少结果表明，成年人的平均含量大约为 1×10^{-15} 居里/克灰，此值比铀的水平约小一个数量级。

镭——钍的同位素(²²⁶Ra和²²⁸Ra等)一般都与其母体处于平衡状态，并以不同的强度存在于各种类型的土壤中平均说来，²³²Th和²³⁸U具有大约相同的放射性浓度。我们知道，从地面上飞扬起来的气载微粒物质就构成了天然本底浓度，假定大气中镭和铀的放射性强度相同，则估计在城市空气中的浓度为 7×10^{-18} 居里/米³左右。使用化石燃料的动力工厂释放出很少量的镭，可在这些工厂周围的空气中探测到它。由于烧煤而散逸到空气中的²²⁶镭，估计其最大量每年可达150居里。在海洋表面水中，²²⁶Ra的含量低而且相对稳定，其值约为0.05微微居里/升；²²⁸Ra的浓度低于²²⁶Ra。在淡水中，²²⁶Ra的含量变化很大，典型值约在0.01—1微微居里/升的范围之内。在矿泉水中发现其最高浓度可达100微微居里/升。从地面水中抽上来的饮用水，一般含镭量不大。凝聚作用和水的软化过程一般是可以清除掉水中大部分镭的。在美国、阿根廷、英国、印度和法国等国的正常辐射本底的地区，²²⁶Ra的平均摄入量约为1微微居里克钙(见表8—6)。

表8—6 不同种类食品对²²⁶Ra和²²⁸Ra总摄入量的贡献

	正常的外照射本底地区								高水平外照射本底地区			
	²²⁶ 镭								²²⁸ 镭		²²⁶ 镭	²²⁸ 镭
	阿根 廷	法 国	印 度	英 国	美 国	美 国	美 国	印 度	美 国	印 度	喀 拉 拉 邦	喀 拉 拉 邦
[49]	[26]	[50]	[51]	[52]	[53]	[53]	[54]	[47]	[47]	[50]	[55]	
稻谷和玉米产品	0.20		0.42	0.39	0.17	0.56	0.39		0.42	0.37	1.48	3.23
肉、鱼、蛋	0.14		0.05	0.08	0.38	0.46	0.07		0.14	0.08	0.50	62.70
牛奶和奶制品	0.05		0.04	0.01	0.14	0.14	0.05		0.05	0.10	0.19	15.30
新鲜蔬菜、水果和豆类	0.23		0.17①	0.05	0.32	0.54	0.24		0.44	0.38	0.81	9.17
根类蔬菜	0.14				0.10	0.06	0.04		0.12	0.08		29.58
水			0.06	0.02	0.70	0.02	0.03				0.29	0.01
其他	0.01		0.02								0.07	42.50
总量，微微居里/天	0.8	1.1	0.8	0.5	1.2	1.8	0.8	0.7	1.2	1.0	3.3	160
总量，微微居里/克钙	1.1	1.1	1.6	1.0	1.1	1.8	0.8	1.3	1.2	1.0	6.6	320

①蔬菜、水果和豆类。

大约有80—85%的镭含于骨骼中，而其余部分则近似均匀地分布在软组织中。在人的骨骼中镭的积存量变化不大，一个人的骨骼中积存量约为40微微居里的 ^{226}Ra 和小于20微微居里的 ^{228}Ra 。在人体中含有1微居里的 ^{226}Ra 及其子代产物相当于骨骼所受的平均吸收剂量率为0.003毫拉/年（或相当平均剂量当量率0.28毫雷姆/年*）。在高水平外辐射本底地区，其摄入量则大大超过正常水平。

