

国际辐射单位与测量委员会第20号报告

辐射防护仪器及其应用

原子能出版社

国际辐射单位与测量委员会第20号报告

辐射防护仪器及其应用

张树强 于耀明 译 果 行 校

原子能出版社

内 容 简 介

本报告根据辐射防护的需要,简要地叙述了辐射量和单位,介绍了各种类型的辐射探测器的特性、仪器的选择和应用、仪器的校准方法等。

本报告可供从事核物理、放射化学、放射医学、辐射防护等科技工作人员参考。

2-671/117

Radiation Protection Instrumentation and
Its Application
1971年

辐射防护仪器及其应用

张树强 于耀明 译 果 行 校

原子能出版社出版

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $4^{1/8}$ ·字数 90千字

1976年6月北京第一版·1976年6月北京第一次印刷

印数: 001—7000·定价: 0.36元

统一书号: 15175·053

目 录

引言	1
I. 基本概念	4
A. 辐射量和单位	4
B. 剂量当量的估计	8
C. 防护测量	10
II. 仪器的特性	18
A. 电离室仪器	18
B. 气体正比计数器	23
C. 盖革-弥勒计数器	28
D. 闪烁计数器	31
E. 照相器件	35
F. 固体器件和激活器件	40
III. 仪器的选择和应用	46
A. 巡测、场所监测和环境监测用的仪器	46
B. 个人监测	73
IV. 仪器的校准	82
附录A 热中子仪器资料一览表	98
附录B 剂量当量仪	103
参考文献	108

引 言

在过去，国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 主要关心了剂量当量的理论方面，而对它的实际测量问题关心较少。电离辐射或放射性物质的使用者，或对受到这些辐射或放射性物质照射的人员负有责任的人，都应努力遵守国际放射防护委员会的建议^{[101]*} 或者根据这些建议而制订的本国的安全要求。因此，需要一种方法来评价是否遵守了有关的要求。这样就需要适当的仪器，另外还需要有如何使用仪器以及如何正确地说明测量结果的知识。本报告准备对这些测量及其说明的问题给予实际的指导。

本报告的结构

在本报告的开头部分扼要地讨论了辐射量和单位，以这些单位为基础而作出的仪器读数的换算，以及通常所要求的准确度。接下去的一章是各种类型的辐射探测器。因为对探测器的描述及其操作方面的讨论已在别处发表^[103, 106, 9, 10]，所以这里的讨论有意识地力求简短，而集中在仪器的特性方面。然后用四小节的篇幅讨论了仪器的选择和应用，这四小节分别叙述：密封的 γ 射线源以及X射线源和电子源；非密封的放射源；反应堆和密封的中子源；以及带电粒子加速器。对于所有这四种类型的应用来说，有许多特征是共同的，但是 γ 射线和X射线仪器方面的大部分材料是在第一小节中；估计表面污染用的 α 射线和 β 射线仪器的大部分

* 引用的参考文献不一定是有关某一主题的最早或最新的文献，而是根据对读者的有用程度而选录的。

材料是在第二小节中；20兆电子伏以下的中子方面的材料是在第三小节中；在高能范围重要的一些特殊的论述放在第四小节中。个人监测仪器方面有单独一节。在报告的结尾讨论了校准方法。

在考虑各种类型仪器的时候，其优点和缺点都讨论了，但是没有对市售的特殊仪器作详细的描述。选择特殊类型的仪器应当根据对每种仪器特色的了解和特殊用途的考虑来决定更为合理。

需要测量的辐射

因为国际放射防护委员会 (ICRP) 的建议书适用于各种类型的电离辐射，其中包括着直接或间接地产生电离的电磁辐射和微粒辐射，所以需要讨论在实际上遇到的整个能量范围内的所有这些辐射的测量方法。一般地说，防护仪器的发展落后于新辐射源的发展，特别是辐射能量的增高。本报告的目的之一是除了促进现有仪器的有效利用之外，鼓励研制可靠的防护仪器。

某些类型和能量的辐射往往比其他类型和能量的辐射更为常见。关于外部源的辐射，最常用的是能量直到几兆电子伏的X射线和 γ 射线，它被应用于医学工作和工业生产。其次也许是来自放射性物质的 β 射线和能量直到几兆电子伏的电子。再次是能量范围从热能到大约20兆电子伏的中子。其他辐射的应用和产生的频繁程度较难确定，也许其次序如下：

