



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



现代原子核物理

环境辐射监测技术



肖雪夫 岳清宇 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

第1章 概 论

1.1 引 言

环境是人类和其他生物赖以生存的自然条件的总和。《中华人民共和国环境保护法》指出：“本法所称环境是指：大气、水、土地、矿藏、森林、草原、野生动物、水生生物、名胜古迹、风景游览区、温泉、疗养区、自然保护区、生活居住区等。”生物是环境的产物，大多数生物集中生活在大气、水体和陆地相邻的区域中。动物的存在，一方面受环境支配，另一方面也影响着环境。人类则主要通过自己的劳动来改造环境。人类的生产和生活实践改变了原来的自然条件，改变了环境质量，进而影响了人类的生产与生活。人类保护环境的目的实为保护人类的自身。

大气、水和土地是环境的基本成分。在大气、水和土地中，自地球形成以来就存在天然放射性。1894年法国物理学家亨利·贝克勒尔首先发现天然放射性。两年后的1896年居里夫妇发现天然放射性元素镭。随着核反应堆和加速器的建造，各种人工放射性核素不断产生，尤其是从20世纪40年代以来核武器试验产生的放射性落下灰在全球范围的沉降，人类生活的环境中不仅存在天然放射性核素，也存在人工放射性核素。此外，来自宇宙空间的宇宙辐射及其与大气的相互作用所产生的放射性核素（即宇生核素）也包括在天然辐射之中。所谓环境电离辐射水平，是指上述广泛存在于人类生存环境中的宇宙辐射、宇生核素、天然核素（即原生核素）和人工放射性核素产生的电离辐射剂量。

随着核能的开发，核技术的应用，特别是核事故的发生，环境辐射监测更为世人所关注，尤其在欧洲。切尔诺贝利事故发生以后，截至2006年，欧洲30个国家，先后共建立环境监测网点4113个，总部设在国际原子能机构（IAEA）的国际核应急网络2008年2月也开始运行。近年来，我国环境保护部已在全国32个省、市、自治区设立了180个环境 γ 剂量率连续监测点，并正在逐步增建更多的此类监测点，形成覆盖中国大陆地区的环境监测网系统。

1.2 环境电离辐射监测目的和对监测方案的要求

1.2.1 监测范围

目前，国内外开展的环境辐射和放射性监测主要有以下几个方面：

- (1) 全国或局部范围的环境辐射本底调查；
- (2) 建材和居室内（Rn）放射性水平测量；
- (3) 放射性物质丢失的寻测；
- (4) 核设施常规运行时的环境监测；
- (5) 核事故应急监测；
- (6) 核设施退役的环境监测；

(7)核恐怖监测(包括防范监测)。

1.2.2 监测目的^[1]

环境辐射监测的目的主要包括以下几个方面:

- (1)评价核设施对放射性物质包容和排出流控制的有效性;
- (2)测定环境介质中放射性核素浓度或空气吸收剂量率的变化;
- (3)评价公众受到的实际照射及潜在照射剂量,或估计可能的剂量上限值;
- (4)发现未知的照射途径和为确定放射性核素在环境中的传输模型提供依据;
- (5)出现事故排放时,保持能快速估计环境污染状态的能力;
- (6)鉴别由其他来源引起的污染;
- (7)对环境放射性本底水平实施调查;
- (8)证明是否满足限制向环境排放放射性物质的规定和要求。

总之,环境电离辐射监测的最终目的归结为评价电离辐射对人类的影响。

环境电离辐射监测具有上述广泛的目的和内容,其着眼点可以是居民所受的全部剂量,也可以是某一实践对环境电离辐射场或环境介质中放射性浓度所引起的变化。

1.2.3 监测方案要求^[2]

监测方案要求包括以下内容。

(1)监测要有明确的目的性,所测量量的确切含义、统一的登记表格格式和计算方法等,所有这些都要有书面材料,明文规定。

(2)有若干种可以相互核对与补充的稳定可靠的测量手段,并有明确规定的操作与计算方法。监测中应包括有累积测量能力的监测手段,如热释光剂量计,以及对一些固定点的剂量率的变化进行观测和分析的计划。

(3)有统一的仪表校准(包括区分宇宙辐射成分)与性能检验(包括自身污染的检验)的条件和制度,并有记录。

(4)合理有效的布点与测量周期的规定,并且要有所有布点的测量与部分布点深入观测和分析的有机结合。为了使所测数值具有代表性,要有该区域的粗测结果和可能污染源分布数据。

(5)要有比对,以考虑不同小组和不同测量手段所得结果是否矛盾。这是统一量值的最主要手段。在环境监测中,“可追溯性”是非常重要的。为此最好有:①典型的环境基准点;②大淡水水体表面(此处地面辐射很少,主要为宇宙辐射);③低剂量的标准照射条件;④有良好屏蔽的低本底空间。

(6)为正确解释、分析与使用所测结果,所需要的专门的剂量学研究。

(7)与其他环境监测项目的联系及统一考虑。

(8)数据资料的整理、分析与保存,主要数据应有副本作为档案分地保存。

(9)延续性,一方面要求持之以恒,另一方面在用新的测量手段代替原来的手段时,必须有新旧手段同时使用的一段时间,并在典型环境基准点与典型季节条件下,求出新旧两种手段对应关系,以防旧数据完全报废。这种替换务必审慎进行。