^{222}Rn 、 ^{220}Rn 和它们短寿命衰变产物——这是地面附近空气中放射性的主要组成部分。由于大陆 ^{222}Rn 的发射率是海洋发射率的500倍，而且 ^{220}Rn 的这个比值可能更大，因此，大陆是 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的主要来源。近地面大气中 ^{222}Rn 浓度的日变化与垂直湍流混合系数有相反的变化关系，即典型的 ^{222}Rn 浓度在清晨有一最大值，而在午后出现最小值，且最大值与最小值的比值在夏天最高（为10或更大），秋天最低。 ^{220}Rn 也有类似的关系。在正常发射情况下，地面上1米处 ^{220}Rn 的浓度与 ^{222}Rn 的浓度大约相同，即为0.04—0.4微微居里/升。室内空气中 ^{222}Rn 与其子体的浓度（见表8—7）则一般取决于其在室外空气中的浓度、墙壁 ^{222}Rn 的发射率以及室内换气速率。

表8—7 住宅内的 ^{222}Rn 浓度

被调查的地点	建筑物数目	建筑物类型和建筑材料	室外 ^{222}Rn 的浓度 微微居里/升		室内 ^{222}Rn 的浓度 微微居里/升		说 明
			范 围	平均值	范 围	平均值	
波兰	28	公寓住宅—混凝土	0.06—0.16	0.11	0.14—2.14	0.44	在相同通风情况下的测量结果
	8	凝聚料	0.06—0.09	0.08	0.26—1.10	0.35	
	6	砖			0.08—0.37	0.19	
瑞典	55	住宅—木			0.3—0.9	0.54	每小时换气4次
	87	砖			0.3—2.1	0.91	
	83	混凝土（含有明矾片岩）			0.3—4.5	1.86	
苏联		硅酸盐砖			0.12—4.3		
		红砖			0.19—1.10		
		混凝土			0.4		
		土坯			0.3—10.0		
		矿渣			4.0—8.0		
英国	1	住宅		0.04	0.06—0.31	0.16	通风良好 } 通风不良 } 通风很差 } 空调 }
	1	住宅		0.13	0.2—0.7	0.4	
	6	工业厂房	0.04—0.19	0.09	0.005—1.2	0.3	
	4	办公楼		0.04	0.06—0.35	0.17	

* 镭在骨中的分布是不均匀的，所以若镭集中在骨的某些部分则在这些区域的剂量率也许会高达平均剂量率的好几倍。

美国: 波士 7 顿地区	供一个家庭用的单 栋住宅	0.01—0.15	0.05		每小时换气 次数:
	第一层 (木结构)			0.005—0.23	0.07 地下室1—3 次
	地下室 (混凝土)			0.1—0.94	0.40 第一层2—6 次
3	公寓住宅—砖			0.01—0.19	0.09 每小时换气 次数: 5—9 次
4	办公室和实验室			0.02—0.10	0.05 每小时换气 次数: 5—12次
田纳西……15	住宅—大都是混凝 土结构			0.13—4.8①	1.40 } 有空调的建 筑物
佛罗里达…16				0.03—3.6①	1.26 } 佛罗里达的 换气速率可 能比田纳西 高, 因为其 室外温度分 别是23°C和 0°C.
纽约……				0.13	0.25

①是在假设氡及其子体的平衡比为 1/0.9/0.6/0.4 的条件下, 由资用水平单位换算过来的。

所以若处于通风差, 且墙壁因建筑材料之来源及性质 (多孔性等) 所致, 则可能使其氡的平均浓度比室外高几倍。表 8—7 给出一些国家住房内的 ^{222}Rn 浓度的调查结果。在 1 米深的海水中, ^{222}Rn 的平均能度约为 0.02 微微居里/升, 而在淡水中, ^{222}Rn 的浓度则在小于 1 微微居里/升 (在一些表面水内) 到大于 5×10^5 微微居里/升 (在某些矿泉水中) 的范围内。对于地下水, 其典型浓度为几个毫居里/升。沸腾时将使水中大部分 ^{222}Rn 得以除去。根据研究结果得知, 吸入 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 后, 由于肺的沉积和清除作用, 接受剂量最高的是段支气管区域的基底细胞核, 由此而推算出的剂量是为 5 毫拉德/年; 而食入溶解于水的 1 微居里的 ^{222}Rn , 将造成胃部剂量为 20 毫拉德左右, 对其它器官的剂量至少要低一个数量级。假定每天消费 0.3 升淡水 (^{222}Rn 含量为 1 毫微居里/升), 则对胃的年剂量大约是 2 毫拉德。