(1) α 射线；(2) 能量高于几兆电子伏的电磁辐射和电子；(3) 20兆电子伏以上的中子和各种能量的质子以及(4) π 介子， μ 介子和重粒子。

关于内部辐射，国际放射防护委员会对于几乎所有可以遇到的核素，发表了在空气和饮用水中的最大容许浓度以及

最大容许体内负荷量的广泛的建议^[97]。另外还给出了推定的放射性表面污染工作限值的例子^[100]。虽然水和食物中浓度的测定大部分局限在一些专业化的实验室内进行，他们倾向于发展自己的仪器，但是在本报告中仍将对测定这些量的仪器作扼要的讨论。这种情况对于人体放射性的测定来说也是如此。

中子的分类

虽然中子按能量分类已有若干种不同的方案，但在本报告中，为了方便采用下述分类：

- | | |
|------------|----------------|
| (a) 热中子 | 0—0.5电子伏 |
| (b) 中能中子 | 0.5电子伏—200千电子伏 |
| (c) 快中子 | 200千电子伏—20兆电子伏 |
| (d) 相对论性中子 | 20兆电子伏以上 |

热中子组的上限被选作 0.5 电子伏，是相应于镅吸收的高能界限(镅截止限)。对于中能中子，选取 200 千电子伏作为上限，因为许多快中子监测仪器在低于这个能量时就变得非常不准确。对于快中子，把 20 兆电子伏作为上限，因为仅在接近或低于这个值时，一些仪器才具有可以利用的响应。

I. 基 本 概 念

A. 辐 射 量 和 单 位

本报告中特别关心的辐射量和单位是：(a) 吸收剂量，以拉德为其专用单位；(b) 剂量当量，以雷姆为其专用单位；(c) 粒子流量 (Particle fluence)；(d) 比释动能；(e) 照射量，以伦琴为其专用单位；以及 (f) 放射性强度，以居里为其专用单位。在国际辐射单位与测量委员会的第11号报告^[104]中已包含了这些量和单位的基本定义*。为了方便起见，把这些定义以严密性稍逊的形式概述于下。

1a 吸收剂量 (D)

在物质中特定位置上每单位质量所吸收的能量。吸收剂量的专用单位是拉德。1 拉德等于每千克0.01焦耳。

1b 吸收剂量指数 (D_I)

某一点上的吸收剂量指数 D_I ，是在以该点为中心、由密度为 1 克·厘米⁻³的软组织等效材料所组成的、直径为30厘米的球体内的最大吸收剂量。这是一个在本报告中未能加以利用的新量。详见国际辐射单位与测量委员会的第19号报告^[107]。

2a 剂量当量 (H) **

* 国际辐射单位与测量委员会的第 11 号报告的修订版正在印刷中，它 将 包括两个对辐射防护有用的新量：吸收剂量指数和剂量当量指数。这两个术语发表过晚，来不及在本报告正文中引用，后来只是将其定义包括在本节的第 1b 条和 2b 条中。

** 以前曾用 DE 表示。

一般地说来, 给定的吸收剂量所产生的生物学效应依赖于辐射的类型和照射条件。在目前的辐射防护工作中, 把给定器官内的吸收剂量乘以某些修正因子作为该器官的效应的一种指示。这些修正因子和吸收剂量的乘积称为剂量当量, 以 H 表示。 H 的专用单位是雷姆 (rem)。当 D 是以拉德为单位时, H 就以雷姆为单位。

一个特别重要的修正因子是品质因数, 用 Q 来表示*。它被用来说明生物效应与被照射介质中带电粒子的线能量转移 (L_{∞}) 的依赖关系。 Q 和 L_{∞} 之间的关系在表 I 中给出^[101]。在大多数情况下, 当器官受照射时 L_{∞} 有一个分布, 因此需要得出一个平均品质因数 $\bar{Q}$ 。表 II 列出了在组织等效模型中的最大剂量当量区域内, 热能至 20 亿电子伏能量范围内单能中子的 $\bar{Q}$ 的建议值^[102]。对于 X 射线、 γ 射线和电子来说, $\bar{Q}$ 的数值可以假定为 1。

表 I 国际放射防护委员会建议的用于辐射
防护计算的 Q 和 L_{∞} 间的关系

水中的 L_{∞} (千电子伏·微米 ⁻¹)	Q
3.5 或 3.5 以下	1
7	2
23	5
53	10
175	20

* 品质因数 Q (以前由 QF 表示) 不应与相对生物效应系数 RBE 混淆。相对生物效应系数按其定义只能在放射生物学上应用, 在这些应用中, 有关的条件是确切规定的。

对于从加速器出来的重反冲核和重粒子（即比质子更重的粒子），虽然在已经充分掌握光谱数据的情况下可以容许应用 Q 与 L_{∞} 的关系，但一般使用 $\bar{Q}$ 值20。在国际放射防护委员会和国际辐射单位与测量委员会的关于相对生物效应系数