1.3 环境辐射场的物理特性

环境电离辐射中包含了宇宙辐射电离成分、天然放射性核素和人工放射性核素发射的射线成分。天然和人工放射性核素以各种状态分布于地壳、建材、空气、水等环境介质和实物中。天然放射性核素有铀系、钍系和⁴⁰K,人工放射性核素主要为⁹⁰Sr 和¹³⁷Cs。可直接探测到的环境电离辐射主要是十几 keV 至 3 MeV 的 γ 射线,它随地质状况和建材结构不同而变化,表 1.3.1 列出了典型环境电离辐射场的组成。

表 1.3.1 典型环境电离辐射场(1 m 高处)^[3]

辐射	能量/MeV	来源	自由空气吸收剂量率($\times 10^{-8}$ Gy/h)
α	1 ~ 9	氡(大气)	2.7
β	0.1 ~ 2	氡(大气)	0.2
	0.1 ~ 2	K. U. Th. Sr(土壤)	2.5
γ	2 ~ 200	宇宙辐射	0.7
	≤ 2.4	氡(大气)	0.2
	≤ 1.5	K(土壤)	2.0
	≤ 2.4	U(土壤)	1.0
	≤ 2.6	Th(土壤)	2.4
	≤ 0.8	Cs 及其他落下灰	0.3
n	0.1 ~ 100	宇宙辐射	0.1
P	10 ~ 2 000	宇宙辐射	0.1
μ	100 ~ 30 000	宇宙辐射	2.3
总计			14.5

地表 γ 辐射构成的外照射和氡产生的内照射主要来源于土壤中一些放射性核素的贡献,表 1.3.2 给出了这些放射性核素在土壤中的分布。土壤中放射性核素浓度随地质结构的不同而有所差异。

表 1.3.2 主要天然放射性核素在土壤中的浓度^[4]

核素	在土壤中的浓度/(g/g)	核素	在土壤中的浓度/(g/g)
⁴⁰ K	2×10^{-6}	²³³ U	5×10^{-6}
⁸⁷ Rb	8×10^{-5}	²³⁴ U	8×10^{-11}
¹¹⁵ Ln	1×10^{-7}	²³⁰ Th	2×10^{-10}
¹³⁸ La	2×10^{-8}	²²⁶ Ra	1×10^{-12}
¹⁴⁷ Sm	9×10^{-7}	²¹⁰ Pb	4×10^{-14}
¹⁷⁶ Lu	2×10^{-8}	²³² Th	1×10^{-5}
¹⁸⁷ Rc	6×10^{-10}	²³⁵ U	7×10^{-9}

表 1.3.3 列举了陆地天然放射性核素(系列)和¹³⁷Cs 在地面上不同高度产生的 γ 吸收剂量率变化(相对于 1 m 处值的百分数)情况。

表 1.3.3 地面上不同高度的 γ 吸收剂量率变化(相对于 1 m 处值的百分数)^[5]

核素	百分数/%	高度/m					
		0	1	10	30	100	300
⁴⁰ K		101	100	98	88	65	21
²³⁸ U 系		101	100	93	83	60	14
²³² Th 系		101	100	93	82	59	16
¹³⁷ Cs		103	100	92	79	49	12
典型天然辐射场		101	100	95	86	61	18
⁴⁰ K		102	100	89	74	44	12
²³⁸ U 系		102	100	89	73	42	10
²³² Th 系		102	100	89	74	43	12
¹³⁷ Cs		104	100	81	61	29	5
典型天然辐射场		102	100	89	74	44	12

地表 γ 辐射和宇宙辐射产生的外照射剂量(也称贯穿辐射剂量)随时间而变化,γ 剂量率与土壤湿度有关。宇宙辐射一年内变化较小。表 1.3.4 列出了美国环境测量实验室(EML)用一台高压电离室测到的地表某点处一年内贯穿辐射照射量率的变化:一个月内变化量最高可达 29%,一年内变化量最高可达 36.7%。

表 1.3.4 贯穿辐射照射量率随时间的变化(μR/h)^{*[6]}

时间	日变化范围		月平均值及其变化范围		季平均值及其变化范围	
	数值	最大值-最小值 平均值 (%)	数值	平均值-月平均值 平均值 (%)	数值	平均值-季平均值 平均值 (%)
1981.7	13.98 ~ 15.74	11.9	14.8	-3.5	} 14.95	-4.6
1981.8	14.45 ~ 15.54	7.2	15.06	-5.3		
1981.9	14.35 ~ 15.87	10.1	15.0	-4.9		
1981.10	14.29 ~ 16.21	13.0	14.77	-3.3	} 14.32	-0.14
1981.11	14.46 ~ 15.06	4.1	14.77	-3.3		
1981.12	11.95 ~ 15.69	27.9	13.41	6.2		
1982.1	11.93 ~ 14.98	22.8	13.36	6.6	} 13.7	4.2
1982.2	12.64 ~ 14.14	10.9	13.71	4.1		
1982.3	13.46 ~ 14.44	7.0	14.04	1.8		
1982.4	10.96 ~ 14.86	29.0	13.46	5.9	} 14.19	0.8
1982.5	14.14 ~ 15.67	10.3	14.89	4.1		
1982.6	13.77 ~ 15.02	8.8	14.22	0.6		
总平均值		36.7	14.30			

* $\dot{D}(\mu\text{Gy/h}) = 8.73 \times 10^{-3} \dot{X}(\mu\text{R/h})$ 。

1.4 天然辐射照射

人类受到天然辐射源产生的电离辐射照射,具有持续性、不可避免的特征。对于大多数人来说,天然辐射照射比所有的人工源加在一起的照射还大。天然辐射照射主要来自两个方面:进入地球大气层的高能宇宙辐射粒子和在地壳中的原生放射性核素产生的辐射。原生放射性核素在我们生活的环境中到处都存在,包括存在人自己的体内。这些天然辐射源对人既产生外照射,又产生内照射。表 1.4.1 列举了天然辐射源对地球上生活的成年人所致的平均年有效剂量。

