



核与辐射安全培训丛书

辐射安全与防护 管理手册

FUSHE ANQUAN YU FANGHU
GUANLI SHOUCHE

毛亚虹 编著

刘 华 审校

中国环境出版社

核与辐射安全培训丛书

辐射安全与防护管理手册

毛亚虹 编著

刘 华 审校

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

辐射安全与防护管理手册/毛亚虹编著. —北京: 中国环境出版社, 2012.6

(核与辐射安全培训丛书)

ISBN 978-7-5111-1030-5

I. ①辐… II. ①毛… III. ①辐射防护—安全检查—技术 IV. ①TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 112012 号

出 版 人 王新程
责任编辑 董蓓蓓
责任校对 扣志红
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2014 年 9 月第 1 版
印 次 2014 年 9 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/16
印 张 16
字 数 389 千字
定 价 90.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

序 言

随着经济技术的发展,我国核技术利用已经涵盖了工业、农业、医药、卫生等各个方面,并渗透到了经济社会许多领域,取得了瞩目的成就。为了在促进核技术利用发展的同时保护环境和公众健康,2005 年国务院 449 号令颁布了《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》(以下简称《条例》),规定由国务院环境保护部门对全国放射性同位素与射线装置的安全与防护工作实施统一监管。

由于历史原因,我国核与辐射安全文化的培植起步较晚,各核技术应用单位辐射安全意识和人员素质参差不齐;环保系统的辐射安全与防护工作也起步较晚,监管队伍专业技术比较薄弱。为了适应核技术利用和辐射安全监管的发展要求,快速提高辐射工作人员和监管人员的技术水平,环境保护部(国家核安全局)自 2006 年起组织对辐射工作人员和监管人员进行了辐射安全和防护培训;同时,为使监管工作在较高起点上正常开展、规范监督、提高监督水平,组织编制了《环境保护部辐射安全与防护监督检查技术程序》(以下简称《技术程序》)等一系列规范性文件。

自环境保护部(国家核安全局)开展辐射安全和防护培训以来,学员普遍反映通过培训在辐射防护和法规标准方面的知识确实得到了较大提高,但也反映教材内容太多又较深,重点不太突出,针对性不够强;《技术程序》自颁布实施以来,也有人反映不太理解其中的内容以及不会使用。因此,笔者针对核技术利用单位和监管工作的实际情况,将多年来培训授课的课件重新组织充实,尽量避开高深的理论,突出针对性和实用性,将医疗照射和工业照射的防护等内容放入了如何使用《技术程序》等章节,形成了这本《辐射安全与防护管理手册》(以下简称《手册》)。本书力求通俗易懂,让监管人员和核技术利用单位管理人员能在较短时间内尽快入门,掌握我国现行法规标准的主要要求。为方便使用,还附上了放射源和射线装置分类及常用核素衰变数据表等。

《手册》的主要对象是各级监管部门的监管人员和核技术利用单位的辐射安全与防护管理人员,也适用于放射工作人员。

《手册》正文从 2012 年 7 月才开始编写，虽经过反复修改，因时间过于匆忙，相信仍存在不少需要进一步完善的地方。同时，随着核技术利用事业的不断发展，还会有新的项目和新的问题陆续出现。希望各位读者多提宝贵意见。如果这本《手册》在特定的历史背景下，为推动我国核技术利用的管理起到了一点作用，作者就已备感欣慰。

毛亚虹

2012 年 10 月于北京

目 录

第一章 辐射防护基础.....	1
1.1 辐射防护物理基础.....	1
1.2 辐射生物效应.....	8
1.3 辐射防护的目标和原则.....	10
1.4 外照射防护基本措施.....	13
1.5 非密封放射性物质工作场所的主要危害因素.....	14
1.6 内照射防护基本措施.....	15
1.7 辐射工作场所.....	16
第二章 辐射安全责任.....	20
2.1 核技术利用单位的责任.....	20
2.2 监管部门的责任.....	21
第三章 辐射安全与防护管理.....	22
3.1 监管范围.....	22
3.2 排除、豁免和清洁解控.....	22
3.3 监管部门.....	26
3.4 法规设置的管理制度.....	26
第四章 辐射事故应急及处理.....	33
4.1 辐射事故的定义及分级.....	33
4.2 各部门在辐射事故应急中的分工.....	34
4.3 辐射事故应急预案.....	35
4.4 辐射事故应急响应.....	36
4.5 辐射事故调查处理.....	39
4.6 案例分析.....	41
第五章 辐射安全与防护监督检查.....	48
5.1 监督的责任.....	48
5.2 监督检查模式.....	49