表Ⅱ 单能中子的品质因数与流量及最大剂量当量*的
换算因子(单能中子垂直入射于30厘米厚的
组织等效模型上⁽¹⁰²⁾)

中子能量 (兆电子伏)	$\bar{Q}$	与每单位最大剂量 当量率相应的流量率 (厘米 ⁻² ·秒 ⁻¹ ·毫雷姆 ⁻¹ ·小时)	与每单位最大剂量 当量相应的流量 (厘米 ⁻² ·雷姆 ⁻¹ ×10 ⁻⁶)
2.5×10^{-8} (热的)	2.3	260	9.5
1×10^{-7}	2	240	8.7
1×10^{-6}	2	220	8.0
1×10^{-5}	2	230	8.3
1×10^{-4}	2	240	8.6
1×10^{-3}	2	270	9.8
1×10^{-2}	2	280	10.2
1×10^{-1}	7.4	48	1.75
5×10^{-1}	11	14	0.52
1	10.6	8.5	0.31
2	9.3	7.0	0.25
5	7.8	6.8	0.24
10	6.8	6.8	0.24
20	6.0	6.5	0.23
50	5.0	6.1	0.22
1×10^2	4.4	5.6	0.20
2×10^2	3.8	5.1	0.18
5×10^2	3.2	3.6	0.13
1×10^3	2.8	2.2	0.079
2×10^3	2.6	1.6	0.058

* 可用英文缩写 MADE (Maximum Dose Equivalent) 来表示被照射体内任何一点上产生的“最大剂量当量”。

的联合报告中^[98]，对品质因数，剂量当量和相对生物效应系数的概念作了进一步的讨论。

由于考虑到吸收剂量在空间和时间上的分布这样一类因素而引进的其他修正因子的乘积，通常总括为一个因子 N 。对于外部源而言，这个因子的值目前假定为 1。

2b 剂量当量指数 (H_T)

某一点的剂量当量指数是在以该点为中心、由密度为 1 克·厘米⁻³的软组织等效材料所组成的，直径为 30 厘米的球体内的最大剂量当量。这是一个在本报告中未能加以利用的新量。详见国际辐射单位与测量委员会的第 19 号报告^[107]。

3. 粒子流量或流量 (Φ)

粒子流量或简称为流量 (Φ)，是进入某一小球内的粒子数除以这小球的截面积所得的商。

4. 比释动能 (K)

比释动能是不带电的辐射(例如电磁辐射或中子)与物质相互作用时，在单位质量的该物质中产生的带电粒子的初始动能的总和。比释动能以焦耳·千克⁻¹或拉德为单位来表示。对于空气中吸收的电磁辐射，联系比释动能和照射量的一个主要的量是产生一个离子对所需要的平均动能。

5. 照射量 (X)

照射量 X 是特殊的电磁辐射场，亦即 X 射线或 γ 射线，对空气的电离本领的一种量度。这些电磁辐射与空气中的分子相互作用而产生电子，这些电子又使空气电离。照射量的专用单位是伦琴，用符号 R 表示，1 伦琴是在每千克空气中产生 2.58×10^{-4} 库仑电荷的照射量。

照射量和比释动能是两个很有用的量，因为它们都是在测定点上间接致电离辐射场的表征。而且，如果已经知道辐

射谱的话，就能比较容易地从该点的流量计算出来。在国际辐射单位与测量委员会的第10 b 和第13号报告中谈到了绝对测定照射量和比释动能的方法。

再者，关于上述几个定义，有一点值得指出：吸收剂量不仅依赖于辐射场而且还依赖于到达给定点的次级辐射，因此也依赖于次级辐射能够由此而到达该点的那些吸收物质的几何排列。吸收剂量是一个重要的量。其理由有二。首先，它是与生物效应联系起来的一个基本的物理量。正是由于这个原因，才把吸收剂量包括在剂量当量的定义之中。其次，在特定点上的吸收剂量是在该点的带电粒子场的度量。当带电粒子是由间接致电离辐射产生的时候，吸收剂量不是在被测点上的而是在带电粒子发生处的间接致电离辐射的度量，对于辐射束而言，这些带电粒子的平均发生点一般是在被测点的上游。

6. 放射性强度 (A)