表 1.4.1 天然辐射源所致平均辐射剂量^[7]

源	世界范围平均年有效剂量/mSv	典型范围/mSv
外照射		
宇宙辐射	0.4	0.3 ~ 1.0 ^①
地面 γ 射线	0.5	0.3 ~ 0.6 ^②
内照射		
吸入(主要是氡)	1.2	0.2 ~ 10 ^③
食入	0.3	0.2 ~ 0.8 ^④
总和	2.4	1 ~ 10

注:①从海平面到高海拔地区;②取决于放射性核素在土壤和建筑材料的含量;③取决于室内氡气累积;④取决于放射性核素在食物和饮水中的含量。

1.4.1 地表宇宙辐射照射^[8]

宇宙辐射由两部分组成:初级辐射和次级辐射。初级成分可更进一步分为银河的宇宙辐射、地磁俘获辐射和太阳的宇宙辐射。

银河的宇宙辐射来自太阳系以外,并且大部分由正荷电粒子组成。一些研究指出:在地球大气层外部、纬度 55° 以上的宇宙辐射由 87% 质子、12% α 粒子和 1% 其他重核所组成。这些粒子的能量在几个 10^9 eV 到大于 10^{17} eV 范围内。

当一个荷电粒子接近地球的时候,它受到地球磁场的作用。为了穿过磁场而到达地球,粒子必须具有一定的动量。否则,它被地球磁场俘获。这时产生第二种类型的初级宇宙辐射,即地磁俘获辐射。它包含两个辐射带(电子和质子),在高纬度处被观察到。这两个带相对于磁性赤道是对称的。

第一个带出现在 1 000 km 高度左右,从北纬 30° 延伸到南纬 30°。带内的强度先随着高度而增加(直至 3 000 km 左右),然后减弱。现在对它的能谱还不十分清楚。在空间旅行时这些辐射带将产生剂量。

第二个带开始于大约 12 000 km 的高度,在 15 000 km 处达到最大值。它从北纬 60° 延伸到南纬 60°。

太阳的宇宙辐射是伴随着太阳表面上的强烈耀斑而产生的。这些射线由质子组成。这类事件分为高能和低能两种。高能事件能用地面上的中子探测器观察到。低能事件比较频繁,但必须在高空探测。由于这些事件产生的辐射遍及太阳系,所以它们在载人宇宙

飞船的屏蔽设计时需要做出重要考虑。

次级宇宙辐射是由初级宇宙辐射到达地球大气层时发生相互作用而产生的。当高能辐射粒子与大气原子碰撞时放出许多产物:介子、电子、光子、质子和中子。这些产物在射向地球表面的途中因为它们与元素碰撞或者本身衰变,又产生其他次级辐射,这样就发生了倍增或簇射,使一个初级宇宙辐射粒子能引起多达 10^8 个的次级宇宙辐射粒子。

大多数的初级宇宙辐射在大气层的上部 1/10 范围内被吸收。在大约 20 km 高度以下,宇宙辐射几乎全部是次级的。从大气层顶部降到 20 km 高度,宇宙辐射的总注量率是增加的。虽然初级宇宙辐射的注量率降低,但由于次级宇宙辐射数目的迅速上升使总剂量率增加。在 20 km 以下,总注量率随高度的降低而减弱,这是因为次级宇宙辐射发生衰减而初级宇宙辐射不再产生次级宇宙辐射的缘故。

在地球表面,次级宇宙辐射由介子(硬成分,这是主要成分)、电子和光子(软成分)以及中子和质子(核成分)组成。在海平面,约 3/4 的宇宙辐射属于硬成分。

由于地球的磁场,宇宙辐射注量率也随纬度而变化。一个荷电粒子为达到地球的地磁赤道处的大气层所需要的能量,大于到达其他纬度处所需要的能量。这效应在纬度 $15^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间最显著。在纬度 50° 以上,宇宙辐射注量率几乎保持恒定。这样,最低的宇宙辐射注量率值发生在地磁赤道。这种效应用纬度 50° 处的宇宙辐射注量率比赤道处的宇宙辐射注量率所增加的百分数来表示。在海平面,此效应对于致电离粒子的成分来说是不大的(10%),而对中子成分则较大(150%)。

这种本底辐射源所造成的剂量率可分为两部分。致电离成分引起的一部分由电离室读数进行估计。中子成分引起的那部分较难测量,因为剂量率与中子的能谱有着密切关系。

在海平面和高纬度,电离量约为 1.96 离子对/(立方厘米·秒),它对软组织给出的剂量率约为 28 毫拉德/年。帕特森(Patterson)等人估计中子剂量率为 25 毫雷姆/年。在中等纬度处,海平面的总剂量率大约为 50 毫雷姆/年。预期此剂量率随高度增加而增加,并随纬度增加而增加。

地表宇宙辐射场的主要成分是能量在 1 至 20 GeV 间的 μ 介子,它们在自由空气中产生的吸收剂量率约占来自直接电离辐射的 80%;其余来自 μ 介子产生的电子或在电磁级联辐射中产生的电子,随着海拔高度的增加,电子成为剂量率的重要贡献者。

表 1.4.2 地表大气中宇宙辐射粒子的性质^[9]