5.3 监督检查频次	49
5.4 监督检查的主要内容	49
5.5 监管部门监督检查的实施	50
5.6 后续处理	51
5.7 监督检查中发现的重大问题管理	52
第六章 辐射安全与防护监督检查技术程序的使用	54
6.1 技术程序编制背景	54
6.2 监督检查表的使用	55
6.3 辐射安全与防护设施（举例）	56
6.4 规章制度及落实情况	59
6.5 法规执行情况	67
参考文献	71
附录 1 辐射安全与防护监督检查技术程序	72
附录 1-1 单位基本情况	72
附录 1-2 生产放射性同位素监督检查技术程序	73
密封源生产线 I 监督检查技术程序	73
密封源生产线 II 监督检查技术程序	78
放射性药物生产线监督检查技术程序	83
医疗植入用放射源生产线监督检查技术程序	88
甲级非密封放射性物质操作场所监督检查技术程序	93
乙级非密封放射性物质操作场所监督检查技术程序	98
丙级非密封放射性物质操作场所监督检查技术程序	103
加速器生产放射性同位素场所监督检查技术程序	108
自屏蔽式加速器生产放射性药物场所监督检查技术程序	114
附录 1-3 非医用放射性同位素使用监督检查技术程序	120
γ 辐照装置监督检查技术程序	120
自屏蔽式 γ 辐照器监督检查技术程序	125
刻度用 γ/n 源场所监督检查技术程序	129
放射源及放射性废物收贮单位监督检查技术程序	133
放射性同位素销售单位监督检查技术程序	137
γ 射线大型客体检查系统监督检查技术程序	141
γ 射线探伤场所监督检查技术程序	145
固定式 III、IV 和 V 类源使用场所监督检查技术程序	149
移动式 III、IV 和 V 类源使用场所监督检查技术程序	153

含放射源仪器生产场所监督检查技术程序	157
附录 1-4 非医用射线装置使用监督检查技术程序	161
非医用中高能加速器监督检查技术程序	161
科研用低能加速器监督检查技术程序	167
电子辐照加速器监督检查技术程序	172
加速器生产调试场所监督检查技术程序	176
II 类非医用 X 线装置监督检查技术程序	180
中子发生器应用场所监督检查技术程序	184
III 类非医用射线装置监督检查技术程序	188
附录 1-5 医用放射性同位素使用监督检查技术程序	192
γ 射线远距治疗装置监督检查技术程序	192
立体定向 γ 射线外科治疗装置监督检查技术程序	196
近距离 γ 射线治疗装置监督检查技术程序	200
非密封放射性物质医学应用场所监督检查技术程序	205
放射性核素发生器利用场所监督检查技术程序	210
附录 1-6 医用射线装置使用监督检查技术程序	214
质子（重离子）加速器治疗场所监督检查技术程序	214
医用电子直线加速器使用场所监督检查技术程序	220
医用治疗 X 射线机监督检查技术程序	224
数字减影血管造影 X 射线装置（DSA）监督检查技术程序	228
III 类医用射线装置监督检查技术程序	232
附录 2 放射源编码规则	236
附录 3 放射源分类办法	242
附录 4 射线装置分类办法	245
附录 5 常用放射性核素衰变数据表	246

第一章 辐射防护基础

1.1 辐射防护物理基础

1895 年德国物理学家伦琴发现了一种具有很强穿透能力的射线，由于当时不了解其性质，称其为 X 射线；1896 年法国学者贝可勒尔发现铀盐可放射出射线，并能使胶片感光，进一步证实了电离辐射的存在；1898 年居里夫人证实钍与铀一样具有放射性，不久又发现了同位素钋和镭。此后，核技术有了很快的进展。核技术最早被用于医学诊断和治疗。

1.1.1 电离辐射概念

辐射是一种长久以来就存在于自然界的物理现象，是指某种物质发出的粒子或波。

电离是指当具有一定能量的带电和非带电粒子与靶原子的轨道电子发生库仑及其他相互作用（其他相互作用针对非带电粒子）时，把本身的部分或全部能量传给轨道电子，如果轨道电子获得的动能足以克服原子的束缚，则逃出原子壳层而成为自由电子的过程。也指从一个原子、分子或其他束缚状态释放一个或多个电子的过程。