^{210}Pb 和 ^{210}Po ——大气中的 ^{210}Pb 和它的衰变产物 ^{210}Po (都是 ^{222}Rn 的长寿命衰变产物) 的主要来源是地面发射的 ^{222}Rn 。在一个指定地区, 地面空气中 ^{210}Pb 之平均浓度取决于该地点 ^{222}Rn 的发射率和全球范围的空气循环模式。Karol 计算了大气中 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 的总含量分别为 20×10^3 — 26×10^3 居里和 2.4×10^3 — 5.7×10^3 居里, 在英国、印度、和新西兰测定了 ^{210}Pb 经由雨水的年沉积率平均为 3 毫居里/公里², 这意味着, 在平衡的情况下, 土壤上层的放射性大约为 80 毫居里/公里², 雨水中 ^{210}Pb 的水平约为 1—5 微微居里/升, ^{210}Po 为 ^{210}Pb 的 1/5—1/10。在地表水中, ^{210}Pb 之浓度通常仅为雨水的 1/10—1/100。然而在富集氡的水中 (例如矿泉水和某些井水中), 常可达到雨水中的水平。在北半球中纬度地带, 地面附近空气中 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 的平均浓度分别为 15×10^{-15} 居里/米³ 和 1.5×10^{-15} 居里/米³。假定 24 小时内摄入 20 米³ 空气, 则人体每天吸入 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 的量分别为 0.3 和 0.03 微微居里。若采用 0.3 作为 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 进入血液的转移系数, 则每天进入血液的总量小于 0.1

微微居里。另一个摄入是来自吸烟，一天抽 20 支卷烟的人，就要摄入 0.3—0.8 微微居里的 ^{210}Pb 和 0.4—1.4 微微居里的 ^{210}Po ，如果采用上述同样的转移系数，则相应进入血液中的 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 总量为 0.2 和 0.3 微微居里/天。然而应该指出，这仅是极粗略的估计值，实际上由于吸入条件和颗粒大小的分布等将有很大的差异。对于不吸烟的人，他们摄入 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 的主要途径是通过食物。在所谓西方式食品（以牛奶消耗量大为其特征）中， ^{210}Pb 的摄入量在 1—10 微微居里/天的范围内，粮食、肉类和蔬菜对 ^{210}Pb 的贡献大约相同，在这类食品中， ^{210}Po 和 ^{210}Pb 的比值约为 1。假定胃肠对 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 的吸收系数分别为 0.08 和 0.06，则每天摄入 5 微微居里就会导致每天有 0.4 微微居里的 ^{210}Pb 和 0.3 微微居里的 ^{210}Po 进入血液。吃海产食品多的地区，如日本，其摄入量相对地要高些，每天摄入达 12 微微居里的 ^{210}Pb 。在人体组织中， ^{210}Pb 和 ^{210}Po 的放射性浓度主要取决于这两种元素的直接摄入量。摄入人体后， ^{210}Pb 大部分浓集在骨中，占全身贮存量的 70% 以上，在北温带测出的鲜骨头中 ^{210}Pb 之浓度约为 40 微微居里/公斤。在软组织中，肝、膀胱和性腺的平均含量的典型含量是 5—10 微微居里/公斤。但头发是一个例外，在其生长期中，浓集 ^{210}Pb 的总量比骨多些。所以，在职业中毒的情况下，可用测定头发中 ^{210}Pb 的含量来估计上月接受这种核素照射的总照射量。 ^{210}Pb 衰变链对人体组织造成的辐射剂量主要是由 ^{210}Po 的高能 α 粒子决定的。这是因为在平衡的情况下， ^{210}Pb 和 ^{210}Bi 的 β 辐射的贡献反为 ^{210}Po 的 7.5%，可以被忽略。如果骨中 ^{210}Pb 的放射性浓度取为 40 微微居里/公斤，则利用 Spiers 方法算出的居民骨组织中的年剂量达 4 毫拉德（骨细胞）。