类别	名称	质量/MeV	平均寿命/s	主要衰变方式
重子	核子	质子(p)	稳定	稳定
		中子(n)	1.01×10^3	$p + e^- + \nu_e$
介子	π 介子(π^+)	139.6	2.55×10^{-8}	$\mu + \nu_\mu$
	(π^0)	134.9	1.78×10^{-15}	$\gamma + \gamma$
	K 介子(K^+)	493.7	1.23×10^{-8}	$\mu + \nu_\mu$
	(K_1)	497.7	0.91×10^{-10}	$\pi + \pi^-$
	(K_2)	497.7	5.7×10^{-8}	$\pi + e + \nu_e$
轻子	μ 介子(μ^+)	105.6	2.2×10^{-6}	$e^+ + \nu_e + \nu_\mu$
	电子(e^+)	0.511	稳定	稳定
	中微子(ν_e)	0	稳定	稳定
	(ν_μ)	0	稳定	稳定
光子	光子 γ	0	稳定	稳定

中国原子能科学研究院在 1978 年至 1987 年的 9 年间用高压电离室在云南省和新疆维吾尔自治区的不同海拔高度湖泊上(490 m~2.23 km)和在河北省香河地区上空(10 m~26 km)搭载高空气球,测量了低大气层中宇宙辐射电离量。从海南岛到满洲里(地磁纬度 λ_m ,7.68~37.37°N)测量了宇宙辐射电离量随纬度的变化。得出在高度 $h<6\,360\text{ m}$ 低大气层中宇宙辐射电离量 $i(\text{I})$ 随高度 $h(\text{m})$ 和地磁纬度 $\lambda_m(^{\circ}\text{N})$ 分布的经验公式(1.4.1)^[10]:

$$i = \begin{cases} (i_0 + 0.009\,8\lambda_m)\exp(7.27 \times 10^{-5}h^{1.184}) & \lambda_m > 13^{\circ}\text{N} \\ (i_0 + 0.127)\exp(7.27 \times 10^{-5}h^{1.184}) & \lambda_m \leqslant 13^{\circ}\text{N} \end{cases} \quad (1.4.1)$$

式中,电离量单位为 I'标准状况下每立方厘米自由空气中,宇宙辐射每秒产生一个离子对,即1 I=1 离子对/(立方厘米·秒),相当于空气吸收剂量率 15 nGy/h。地理纬度和地磁度存在以下关系:

$$\sin\lambda_m = \sin\lambda\cos 11.7^{\circ} + \cos\lambda\sin 11.7^{\circ}\cos(\varphi - 291^{\circ}) \quad (1.4.2)$$

式中, λ 和 φ 分别为地理纬度和经度。[参见:人造地球卫星环境手册编写组,人造地球卫星环境手册,国防工业出版社,1971 年,第 69 页]

根据北京密云水库 1978—1982 年 4 次宇宙辐射电离量 $i(\text{I})$ 测量平均值为 2.095 I, i_0 值 1983—1987 年平均为 1.67 I,水库地磁纬度 $\lambda_m=0.283\lambda$,按经验公式可算出 $i(\text{I})=2.01\text{ I}$ 与实测平均值 2.095 I 相差 4.1%。

根据以上经验公式、我国大陆地区居民居住地的地理分布和 1986 年底全国人口统计资料,估算得出我国大陆地区居民所受宇宙辐射人口加权平均年有效剂量当量为 278 μSv ,其中电离成分和中子成分分别为 252 μSv 和 26 μSv 。表 1.4.3 列出了世界和我国居民所受宇宙辐射有限剂量当量。

表 1.4.3 居民所受宇宙辐射有效剂量当量^[11]

国家和作者	年有效剂量当量/ μSv			备 注					
	电离成分	中子成分	总计	建筑物屏蔽因子	室内停留因子	品质因数		高度	纬度
						电离成分	中子成分		
美国 D. T. Oakley et al. (1972)	353	56	409			1	8	海平面	美国范围
UNSCEAR(1982)	280	21	301			1	6	海平面	50°N
UNSCEAR(1986)	240	42	282	0.8	0.8	1	12	海平面	世界范围
UNSCEAR(1988)	240	20	260	0.8	0.8	1	6	海平面	世界范围
	300	55	355	0.8	0.8	1	6	世界平均高度	世界范围
中国原子能科学研究院	239	26	265	0.8	0.8	1	6	中国平均高度	全国范围
	252	26	278	城市 0.8 农村 0.9	城市 0.8 农村 0.7	1	6	中国范围高度	全国
卫生部	268			0.9	0.8	1		中国范围高度	全国

宇宙辐射对我国居民产生的年集体有效剂量当量约为 25.5 人·Sv。1988 年联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)报告估计出 1984 年由于空中旅行对世界人口产生的集

体有效剂量当量约为 4 300 人·Sv。

历年来的 UNSCEAR 报告对世界居民所受宇宙辐射剂量的估算值除由于改变某些参数而引起较大变化外,一般变化不大。UNSCEAR 报告中的估算值是根据一些国家和地区的现有数据资料所做的一个平均估计。由于每个国家地理情况和人口分布的不同,估算出各自国家居民所受宇宙辐射剂量,既可为本国提供科学资料,又可为 UNSCEAR 提供有关的数据资料。

表 1.4.3 列出了 UNSCEAR 近年报告中提供的世界居民所受宇宙辐射年有效剂量当量值和有关作者报道的居民所受宇宙辐射年有效剂量当量。结果表明中国公众所受宇宙辐射年有效剂量当量较世界公众约低 28%,这是由地理分布因素决定的,因为中国居民绝大多数居住在北半球低海拔和较低地磁纬度的地带。人口的 53.6% 居住在海拔 100 m 以下,人口的 91% 居住在地磁纬度为 30°N 以下的地带。