辐射可分为电离辐射和非电离辐射，能够引起电离的带电粒子和不带电粒子称作电离辐射，如能量大于 10 eV 的 X 射线、 γ 射线、中子、 α 射线、 β 射线等，电离辐射可以从原子或分子里面电离出至少一个电子。

不能引起电离的带电粒子和不带电粒子称作非电离辐射。如能量小于 10 eV 的紫外线、可见光、红外线、微波和无线电波等。

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871—2002）中给出的电离辐射的定义为：“指能在生物物质中产生离子对的辐射。”

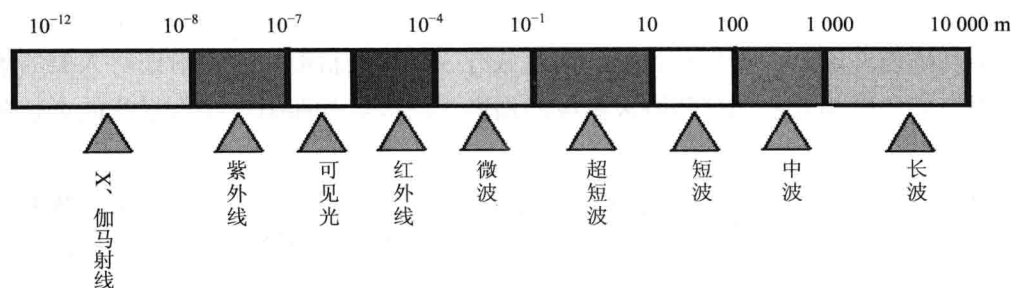


图 1.1 各种辐射能量

α 射线是一种带电粒子流，由于带电，它所到之处很容易引起电离。 α 射线有很强的电离本领，对人体内组织破坏能力较大。由于其质量较大，穿透能力差，在空气中的射程只有几厘米，只要一张纸或健康的皮肤就能挡住。

β 射线也是一种高速带电粒子，其电离本领比 α 射线小得多，但穿透本领比 α 射线大，但与X、 γ 射线比， β 射线的射程短，很容易被铝箔、有机玻璃等材料吸收。

X射线和 γ 射线的性质大致相同，是不带电波长短的电磁波，因此把它们统称为光子。两者的穿透力极强。

1.1.2 电离辐射的种类

电离辐射通过各种各样的途径进入我们的生活。有的来自天然的过程，例如地球上铀系的衰变；有的来自人类活动，如医学中使用的X射线。因此，我们按照地球上辐射的来源将它们分为天然辐射和人工辐射。

(1) 天然辐射

天然辐射是指来自天然辐射源的电离辐射。GB 18871 给出的天然辐射源的定义是：“天然存在的辐射源，包括宇宙辐射和地球上的辐射源。”宇宙射线从外层空间来到地球，地球自身也带有放射性。天然电离辐射遍布于整个人类的生活环境中。人类全都或多或少地暴露在天然辐射之中，食物、饮料以及空气中都存在着天然放射性。对大多数人来说，天然辐射是主要的辐射来源。它主要来自：

① 宇宙射线，即从宇宙空间进入地球的高能辐射。宇宙辐射来自外层空间，是许多种辐射的混合物，包括质子、 α 粒子、电子以及其他各种奇特的高能粒子。所有这些高能粒子都与地球的大气层发生强烈的作用，宇宙辐射到达地面时，其主要成分变为各种介子、中子、电子、正电子和光子。

由于大气的吸收作用，到达地球表面的宇宙辐射的总量大大减少。大气的这种屏蔽作用，意味着宇宙射线粒子的注量率在不同纬度和海拔高度有所不同。海平面上的剂量率比海拔较高的地方要低。在海拔 50 km 以上，宇宙射线注量率不再随高度变化，这表明其全是初级宇宙射线。次级宇宙射线的致电离辐射成分主要是 μ 介子、电子、光子，中子相对较少，由于大气层强烈吸收中子，故在海平面高度，中子的剂量贡献更小，但随海拔高度的增加而上升。

宇宙射线直接致电离剂量值受很多因素的影响，其中主要是海拔高度和地磁纬度。宇宙射线产生的剂量率随海拔高度的增加而增大，开始呈缓慢增加，2 km 之后迅速上升，至 20 km 处上升到一个高峰值。所以，我们在太空、高原旅行或乘坐飞机时，宇宙射线对人类的照射不可忽视。地磁纬度的影响效应则是随海拔高度的增高而增大。外照射中宇宙射线的贡献略低于原生核素。