外照射 当天然放射性系列的核素以及 ^{40}K 等存在于地表几厘米深处时，就会在地面附近产生 γ 辐射。对于不同类型的岩石和土壤，这些天然放射性核素的浓度变化很大。在火成岩（如花岗岩）中浓度最高，而在沉积岩（例如石灰石或沙石）中浓度最低。当这些天然放射性核素存在于建筑材料和铺路材料中时，也会对人产生外照射剂量。据近期在三个国家全国范围内所测得的室内和室外的空气剂量率的平均值约为 60 毫拉德/年，为了转换成组织（比如骨或肌肉）中的剂量率必须乘以组织/空气剂量转换系数，考虑到照射为外照射，还应乘以屏蔽系数，对于性腺和骨髓的屏蔽系数可取 0.63 和 0.64。前者组织/空气剂量转换系数可采用国际辐射单位与测量委员会（ICRU）对能量为 0.5—10 兆电子伏特的 γ 射线所给出的数值 1.10。两者乘积为 0.7，这个转换系数适用有室内，室外照射可采用 0.8，若假定每天有 7 小时在室外，则测得的平均转换系数是 0.73。这样空气剂量率为 60 毫拉德/年和平均转换系数 0.73 的乘积即为性腺和骨髓的吸收剂量率——44 毫拉德/年。

表 8—8 汇总了在“正常”地区天然源引起的内外照射的剂量率，由此可以看出广大居民由天然源所受的年平均剂量约为 100 毫拉德。

表 8-8

照 射 源	剂 量 率, 毫 拉 德/年					附件正文中 的节数
	性	腺	骨的衬细胞	骨	髓	
外照射						
宇宙射线:						
致电离成分	28	(28)	28	28	(28)	93
中子成分	0.35	(0.7)	0.35	0.35	(0.7)	94
地球辐射 (包括空气辐射)	44	(50)	44	44	(50)	95
内 照 射						
³ H	0.001	(-)	0.001	0.001	(-)	96
¹⁴ C	0.7	(0.7)	0.8	0.7	(1.6)	97
⁴⁰ K	19	(20)	15	15	(15)	98
⁸⁷ Rb	0.3	(0.3)	0.6	0.6	(<0.3)	99
²¹⁰ Po	0.6	(0.3)	1.6	0.3	(0.3)	100
²²⁰ Rn	0.003)	(-)	0.05	0.05	(-)	101
²²² Rn	0.07	(0.3)	0.08	0.8	(0.3)	102
²²⁶ Ra	0.02	(-)	0.6	0.1	(0.03)	103
²²⁸ Ra	0.03	(-)	0.8	0.1	(0.03)	103
²³⁸ U	0.03	(-)	0.3	0.06	(-)	104
总计 (整数)	98	(100)	92	89	(96)	
α 离子加中子所占的百分数	1.2	(1.3)	4.1	1.2	1.4	

三、核试验的环境污染

1. 核试验环境污染的由来及分布

核爆炸的环境辐射 核武器是利用核的裂变或聚变反应时急剧释放出来的巨大能量, 去起杀伤和破坏作用的一种武器。目前, 核武器大体有裂变武器 (又称原子弹) 和热核武器 (又称氢弹) 两种类型。它们和普通炸药武器相比, 除了威力大, 温度高 (爆炸中心的压力达到几十亿到几百亿大气压, 温度升到几百万到几千万度) 从而产生强烈的冲击波和热辐射外, 还有一种明显的差别是, 核爆炸的瞬间能产生穿透性很强的核辐射 (主要是中子和 γ 射线), 并在爆炸后留下一些不断放射 α 、 β 和 γ 射线的放射性物质污染环境。我们将前者称为瞬时核辐射, 而后者称为剩余核辐射。它们都是造成局部或广大地区放射性污染的来源, 特别是剩余核辐射危害性更大。