放射性强度 A 是放射性核素的蜕变率。放射性强度的专用单位是居里，记为 Ci，1 居里等于每秒钟 3.7×10^{10} 个蜕变。

B. 剂量当量的估计

要估计在任何器官或组织中某一指定点上的剂量当量，需要知道该点上的吸收剂量 D 和平均品质因数 $\bar{Q}$ 。对于外部辐射而言，组织中被考虑的某一点上的吸收剂量，是在身体表面上所测到的吸收剂量与某一因子的乘积，这个因子把所关心的深度上的吸收剂量与表面上的吸收剂量联系起来。因子的数值是照射野的面积、所关心的深度、辐射的种类和能量以及辐射在人体上的入射方向的复杂函数。

如果测量的仪器不是用吸收剂量的单位刻度（例如，用照射量、粒子流量，组织中的比释动能等刻度），那么必须把仪器读数换算成吸收剂量。因此剂量当量的估计也许需要分作四个步骤：（1）体表辐射场的测量；（2）把测得的数值换算成用吸收剂量表示的数值；（3）利用实验上获得的深部剂量与表面剂量的关系确定在所关心位置上的吸收剂量；（4）在所关心位置上的吸收剂量乘以品质因数，后者是以该点上的辐射的线能量转移 LET 为根据的。

实际上，在评价辐射防护措施合适性时，允许在剂量当量的估计中作出许多简化和近似。因为这些措施的目的在于保证人体的任何部位接受的剂量当量不超过适用于这一部位的最大容许值，所以一种有用的简化是确定身体某一部位中最高剂量当量值 H ，而不管这个最高值出现在哪一种组织中。如果这个值小于该部位中任何组织的最大容许剂量当量，那就没有必要详细地刻划出剂量当量在整个部位中的分布。

在一个部位中剂量当量达到其最大值的所在的位置，是照射在所关心的位置上的辐射的类型和能量的函数。作为一种近似的计算，在求复杂辐射的最大剂量当量时，可以把各种辐射成分的最大剂量当量值相加，也就是假定所有这些成分的最大值都发生在同一个深度上。用这种方法算出的最大剂量当量一般是偏高地估计了实际的最大剂量当量。

除了上面所述的近似以外，还可以作出一些偏于保守的近似。例如，在中子照射的情况下，如果不知道中子谱，可以假定 $\bar{Q}$ 是 10。因为中子的最大 $\bar{Q}$ 值是 11，而对于大多数能量的中子来说 $\bar{Q}$ 值小于 10，所以这些近似所引起的误差几乎总是偏高地估计实际的剂量当量。

中子流量与最大剂量当量之间的关系以及中子流量率与最大剂量当量率之间的关系的资料，在表Ⅱ中给出。这些资料适用于没有次级辐射的垂直入射的单能中子。各向同性的或者不是垂直于表面的中子辐射，几乎总是给出较低的值，因此对于这些情况应用表Ⅱ是安全的。

在大多数情况下，剂量当量的最大值与吸收剂量的最大值发生在人体中几乎相同的深度处。即使这两个深度不完全相同，吸收剂量的最大值在这两个深度上的差别也很少超过5%。因此，假设最大吸收剂量与最大剂量当量发生在同一位置上，通常是可以接受的。随着壁厚的不断增加，用组织等效电离室得到的最大吸收剂量，往往是最大剂量当量所在处的吸收剂量的一个良好的度量。

在电磁辐射的情况下，照射量或组织中比释动能的测量也可以用来确定最大剂量当量。在某些情况下，特别是对于低能光子(大约小于300千电子伏)，并且如同在辐射巡测中那样，照射量是在自由空气中测量的，那么，由于散射辐射的影响最大剂量当量的数值(以雷姆为单位)可以高到等于照射量(以伦琴为单位)的数值的2倍^[112]。如果照射量在人体表面上测量，如同在个人监测时那样，这个倍数就要小得多。在这些情况下，如果最大剂量当量的值与最大容许剂量当量(MPD)可以比拟，就需要做出辐射能量的估计。

C. 防 护 测 量

剂量计*的响应当然是仅仅由于探测器本身吸收了能量。

*这里的“剂量学”、“剂量计”等名词是在广泛的通用的意义上使用的，它指一种辐射探测器，其测量结果能转换成下述任一辐射量，如照射量、粒子或能量流量、特定材料中的比释动能或吸收剂量、或者它们的速率。

适当地选择探测器和包围着探测器的材料，能够使探测器的响应正比于这里所关心的任何辐射量。正比性可能随着辐射的类型和能量、探测器及其外围材料的原子序数和几何形状，以及人体的方位和关键器官在人体中的位置而变化。仪器设计应当针对所关心的具体条件努力减小这种变化。仪器的刻度可以指示出所作的努力是否达到了合适的程度。

在进一步论述之前，首先要讨论一下在人体之类的吸收介质的不同深度上吸收剂量和比释动能之间的关系^[106]。仪器读数的意义要在考虑了这个关系以及仪器本身的性质和在刻度仪器时所用的特殊方法之后才能了解。