② 宇生放射性核素，是指宇宙射线与大气层中的核素相互作用产生的放射性核素，有的是与地表中核素相互作用产生的。对公众有明显剂量贡献的是： ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 和 ^{22}Na ，其中 ^3H 、 ^{14}C 和 ^{22}Na 是人体组织中所含的放射性同位素，也是人体内天然辐射源的一部分。

宇宙射线经与大气层相互作用，不仅强度发生变化，能谱也发生变化。在人类生活的地球表面，很难见到高能宇宙射线，近地表面的宇宙射线主要是其低能部分。通常情况下，与原生

放射性核素产生的照射相比较，宇生放射性核素产生的照射是很小的，小于总照射的 1%。

③ 原生放射性核素，是指自有地球以来就存在于地壳中的放射性核素。据估计，地球生成已经 45 亿年，经历这么长的时间仍然存于地球上的放射性物质包括长寿命放射性核素及其衰变子体。原生放射性核素可分为两类：一类是衰变系列的核素，主要包括 ^{232}Th 系、 ^{238}U 系、 ^{235}U 系三个衰变系列；另一类是单次衰变的放射性核素，如 ^{40}K 、 ^{87}Rb 、 ^{138}La 、 ^{147}Sm 、 ^{176}Lu 等。

地壳中存在的三个级联衰变链，又称为天然放射系。它们的母体半衰期都很长，和地球年龄相当或者更长，因而经过漫长的地质年代后还能保存下来。它们的成员大多具有 α 放射性，少数具有 β 放射性，一般都伴随有 γ 辐射。每个放射系从母体开始，都经过至少 10 次连续衰变，最后达到稳定的铅同位素，分别是铀系（44.7 亿年）、钍系（141 亿年）、锕系（7.04 亿年），它们释放出 α 射线、 β 射线和 γ 射线。

这些原生放射性核素，广泛存在于地球的岩石、土壤、江河、湖海中，其活度、浓度和分布随岩石构造的类型不同而变化。花岗岩中的活度浓度最高；而土壤和岩石中所含的铀、钍、镭、钾等元素，以 ^{40}K 的活度浓度最高。

世界上个别地区，由于地表放射性物质的含量较高，其本底辐射水平明显高于正常本底地区，这类地区通常称为高本底地区。最有名的高本底地区位于印度的喀拉拉邦和巴西的大西洋沿岸，在这些地区，由地表辐射引起的空气吸收剂量率最高较正常本底地区高数十倍之多。我国广东的阳江也是高本底地区，该地区的天然辐射相当于一般地区的 4~6 倍。

(2) 人工辐射

一些人类的实践活动，如科学研究、工农业生产、医学诊断与治疗等，导致了放射性物质向环境的释放，或者放射源或射线装置直接对人员的照射。我们将人类受到的来源于人类的实践活动的辐射称为人工辐射。

人工辐射主要来源于核爆与核能生产、矿物开采、核技术利用和消费品等。人工辐射源是产生职业照射的重要来源，也是控制对公众照射的重要对象。

① 核爆与核能生产。利用加速器或核裂（聚）变反应获得的各种放射性核素，如钷、镅等超铀、超钷核素， ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{131}I 、 ^{140}Ba 等。核爆炸产生的人工放射性核素达 2 000 余种。

② 核技术利用。核技术利用指放射性同位素与射线装置的使用。核技术最初的应用是在医学领域，至今已有 100 年的历史。现在，核技术利用已经涵盖了工业、农业、医药、卫生等各个方面。

放射性同位素包括密封源和非密封放射性物质。GB 18871 给出的密封源的定义是：“密封在包壳里的或紧密地固结在覆盖层里并呈固体形态的放射性物质。密封源的包壳或覆盖层应具有足够的强度，使源在设计使用条件和磨损条件下，以及在预计的事件条件下，均能保持密封性能，不会有放射性物质泄漏出来。”

放射性同位素的辐射类型，大致可分为 α 源、 β^- 源、 β^+ 源（正电子源）、 γ 源、韧致辐射源、中子源和放射性核素热源等。目前可以利用的放射性核素有 100 多种，制成的放射源达 1 500 多种。