剩余核辐射有三个来源: (1) 裂变材料反应后生成的裂变产物 (又称裂变碎片), 它包含大约 200 多种属于 36 种元素 (从镅到钷) 的同位素; (2) 没有起反应的残余核材料, 如 ²³⁵U、²³⁹钚和氙等; (3) 感生放射性物质, 即核爆炸时产生的中子同弹体材料及周围空气、土壤和建筑材料中某些元素发生核反应生成的放射性物质, 如空气中的氮同中子反应后

生成放射性¹⁴碳，在土壤和水中的钠、铁、锰、硅等与中子反应后生成放射性²⁴钠、⁵⁹铁、⁵⁶锰和³¹硅等。

由此可见，核试验所产生的环境污染与武器威力和武器中裂变材料所占的比例有密切关系，同时也与装药燃烧程度和爆炸方式及环境条件等有关。一般地说，威力越大和所含的裂变材料越多，对环境的污染越严重。在五种试验方式中以地面核试验的污染最严重，大气层试验次之，地下核试验最少；水下试验和外层空间试验一般较少采用。

放射性沉降物的形成与沉降 在大气层进行核试验的情况下，核爆炸时所产生的上述放射性物质在高温下将以气态形式存在于爆炸火球（即俗称蘑菇云）中，随着火球的膨胀和上升，因与空气混合和热辐射损失，温度逐渐降低，这些气态物质便凝结或凝聚成微粒或附着在其他尘粒上，最后沉降到地面。这种沉降下来的带有放射性的颗粒，通常叫做放射性沉降物（又叫落下灰）。在地面爆炸以及火球可以接触到地面的空中爆炸情况下，一开始就有大量碎片状的地面物质（如尘土、石块等）卷入火球，变成熔融状态，一部分变成汽化状态，并与爆炸生成的放射性物质混合，其中部分汽化物质通过凝结和凝聚作用成为颗粒状，如同大气层爆炸一样，但其中大部分将凝聚在大量的融了的地面颗粒表面，因此，此种核试验的放射性沉降物大为增加。

放射性沉降物（烟云）是沿着大气环流运行的，并受重力和风的合力影响，以合力的方向运行直至沉降到地面。根据放射性沉降物的运行和沉降的不同，一般分为三种类型。

一类是颗粒较大的干性灰尘颗粒，在重力作用下于爆炸后几小时到一天内很快降落在爆炸区附近和下风方向几十公里到几百公里范围内的地面上，形成一椭圆形或其他形状的强辐射区。这种在附近地区的沉降称为**局部沉降**或**近区沉降**。其沉降量的多少及其分布取决于爆炸高度和当时的气象条件，据国外估计，在地面爆炸时，近区沉降的放射性占总放射性的50~80%。爆炸高度越高，近区沉降越少。在距地面30公里以上进行高空爆炸时，几乎没有近区沉降。

另一类（对流层沉降物）是较为细小的颗粒，（约小于5微米），分布于对流层顶以下的大气层内，并随高空的大气环境从西向东围绕地球运行。无雨时，这些细小颗粒由于相互凝聚作用、静电作用、直接冲撞作用、扩散作用和风力作用等，以惰性沉降方式沉降到地面（即所谓干沉降）。降水（雨和雪）时能从大气中逐渐完全除去这些对流层沉降物（即所谓湿沉降）。湿沉降量可比干沉降量大数倍甚至上百倍。据报道，对流层沉降物在对流层中的停留时间可以几十个小时到几个月，平均滞留时间约为三十天，主要沉降于东半球内。这类沉降物受爆炸高度影响很大。其中裂变产物可占总裂变产物的25%，含有大量半衰期为数日至数十日的核素。