图 1 表示间接的电离辐射，例如 X 射线或快中子等，在均匀介质中引起的吸收剂量和比释动能随着深度而变化的情况。如果只有初级辐射入射，那末由于次级带电粒子的产生，吸收剂量将增加到某一极大值 (D_m)，如曲线 ABC 所示。如果除了初级辐射以外还有次级带电粒子入射，那么吸

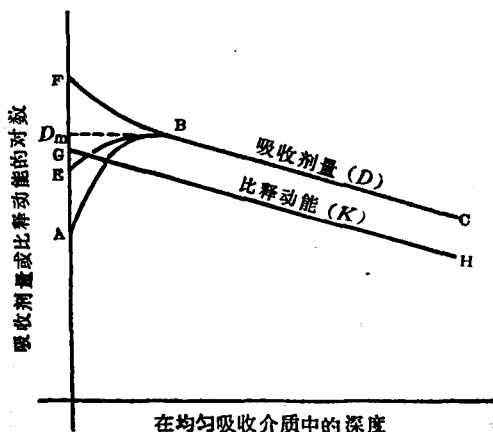


图 1 吸收剂量和比释动能之间的关系

收剂量将增加得较少,如曲线EBC所示。甚至显示减小,如曲线FBC所示。在曲线BC段上,不带电的初级辐射和带电的次级辐射之间存在着准平衡,吸收剂量的逐渐减少是由于初级辐射的被吸收。比释动能随着深度的变化遵循着曲线GH所示的关系。(比释动能决定于所关心点上的谱。要把初级辐射同不带电的次级辐射区别开来也许是困难的。)在图1中比释动能的图形画成一条直线,虽然在某些情况下在接近介质表面处也可能偏离直线。在国际辐射单位与测量委员会的第13号报告中有对这种现象的更详细讨论^[106]。

1. X 或 γ 辐射

在超过吸收剂量曲线的峰以外的深度上, D 和 K 的数值之差依赖于光子的能量。实际上,对于 Co^{60} 的 γ 射线来说这个差大约只有0.5%,而对于40兆伏的X射线来说这个差也不大于10%。因此,在组织中超过某一深度,而达到了准平衡以后,至少对40兆伏以下的初级X射线,在防护工作中可以把 K 的数值看做近似地等于 D 的数值。对于更高能量的光子来说,情况比图中给出的更复杂一点。在很高的能量水平下,随着次级电子能量的增加,有愈来愈多的韧致辐射过程与电离过程相竞争,因而在某些深度上比释动能可以超过吸收剂量。然后在更大的深度上发生带电粒子的准平衡。对 γ 辐射,阿蒂克斯(Attix)曾对吸收剂量和比释动能之间的关系作过进一步的讨论^[8]。

可以证明,在达到电子平衡或准平衡的条件下,电磁辐射在软组织中产生的以拉德为单位的吸收剂量的数值非常接近于以伦琴为单位的照射量的数值(D 比 X 小,但至多约小8%)^[103]。因此在这些条件下,可以把照射量的数值当做所关心点上的吸收剂量的数值加以应用,其准确度可以满足大

多数辐射防护的要求。

2. 中子辐射

象 X 或 γ 辐射的情况一样, 对于快中子辐射来说, 在大多数情况下, 在达到准平衡以后 D 和 K 的差别很小。在组织和其他含氢物质中, 次级粒子主要是反冲质子, 在介质中很小的深度上就达到了吸收剂量的最大值 D_m (参看表Ⅲ)。

表Ⅱ 各种能量的中子建立完全平衡所要求的
水的近似厚度

中 子 能 量 (兆电子伏)	厚度* (克·厘米 ⁻²)
5	0.034
10	0.12
20	0.42
50	2.2
100	7.6

* 所引证的厚度以质子在水中的射程为根据。这些数值对于电离室的组织等效壁和对于空气大体上也是正确的。在上述厚度的一半处给出的吸收剂量与平衡时的数值相差大约百分之几。

对于较高能量的中子来说, 由于核反应的发生, 在组织中出现的的情况变得越来越复杂。不能直接引起电离的粒子如中子和中性介子产生了, 比在低能时射程更大的致电离次级粒子出现了, 吸收剂量随着深度而积累的关系更加依赖于入射中子相对于人体表面的方向。对于没有人射的次级粒子掺杂在内的、能量为几百兆电子伏的中子束而言, 吸收剂量随着深度的增加可能达 5 倍之多。然而在实际上难以出现不存在次级粒子的情况, 对低能所用的近似仍然可以应用。显然