根据国务院第 449 号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》的规定，环境保护部发布的《放射源分类办法》根据对人类健康和环境的潜在危害程度，从高到低将放射源分为 I

类、II类、III类、IV类、V类。

射线装置主要是指通电以后能产生射线的装置，如X射线机和粒子加速器。射线装置的使用，也可能导致个人辐射剂量或者公众辐射剂量的增加，因此，射线装置也属于人工辐射来源之一。

根据国务院第449号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》的规定，环境保护部发布的《射线装置分类办法》根据对人类健康和环境的潜在危害程度，从高到低将射线装置分为I类、II类、III类。

③ 矿物开采。有开采价值的铀矿石中天然铀的含量仅为万分之几至百分之几，矿石开采出来后，在水冶设施中加工制成重铀酸铵、三碳酸铀酰铵、八氧化三铀、二氧化铀等初级制品。铀矿开采过程中主要的辐射危险来源于：吸入氡及其子体所产生的内照射；吸入铀矿尘的内照射；来自矿石的 γ 射线、 β 射线的外照射；以及表面污染导致的辐射照射。

我国伴生矿资源丰富，典型的伴生矿有稀土矿、锆英矿、铅锌矿、铝矿、锰矿、金矿、煤矿、磷矿等，这些矿物质含有天然放射性物质。在开采、冶炼、加工和利用过程中，矿物中的天然放射性物质也将被迁移、浓集和扩散，含有天然放射性核素的产品、废弃物也将对环境造成一定程度的放射性污染，从而对环境辐射水平产生影响。

④ 消费品。消费品是含放射性物质消费品的简称。GB 18871给出的含放射性物质消费品的定义是：“因功能或制造工艺需要将少量放射性物质加入其中或以密封源形式装配在内或因所采用的原材料与生产工艺而具有一定放射性活度的消费品”。消费品包括辐射发光产品（ ^3H 、 ^{147}Pm 、 ^{226}Ra ）；用气态光源的罗盘、鱼漂、电话拨号盘等（ ^3H ）；电子和电气装置（电子管、启辉器等），所用核素有Th、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{85}Kr 、 ^{63}Ni 等；静电消除器（ ^{210}Po 、 ^{241}Am ）；烟雾探测器（ ^{241}Am ）；含铀或钍的制品，如汽灯纱罩、义齿（假牙）、光学玻璃透镜、玻璃器皿和陶瓷餐具、彩釉砖、搪瓷标牌、景泰蓝等；避雷针（ ^{241}Am ）等。

表 1.1 2000 年世界范围天然和人工放射源所致年均个人有效剂量

放射源	剂量/mSv	照射的范围和趋势
天然放射源	2.4	典型范围为1~10 mSv，这与具体地点的环境有关，也有相当多的人口所受剂量达到10~20 mSv
大气核试验	0.005	已从最大的1963年的0.15 mSv逐渐降低，北半球相对较高，南半球相对较低
切尔诺贝利事故	0.002	已从最大的1986年的0.04 mSv（北半球的平均值）逐渐降低，事故现场附近较高
核能生产	0.000 2	随着核能计划的发展而增加，但又随着技术的完善而降低
医学检查	0.4	范围在0.04 mSv（最低健康医疗水平）和1.0 mSv（最高健康医疗水平）之间
职业照射	0.6	包括核燃料循环、辐射工业应用、国防活动、辐射医学应用、教育等的均值

1.1.3 重要的辐射物理量及其单位

(1) 放射性活度

放射性活度是表征放射性核素强度特征的物理量，其物理意义是在单位时间间隔内核素的

原子核发生衰变的数目。

国际制单位是贝克勒尔 (Bq), $1\text{Bq}=1$ 次衰变/s。原用单位是居里 (Ci), $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$ 。

放射性活度 $A = -\mathrm{d}N/\mathrm{d}t = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-(0.693/T_{1/2})t}$ 。

式中, $A_0 = \lambda N_0$ 是 $t=0$ 时的放射性活度; λ 为衰变常数, 指单位时间内每个原子核的衰变概率, $\lambda = 0.693/T_{1/2}$, $T_{1/2}$ 为半衰期。

放射性活度是辐射防护中常用的量, 这个量可以通过测量射线的数目来确定。

例题: 一个 ^{60}Co 源, 出厂时的活度为 111TBq , 出厂 5 年后的活度是多少?