还有一类是能升到平流层的放射性颗粒更小，直径约为0.1微米，因此沉降更慢，因平流层的气流多是东西向，使放射性物质在高空气流带动下绕地球运动，并逐渐加重移向地球两极，然后缓慢下降，所以进入平流层的放射性物质可沉降到整个地球表面。核爆炸所产生的放射性物质在平流层的平均滞留时间与该次爆炸的高度、纬度以及可能还同爆炸的时间有关。对于在中等高度上爆炸的情况，其平均滞留时间大致可达二至三年。在更大高度（超过100公里）的情况，其滞留时间可增加到5年或10年。目前，一般对于⁹⁰锶的平均滞留时间的估计为14个月，这个数值在所有北纬地区似乎是相当稳定的，而¹⁴碳的滞留时间则在2—5年之间。

不同爆炸条件下各种沉降的大致分布情况见表8—9所示。

表 8—9 不同爆炸条件下各种沉降的相对百分比

爆炸方式	100 万吨 以下		100 万吨 以上		
	近区沉降	对流层沉降	近区沉降	对流层沉降	平流层沉降
空中爆炸	0	100	0	1	99
低空和地面爆炸	80	20	79	1	20
水面	20	80	20	1	79

2. 沉降物的放射性成分

放射性沉降物的性质与核武器装料、爆炸方式、核武器的威力、爆炸地区土壤的成份、离爆心的距离以及爆后间隔的时间等有密切关系。

前已述及，放射性沉降物的放射性成分主要是核裂变产物，其次是核爆炸时放射的中子所造成的感生放射性物质（如²³⁹铀等），以及在总的放射性中占比例较小的残余核装料。这些核爆炸产生的放射性污染物质，它们的半衰期各不相同，有的在若干分之一秒内即衰变为稳定的同位素，不再释放射线。有的则在几年、几十年甚至几千年、几万年后仍然具有放射性。这些物质随大气沉降、生态学链锁环节转移最终散布于环境中，一部分对人体造成外照射伤害，一部分则随着各种食物或空气进入人体，在体内造成内照射伤害。但就环境污染和有人体的伤害而言，人们最关心的是产额高、寿命长、摄取量大和能长期存留于体内的放射性同位素。这主要为⁸⁹锶、⁹⁰锶和¹³⁷铯，其次为¹³¹碘、氙、¹⁴碳、²³⁹钚、¹⁴⁰钷和¹⁴⁴铯等。

⁹⁰锶——锶和钙的化学性质是相似的，而钙为参与人体代谢的重要核素，是构成骨骼的主要成分，因此⁹⁰锶主要沉积在骨骼中。⁹⁰锶的沉降量以及它在环境介质中的浓度都与美、苏大气层核试验的次数和当量密切关系。由于⁹⁰锶在平流层中的平均滞留时间约为14个月，故在核试验后1—2年内可见⁹⁰Sr的沉降量有明显的增加。如表8—10^a和表8—10^b所表明的，在1958—1959年和1962—1964年，⁹⁰锶沉降量大幅度增加，就是美苏在1957—1958年和1961—1962年大规模进行大当量大气层核试验的结果。

表 8—10^a 全世界⁹⁰锶的历年沉降量及累积沉降量（百万居里）

	年 沉 积, 兆 居 里			累 积 沉 积 量 兆 居 里		
	北半球	南半球	全 球	北半球	南半球	全 球
1958年以前	1.80①	0.65①	2.45①	1.7	0.6	2.3
1958	0.63	0.25	0.88	2.28	0.84	3.12
1959	1.05	0.18	1.23	3.26	1.00	4.26
1960	0.26	0.17	0.43	3.44	1.14	4.58
1961	0.35	0.17	0.52	3.70	1.29	4.99
1962	1.44	0.26	1.70	5.84	1.51	7.35
1963	2.62	0.31	2.93	7.51	1.78	9.29
1964	1.65	0.42	2.07	8.96	2.16	11.12
1965	0.77	0.36	1.13	9.50	2.46	11.96
1966	0.32	0.21	0.53	9.59	2.68	12.27