1.4.2 地表 γ 射线照射

地表 γ 射线来自天然放射性核素(原生核素),存在于所有环境介质中(包括人体自身,如 ^{40}K),主要有土壤中的 ^{238}U 和 ^{232}Th 系列以及 ^{40}K ,构成人体的外照射。表 1.4.4 列出这些核素在距地表 1 m 高处的照射剂量率。

表 1.4.4 一个典型的地球 γ 辐射场——1972^[12]

辐射源	1 m 高处照射剂量率 $\mu\text{R}/\text{h}^*$	1 m 处 γ 注量 $1/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$
^{40}K	2.5	2.7
^{238}U + 子体	1.4	2.2
^{232}Th + 子体	3.0	4.1
^{137}Cs	0.5	0.8
$^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$	0.2	0.4
空气中 ^{222}Rn 子体	0.1	0.2
总和	7.1 (59 mrad/y)	10.4

* $1 \mu\text{R}/\text{h}^{-1} = 11.46 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$, $1 \text{ mrad} \cdot \text{y}^{-1} \sim 7 \mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ 。

人体在室内和室外主要受 γ 射线照射,根据联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)1993 年报告,估计世界人口的 1/3 居民接受室内 γ 空气吸收剂量率平均为 $20 \sim 190 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$,人口加权平均值为 $80 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ (我国为 $99 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$),我国室内、外比值为 1.4,室内照射剂量主要取决于建材的天然放射性核素活度浓度。空气吸收剂量率转换为有效剂量率的系数为 $0.7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$,室内停留因子采用 0.8。根据所掌握的资料汇总出 UNSCEAR 发表的自 1962 年至 2000 年陆地 γ 辐射产生的外照射剂量率($\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$),数据结果列于表 1.4.5。

表 1.4.5 陆地 γ 辐射产生的外照射剂量率 ($\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$)

年度	1962	1966	1977		1982		1990		1993			2000				
国别 (估计值)		(全身 照射) ^②	人口 (10 ⁶)	室外	室外	室内	内/外	人口 (10 ⁶)	室外	室外	室内	内/外	人口 (10 ⁶)	室外	室内	内/外
中国			(12) ^③	60) ^③	(69) ^③			1 120	67 ^④	1 120 ^⑤	62	99	1 232	62	99	1.6
美国			219	45	46	39	0.75	248	46	249	46	37	269.4	47	38	0.8
英国								56	34	57.2	34	60	58.14	34	60	1.8
法国					81	99	1.11	55	68	56.1	68	75	58.33	68	75	1.1
印度			633	36	42			832	55	853	55		944.6	56		
日本			110	41	49			123	49	123	49	50	125.4	53	53	1.0
等																
世界 (均值)	2.99/mSv	2.95/mSv		45	50	60	1.2		53.3		57	83	1.44 ^⑥	59	84	1.4
统计 数日			(共 10 个国家和地区)		(共 15 个国家和地区)			(共 25 个国家和地区)		(共 42 个国家和地区)			(共 55 个国家和地区)			

注:① 表内数据摘自 1966—2000 年,6 届联合国原子辐射效应委员会(UNSCEAR)报告。

② 包括人体性腺、哈弗氏管、骨髓全部所受天然辐射照射有效剂量。

③ 中国台湾地区数据。

④ 中国卫生部数据(热释光剂量计地面测量)。

⑤ 中国国家环保局数据。

⑥ 按人口加权均值。

1.5 人类活动增加的辐射剂量

人类活动增加的照射包括6类:核燃料循环、医学应用、工业应用、人为活动引发的天然辐射剂量升高、国防活动和其他应用;其平均年集体有效剂量为14 000人·Sv(1990—1994),其中人为活动(如采煤等)引发的天然辐射照射占83.5%,核燃料循环占10%,医学应用占5.4%。表1.5.1列出全世界职业受照(1990—1994)一览表。

表 1.5.1 全世界职业受照(1990—1994)^[13]

实践	受监测 工作人员 /千人	平均年 集体有 效剂量 /(人·Sv)	生产单位能源的 平均年集体 有效剂量 /(人·Sv(GW _a) ⁻¹)	平均年有效剂量 /mSv		分布比	
				受监控 工作人员	可测到 受照的 工作人员	NR ₁₅	SR ₁₅
核燃料循环							
采矿	69	310	1.72	4.5	5.0	0.10	0.32
水冶	6	20	0.11	3.3		0.00	0.01
浓缩	13	1	0.02	0.12		0.00	0.00
燃料制造	21	22	0.1	1.03	2.0	0.01	0.11
反应堆运行	530	900	3.9	1.4	2.7	0.00	0.08
后处理	45	67	3.0	1.5	2.8	0.00	0.13
研究	120	90	1.0	0.78	2.5	0.01	0.22
总计	800	1 400	9.8	1.75	3.1	0.00	0.11
辐射的医学应用							
诊断放射学	950	470		0.50	1.34	0.00	0.19
牙医实践	265	16		0.06	0.89	0.00	0.24
核医学	115	90		0.79	1.41	0.00	0.10
放射治疗	120	65		0.55	1.33	0.00	0.15
总计 ^①	2 320	760		0.33	1.39	0.00	0.14
辐射的工业应用							
射线照相	106	170		1.58	3.17	0.01	0.23
同位素生产	24	47		1.93	2.95	0.02	0.25
其他	570	140		0.25			
总计 ^②	700	360		0.51	2.24	0.00	0.25
天然辐射							
采煤	3 910	2 600		0.7			
其他开采	760	2 000		2.7			
矿物加工等	300	300		1.0			
地面受照(氡)	1 250	6 000		4.8			
机组人员	250	800		3.0			
总计	6 500	11 700		1.8			