$$\begin{aligned}\text{解: } A &= A_0 e^{-(0.693/T_{1/2})t} \\ &= 111 \times e^{-(0.693/5.27) \times 5} \\ &= 57.5 \text{ TBq}\end{aligned}$$

答: 出厂 5 年后的活度是 57.5 TBq 。

(2) 半衰期

半衰期为放射性原子核衰减到原来数目的一半所需要的时间。

不同放射性核素半衰期相差极大, 最长者可达数十亿年 (^{238}U 的半衰期为 45 亿年), 最短的仅为纳秒级 (^{133}Cs 的半衰期为 $2.8\times 10^{-10}\text{s}$)。不同放射性核素半衰期不同, 发出射线的能量差别也很大。

(3) 照射量

照射量是指 X 或 γ 射线的光子在单位质量空气中释放出的所有次级电子, 当它们完全被阻止在空气中时, 产生的同一种符号的离子的总电荷量。

$$X = \mathrm{d}Q/\mathrm{d}m$$

照射量用于描述 X 射线或 γ 射线辐射场的性质, 照射量的国际单位是库仑/千克, C/kg; 原用单位是伦琴, R。

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

(4) 吸收剂量

吸收剂量是当电离辐射与物质相互作用时, 用来表示单位质量的物质吸收辐射能量大小的物理量。其概念适用于任何电离辐射、任何物质。电离辐射向无限小体积内授予的平均能量除以该体积内物质的质量而得到的商, 即:

$$D = \mathrm{d}\epsilon/\mathrm{d}m$$

式中, $\mathrm{d}\epsilon$ 是电离辐射授予某一体积元中物质的平均能量, 而 $\mathrm{d}m$ 是该体积元中物质的质量。吸收剂量的国际制单位是焦耳/千克, J/kg; 专用名称是戈瑞, Gy。原来的单位是拉德, rad。

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

吸收剂量和照射量间存在如下关系:

$$D = fX$$

当照射量的单位用伦琴 (R) 表示, 吸收剂量用拉德 (rad) 表示, 对空气介质,

$$f = 0.873 \text{ rad/R}$$

当照射量的单位用库仑/千克 (C/kg) 表示, 吸收剂量用戈瑞 (Gy) 表示, 对空气介质,

$$f = 38.8 \text{ Gy/(C/kg)}$$

例题：如果用环境 γ 射线仪测得某处空气中的 γ 射线照射量率为 $32\text{ }\mu\text{R/h}$ ，试计算该处空气中的 γ 射线吸收剂量率。

解： $D=fX$
 $=0.873\times 32\times 10^{-6}\text{ rad/h}$
 $=27.9\times 10^{-6}\text{ rad/h}$
 $=27.9\times 10^{-8}\text{ Gy/h}$
 $=0.28\text{ }\mu\text{Gy/h}$

答：该处空气中的 γ 射线吸收剂量率为 $0.28\text{ }\mu\text{Gy/h}$ 。

(5) 辐射权重因子

在放射防护中关注的是某一组织或器官的吸收剂量的平均值（而不是某一点上的剂量）。已知随机性效应的概率不仅依赖于吸收剂量，而且还依赖于产生这个剂量的辐射的种类与能量。为此目的的权重因子称为辐射权重因子。它是根据射到身体上（或当源在体内时由源发射）的辐射种类与能量确定的。

表 1.2 GB 18871—2002 中辐射权重因子 ω_R

种类与能量范围	辐射权重因子
光子，所有能量	1
电子及介子，所有能量	1
中子，能量 $<10\text{ keV}$	5
10~100 keV	10
$>100\text{ keV}\sim 2\text{ MeV}$	20
$>2\sim 20\text{ MeV}$	10
$>20\text{ MeV}$	5
质子，不是反冲质子，能量 $>2\text{ MeV}$	5
α 粒子，裂变碎片，重核	20

我国现行国家标准（GB 18871—2002）使用的辐射权重因子是 ICRP（国际辐射防护委员会）1990 年报告书的值，而 ICRP 2007 年报告书推荐的辐射权重因子已有变化。

表 1.3 辐射权重因子 ω_R （ICRP 2007）

种类与能量范围	辐射权重因子
光子	1
电子及 μ 子	1
质子和带电 π 介子	2
α 粒子，裂变碎片，重核	20
中子	作为中子能量函数的连续曲线
$En<1\text{ MeV}$	$2.5+18.2\exp[-(\ln En)2/6]$
$1\text{ MeV}\leq En\leq 50\text{ MeV}$	$5.0+17.0\exp[-(\ln(2En))2/6]$
$En>50\text{ MeV}$	$2.5+3.2\exp[-(\ln(0.04En))2/6]$