表 1.5.1(续)

实践	受监测 工作人员 /千人	平均年 集体有 效剂量 /(人·Sv)	生产单位能源的 平均年集体 有效剂量 /(人·Sv(GW _a) ⁻¹)	平均年有效剂量 /mSv		分布比	
				受监控 工作人员	可测到 受照的 工作人员	NR ₁₅	SR ₁₅
国防活动							
武器	380	75		0.19			
核动力船只和 辅助设备	40	25		0.82			
总计	420	100		0.24			
辐射的其他应用							
教育	310	33		0.11	1.1	0.00	0.07
兽医	45	8		0.18	0.62	0.00	0.02
总计	360	40		0.11	1.0	0.00	0.05
所有应用总计							
人工	4 600	2 700		0.6	2.0	0.00	0.13
天然	6 500	11 700		1.8			
总计	11 100	14 000		0.1			

①这些总计包括未分别指明的来自所有其他医学应用的份额。

②这些总计包括未分别指明的来自所有其他工业应用的份额。

注：表 1.5.1 引自 UNSCEAR 2000 年报告 638 页，题目为“全世界职业受照(1990—1994)”。应指出，在辐射医学应用中对操作人员为职业受照，而对患者并非职业受照。

人类活动增加的辐射剂量主要来源于矿藏开采、氡气内照射和放射医学。核试验从 1945 年起到 1980 年止共进行 543 次大气层核试验，地下核试验次数已大大超过大气层核试验次数，但一般为低当量(采用 UNSECEAR 2000 年报告)。我国公众受核试验沉降落下灰照射年有效剂量为 6 μSv。医疗照射，我国每年约有 2.2 亿人接受 X 光诊断，全国平均医疗照射年均剂量约为 90 μSv。

1.6 环境辐射监测

1.6.1 环境辐射本底调查

由于世界公众所受天然辐射源照射为人类生存环境辐射背景资料，就其涉及面和量值而言，较大多数人工源照射更为重要，为此世界范围内天然辐射本底调查工作为世人所关注。1982 年联合国原子辐射效应科学委员会报告，14 个国家及亚洲部分地区地面 1 m 处 γ 空气吸收剂量率平均值从 37 nGy · h⁻¹(波兰)到 94 nGy · h⁻¹(德意志民主共和国)。2000

年报告统计了世界 55 个国家和地区陆地 γ 外照射剂量率值从 $18 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ (塞浦路斯) 到 $93 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ (澳大利亚); 人口加权平均, 室外 γ 外照射剂量率值为 $59 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$, 室内为 $84 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。我国于 1983 年开始进行了全国天然放射性水平调查, 其中, 室外 γ 外照射剂量率值为 $62.1 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$, 室内为 $99.1 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ (详见本书第 2 章)。

核设施运行前本底调查: 对核设施有关的特定区域环境中已存在的辐射水平、环境介质中放射性核素含量进行测量, 作为以后评价公众剂量所需的环境资料。其调查内容、时间、范围, 监测项目与频次, 均按标准《辐射环境监测技术规范》(HJ/T 61—2001) 执行。本底调查, 其质量保证工作甚为重要。本底调查获得的所有结果要为核设施运行后可能出现的环境辐射变化提供评价依据。

1.6.2 核设施环境监测

1. 核设施常规运行时的环境监测

监测内容按标准《HJ/T 61—2001》执行。本书第 2 章以气体探测器在环境监测中的应用为例, 介绍了对某核设施进行连续三年的环境外照射监测数据结果和分析。

2. 核事故环境辐射应急监测

世界范围的重大核事故迄今为止已发生三次:

(1) 三里岛核事故

1979 年 3 月 28 日, 美国发生的三里岛核事故, 堆型为压水堆, 电功率 880 MW。由于大量放射性物质释放在安全壳内, 进入环境中的放射性物质相对较少, 其中惰性气体约 379 PBq, 主要是 ^{133}Xe 和 ^{131}I , 80 km 范围内个人平均剂量为 $15 \mu\text{Sv}$, 最大有效剂量约为 $850 \mu\text{Sv}$, 相当于世界天然本底年平均剂量的 35%, 但其社会影响较大^[15]。

(2) 切尔诺贝利核事故

1986 年 4 月 26 日, 苏联发生了切尔诺贝利核事故。

① 事故状况

核反应堆为 RBMK-1000 型压力管式石墨慢化沸水堆, 1986 年 4 月 26 日发生堆芯熔化事故, 为反应堆运行史上最大一次事故, 事故爆炸产生的烟云高达 1.5 km, 烟羽迅速向外扩散。4 月 28 日早, 瑞典福斯马克核电站职工通过检测门时测出严重污染, 各地环境监测站也陆续发现环境放射性水平高出正常本底约 100 倍, 核素为 ^{131}I 和 ^{137}Cs , 根据风向判断来自苏联。在切尔诺贝利核电站周围 30 km、东北方向 120 km 范围土地严重污染, 11 万居民紧急疏散, 放射性物质扩展到 20 余个国家。

② 事故监测^[16]

事故周围场区监测(早期):