(6) 当量剂量

考虑了辐射权重因子的吸收剂量称为当量剂量。由于引入了辐射权重因子, 可以获得组织或器官损伤的程度。

在组织或器官 T 中的当量剂量可表示为

$$H_T = \sum \omega_R D_{T,R}$$

式中, $D_{T,R}$ 为按组织或器官 T 平均计算的来自辐射 R 的吸收剂量, 其单位为焦耳/千克(J/kg), 专用名称为希沃特 (Sv)。

对于 X 射线和 γ 射线, 其辐射权重因子为 1, 所以当量剂量的值与吸收剂量的值相同, 而其他射线两者就不相等了。

(7) 组织权重因子

随机性效应概率与当量剂量的关系还与受照组织或器官有关。对组织或器官 T 的当量剂量加权因子称为组织权重因子 ω_T , 它反映在全身均匀受照下各组织或器官对发生辐射随机性效应的不同敏感性。

(8) 有效剂量

有效剂量为体内所有组织与器官加权后的当量剂量之和:

$$E = \sum \omega_T H_T$$

式中, H_T 为组织或器官 T 的当量剂量; ω_T 为组织 T 的组织权重因子。有效剂量也可表示为身体各组织或器官的双重加权的吸收剂量之和, 其单位为焦耳/千克 (J/kg), 专用名称为希沃特 (Sv)。

表 1.4 组织权重因子 (GB 18871—2002, ICRP 1990)

组织或器官	组织权重因子 ω_T
性 腺	0.20
红骨髓	0.12
结 肠	0.12
肺	0.12
胃	0.12
膀 胱	0.05
乳 腺	0.05
肝	0.05
食 道	0.05
甲状腺	0.01
皮 肤	0.01
骨表面	0.01
其余组织或器官	0.05

表 1.5 组织权重因子 (ICRP 2007)

组织或器官	组织权重因子 ω_T
骨髓、乳腺、结肠、肺、胃	0.12
膀胱、食道、睾丸、肝、甲状腺	0.05
骨表面、大脑、肾、唾液分泌腺、皮肤	0.01
其余组织	0.10

例题：职业照射人员的年有效剂量限值为 20 mSv，试计算有效剂量率的限值应是多少？

解：考虑职业工作人员每年工作 50 周，每周 5 天，每天 8 小时。则

$$\begin{aligned}
 E &= 20 \times 10^{-3} = \sum \omega_T H_T = \sum \omega_T \sum \omega_R D_{T,R} \\
 &= 1 \times 1 \times D \times 50 \times 5 \times 8 \\
 &= 2 \times 10^3 D
 \end{aligned}$$

将年有效剂量限值为 20 mSv 代入，得到

$$\begin{aligned}
 20 &= 2 \times 10^3 D \\
 D &= 10 \times 10^{-6} \text{ Sv/h} = 10 \mu\text{Sv/h}
 \end{aligned}$$

答：有效剂量率的限值应是 10 $\mu\text{Sv/h}$ 。

(9) 待积有效剂量

进入人体的放射性核素在一段指定时间内预期产生的总剂量，叫待积有效剂量。

$$E(\tau) = \sum W_T H_T(\tau)$$

式中， $H_T(\tau)$ 指积分至 τ 时间组织 T 的待积当量剂量； W_T 指组织 T 的组织权重因子。未对 τ 加以规定时，对成年人取 50 年，对儿童取 70 年。

$H_T(\tau)$ 和 $E(\tau)$ 专用名称和单位都为希沃特 (Sv)。

(10) 剂量限值

GB 18871—2002 给出的剂量限值的定义是：“受控实践使个人所受到的有效剂量或当量剂量不得超过的值。”

1.2 辐射生物效应

1896 年美国学者格鲁柏在进行研制 X 射线管的实验时，手上发生了皮炎。此后，一些研究证实长期 X 射线、 γ 射线过量照射可引起皮肤红斑、脱毛、皮肤溃疡、造血障碍、神经衰弱等，人们开始认识到电离辐射的损伤效应，并进行了辐射剂量单位、辐射防护和辐射损伤防治的研究。