- 航空照相、采用准直探测器进行 γ 辐射场扫描测量;
- 采集堆芯上方 3 m, 20 m 气溶胶样品, 进行 γ 谱分析测量;
- 对土壤样品进行 γ , α 谱分析和 β 计数器测量。

场区外监测(中晚期):

苏联的全国气象、卫生等系统 200 多个固定监测站和 10 个流动监测站协同采集水、空气、土壤生物样品进行分析测量, 对公交系统的站、场及运输工具进行了污染水平测量。

③监测目的

a. 核电厂 30 km 内居民内、外照射剂量,居民甲状腺中放射性碘含量等测量以确定医学处置方案;

b. 电厂 30 km 以外严重污染地区居民受照水平测定,以决定是否全部或部分撤离,是否对饮食、活动提出适当临时建议;

c. 防止污染食品的扩散。

国外许多国家和地区也进行了各种监测:

瑞典是最早发现事故污染的国家,启动数十个环境监测站和核电站在辐射防护研究所协调下进行周密监测,包括航测, γ 谱仪就地测量,地面 γ 剂量率连续测量,大流量空气采样、雨水采样、高空空气采样 γ 能谱分析以及水样、食品、牧草和牛奶逐日采样分析测量。

匈牙利:由国家放射生物和放射防护研究所在全国选择 123 个点进行室外 γ 剂量率和能谱测量分析。

奥地利:进行全国范围内 γ 剂量率分布测量。

美国:动用 7 台实验室 γ 谱仪和野外就地谱仪、8 个地面空气采样监测站进行监测工作。

我国核工业部,安防局、核电局和核燃料局共同组成跟踪小组。在北京、太原、夹江和苏州分别对地面空气照射量率、空气样品、沉降灰样品、雨水样品、植物、地表土壤、水样品和飞机擦拭样品进行测试和分析^[16],探测到其污染存在,但不至对人体健康产生危害。中国原子能科学研究院在院内环境中高压电离室 γ 剂量率仪和空气采样(^{131}I , ^{137}Cs)测量中,在 1986 年 5 月 4 日至 9 日期间发现环境 γ 剂量率和空气中 ^{131}I , ^{137}Cs 浓度均有显著增高(详见第 2 章)。

我国卫生部系统,全国 37 个省、市工业卫生防疫站所对事故影响也进行了全面监测和报道^[17]。

UNSCEAR 2000 年报告认为:切尔诺贝利事故是造成辐射照射最严重的事故,造成 30 名工作人员在几天或几周内死亡,100 多人受到辐射损伤,11.6 万人从反应堆周围撤离、永久性迁居,22 万人从白俄罗斯、俄罗斯联邦和乌克兰撤离,造成严重社会和心理影响等,但绝大部分公众不会因为事故的辐射而遭受严重的健康后果。

(3) 日本福岛核事故

2011 年 3 月 11 日,日本发生 9 级大地震,并继发大海啸,导致福岛第一核电站发生 7 级核事故,大量放射性物质释放。文献[19]根据相关资料计算得到事故后单位时间 3 个机组向环境释放的某些核素活度如表 1.6.1 所示。

表 1.6.1 释放的某些核素活度

核素	^{133}Xe	$^{131\text{m}}\text{Xe}$	^{131}I (有机碘)	^{131}I (元素碘)	^{85}Kr	$^{85\text{m}}\text{Kr}$	^{137}Cs
释放率 /(GBq/h)	5.86×10^6	3.68×10^4	2.71×10^3	1.10×10^3	2.29×10^4	6.3×10^3	1.78×10^3

日本政府原子能灾害对策本部,估算事故现场外照射情况:场区正门附近 3 月 15 日剂

量率为 11.9 mSv/h,场区周围 3 月 16 日前后约为 40 μ Sv/h。

事故发生后我国有关部门也极为重视,国家环境保护部核与辐射安全技术中心和部分省环境辐射监测站进行了一系列测量和评估工作,《辐射防护通讯》2012 年第 32 卷 2 期专题报道了我国环境保护系统和中国辐射防护研究院有关日本福岛事故监测结果和评价文章。

核事故对惰性气体 ^{133}Xe 的监测:反应堆正常运行时很少有 ^{133}Xe 等同核素的泄漏,但在核反应堆事故和核爆初期, ^{133}Xe 是主要标志性放射性核素。氙的特征参数见表 1.6.2。

表 1.6.2 Xe 同位素特征参数

Xe 同位素	^{135}Xe	^{133}Xe	$^{133\text{m}}\text{Xe}$	$^{131\text{m}}\text{Xe}$
半衰期	9.14 h	5.243 d	2.19 d	11.84 d
γ 射线能量/keV	249.8	80.99	233.2	163.9

由于氙的释放等特点,测量 Xe 成为监测核爆和核事故有效的手段和方法,国外文献有所报道^[19]。这次日本福岛核事故期间,浙江环境监测站用瑞典生产的 SAUNA 惰性气体氙监测系统(最低检测浓度为 0.1 mBq/m³)在当地大气中测到 ^{133}Xe , $^{131\text{m}}\text{Xe}$ 浓度明显增高。2011 年 3 月 28 日达到峰值 4 621.26 mBq/m³,从取样到完成分析测量约 24 h^[20]。西北技术研究所用自制的放射性氙取样、分离和测量系统(SESMP - II),该系统最小可探浓度(MDC)为 0.25 mBq/m³(测量 12 h),2011 年 3 月 30 日在该地区空气中测到 ^{133}Xe 活度浓度为 100 mBq/m³^[22]。上述两个单位对此次福岛核事故都进行了有意义的环境辐射监测。