1.2.1 电离辐射的生物效应分类

电离辐射作用于机体后，其能量传递或沉积于机体的分子、细胞、组织和器官所造成的形态和功能的后果，称为电离辐射的生物效应。

按照电离辐射生物效应显现的不同个体，分为：

躯体效应：电离辐射诱发的机体生物效应，显现于受照射者自身，发生在体细胞内，存活

时间不超过个体的寿命期限。一定要在受照射者的生存期显现出来。

遗传效应：电离辐射影响受照射者的子代，如辐射诱发的各种遗传性疾病。发生在胚胎细胞，将遗传信息传递给新的个体，使遗传信息在受照者的第一代或更晚的后代中显现出来。

按照电离辐射生物效应出现的不同时间，分为：

早期效应（也称急性效应）：照射后几天或几周内出现。

远后效应（也称晚期或慢性效应）：照射后数月或几年或更长时间才出现。

按照电离辐射生物效应产生的不同危害，分为：

随机性效应：受照后细胞的结局有三种：① 细胞死亡；② 细胞未受损伤或损伤后修复正常；③ 细胞发生变异但没有死亡，有可能形成变异了的子细胞克隆，当机体免疫监控不健全时，经过不同的潜伏期后，变异了的子细胞克隆可能发生恶性变化，产生肿瘤。GB 18871—2002 中随机性效应定义为：“发生几率与剂量成正比而严重程度与剂量无关的辐射效应。一般认为，在辐射防护感兴趣的低剂量范围内，这种效应的发生不存在剂量阈值。”辐射致癌效应就是典型的随机性效应。若这种变异发生在性细胞（精子或卵子），基因突变的信息有可能传给后代，则称为遗传效应，这是另一种随机性效应。

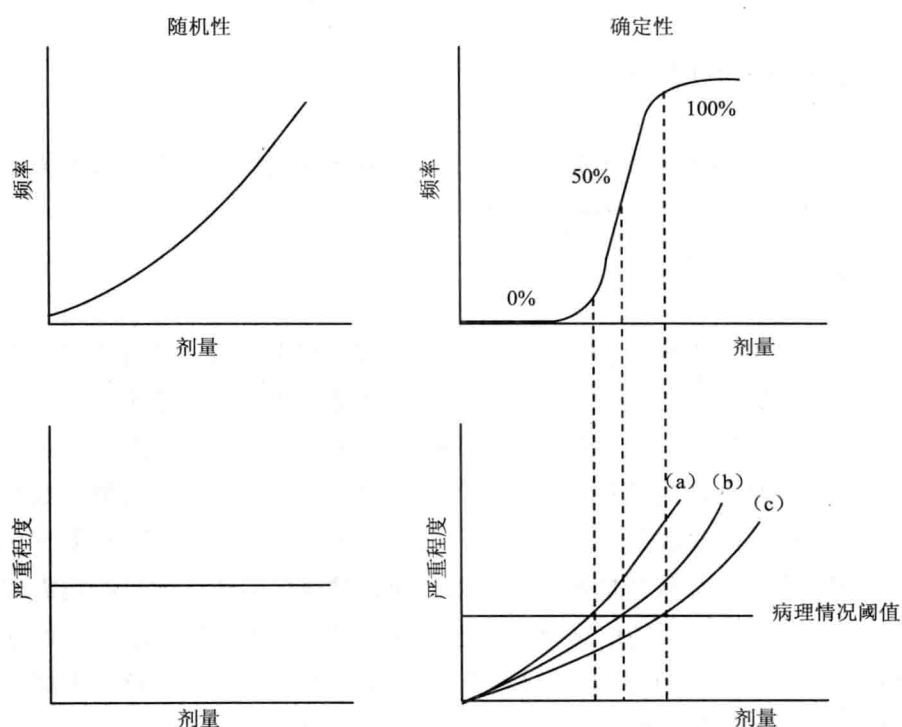


图 1.2 电离辐射生物效应与剂量的关系

确定性效应：如果机体组织或器官受到照射，有足够多的细胞被杀死或不能繁殖和发挥正常功能（细胞的丢失率>补偿率），将会丧失器官的功能。由于组织或器官丢失了大量的细胞，临床上可查出该组织或器官的严重功能性损伤。GB 18871—2002 中确定性效应定义为：“通常情况下存在剂量阈值的一种辐射效应，超过阈值时，剂量愈高则效应的严重程度愈大。”ICRP 在 103 号报告中将确定性效应称为组织反应。