核事故环境辐射监测首要目的是尽快掌握事故的性质、范围、污染水平,为采取紧急措施提供依据。一般分为三个阶段,早期通过空气中和地面测量剂量水平、污染范围以评估居民所受剂量;中晚期测定空气、水和食物以及农作物受放射性污染状况,以确定处置方案。切尔诺贝利事故中苏联进行的监测和处置以及日本福岛核事故各种监测方法和手段可供借鉴。

核事故环境辐射应急监测,不论事故发生在境内或境外都是十分重要的环境保护工作,各有关单位必须充分利用已有的设备和条件,在主管单位有力的领导下协同完成任务,以对公众负责。

对于事故应急监测,除参照相关标准外,国务院和国家核安全局尚有条令和规章:《核电厂核事故应急管理条例》(1993 年 8 月 4 日国务院 124 号令)、国标《核电厂应急计划与准备准则 核电厂营运单位应急野外辐射监测、取样与分析准则》(GB/T 17680.10—2003)等,均应认真贯彻执行。监测是一项重要手段,它为事故应急的管理和处置提供依据,而核事故的合理、妥善的处置,则是最终的目标。

除上述环境辐射监测项目外,国内外均发生过多起工业、农业和医用放射源丢失破损而引发的人员伤亡辐射事故。对这类事故主要是加强管理,建立健全放射源使用与保管制度,以避免事故的发生。核恐怖事件国内也应十分注意,如过境的安检和大型会议活动场所的核安全检测等。

环境辐射监测方法和手段很多,本章着重介绍的是环境辐射外照射、测量、调查等情况。环境介质中空气、水、土壤,农作物和牛奶等食品中放射性核素含量浓度测定,在本底

调查和事故监测中均有具体要求,在下面相关章节中有所介绍。

在核事故环境辐射应急监测中,直升机和无人驾驶的飞行器乃至机械人都曾有过实用的报道。

最后需要指出:监测点位的选择和布设、测量方式和方法、数据获取以及处理方式的选择,都有助于获得科学的环境辐射监测的结论。这点也极为重要。

参考文献

- [1] 国家环保局,中国核工业总公司. 环境核辐射监测规定(GB 12379—90)[S]. 北京:中国标准出版社,1990.
- [2] 李德平. 环境辐射场监测中的几个问题[J]. 核仪器,1980,9:2.
- [3] NCRP. NCRP Report[R]. [S. l.]:[s. n.],1976.
- [4] 潘自强,罗国桢. 环境本底辐射测量和剂量评价[M]. 北京:出版者不详,1986:13.
- [5] 潘自强,罗国桢. 环境本底辐射测量和剂量评价[M]. 北京:出版者不详,1986:282.
- [6] Siro Abe Kazunobu Fujitake. 1981 National Symposium on Atomic Energy, Tokyo, Japan[J]. Nuclear Science and Technology, 1981,18(1), 21—45.
- [7] 联合国原子辐射效应科学委员会. 电离辐射源与效应(卷1:辐射源)[M]. 冷瑞平,修炳林,郭裕中,等译. 太原:山西科学技术出版社,2002.
- [8] Moe H J, Lasuk S R, Schumacher M C, et. al. 辐射安全教程[M]. 802 翻译组,译. 北京:原子能出版社,1976:126—127.
- [9] 联合国原子辐射效应科学委员会. 联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR) 1993 年报告[M]. 北京:原子能出版社,1995:62.
- [10] 岳清宇,金花. 低大气层中宇宙射线电离量的分布测量[J]. 辐射防护,1988,8(6):1.
- [11] 金花,岳清宇. 中国大陆地区居民所受宇宙射线剂量估算[J]. 原子能科学技术,1988,23(6):9.
- [12] 潘自强,罗国桢. 环境本地辐射测量和剂量评价[M]. 北京:出版者不详,1986:280.
- [13] 联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR). 电离辐射源与效应(卷1:辐射源)[M]. 冷瑞平,修炳林,郭裕中,等译. 太原:山西科学技术与出版社,2002:638.
- [14] 吉长余,张东果. 大亚湾核电站 1994—2003 年环境辐射监测结果与分析[J]. 辐射防护,2004,24(3,4):173.
- [15] 胡遵素. 一所亿万美金的学校——浅谈三里岛事故及其影响[J]. 辐射防护,1984(03):226—236.
- [16] 任天山. 切尔诺贝利核事故的核素释放特点和场外环境监测[J]. 射防护,1988,8(4,5):299.
- [17] 核工业部安全防护卫生局. 苏联切尔诺贝利核电站事故资料选编(第一集)[M]. 北京:出版者不详,1987.
- [18] 朱昌寿,朱桂兰,程荣林. 苏联切尔诺贝利核电站事故对我国的放射性污染与卫生学评价[J]. 中华放射医学与防护,1987,7.
- [19] 王海洋,黄树明,王晓霞,等. 日本福岛第一核电站事故源项及后果评价[J]. 辐射

防护通讯,2010,31(3):7.

- [20] Bowyer T W, Schlosser C, Abel K H, et al. Detection and analysis of xenon isotopes for the comprehensive nuclear – test – ban treaty international monitoring system[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2002,59:139 – 151.
- [21] 胡丹,丁逊,宋建锋,等. 福岛核事故期间浙江地区大气中氙的监测[J]. 辐射防护,2012,32(2):40 – 41.
- [22] 殷经鹏,申茂泉,杨文静,等. 福岛核事故后西北等地放射性核素监测[J]. 核电子学与核探测技术,2012,32(3):265 – 268.