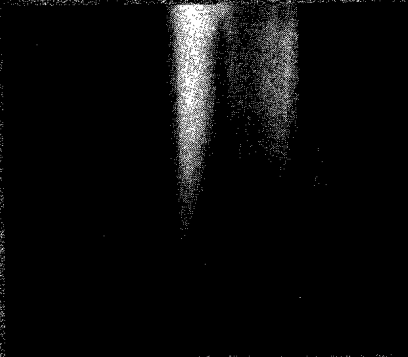


檢驗核医

江蘇



四、本书内容、学习方法和要求

全书分三部分，第一部分简要介绍与检验核医学有关的基础知识，内容有核物理学、核射线测量和辐射防护的基础知识。第二部分阐述检验核医学的基本技术、数据处理和质量控制。第三部分介绍检验核医学常用检测项目的测定方法和临床应用。根据医学检验专业的培养目标和实际需要，本书内容侧重于放射免疫分析的基础理论和应用技术。

检验核医学是一门理论性和技术性都比较强的课程，内容十分丰富，涉及的面很广，需要运用许多学科的知识。检验核医学技术大多是超微量分析，要求操作特别精确和准确。要学好检验核医学，必须有核物理学、核射线测量和辐射防护的基础知识和核射线测量技能；熟悉检验核医学的基本理论和基础知识，掌握基本操作技能；以及具有医学和其它相关学科的知识才能胜任检验核医学的实际工作，并能进行开发性研究，不断探索和创立新的检验核医学技术，开拓应用领域。

（镇江医学院 蒋慧权 重庆医科大学 王鼎年）

编写说明

检验核医学是高等医学院校医学检验专业的一门专业课程，对培养高级医学检验人才是十分必要的。为适应教学需要，依据医学检验专业的培养目标和教学计划，参照各校的教学内容和教学时数，结合检验核医学的现状和发展编写了本教材。关于实验部分，考虑到各校具体条件不同，暂没有编入。全书内容力求实用、新颖，适于作医学检验专业教材，也可供核医学和临床检验专业人员及临床医师参考。

本书由镇江医学院、重庆医科大学、湖南医学院、江西医学院、福建医学院五校部分核医学教师联合编写。在编写和出版过程中，得到五校领导的大力支持，并受到许多单位同行和有关同志的热情帮助，在此一并致以深切的谢意。

由于我们的水平有限，书中不足和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1987年12月

绪 论

检验核医学是核医学与医学检验相融合的一门新课题,是现代医学检验的重要组成部分。本门课程的开设对实现医学检验现代化及促进核技术在医学检验中的应用将起到积极作用。

一、检验核医学的任务及其在医学检验中的地位

检验核医学的主要任务是应用核医学的示踪技术和超微量分析技术来检测体内各种微量物质,研究人体在生理和病理情况下的代谢规律,为临床诊断疾病和医学基础理论的研究提供依据。

核医学是研究放射性核素及核射线的医学应用及其理论基础的学科,它体现了医学科学的发展水平,是医学科学现代化的重要标志之一。核医学可分实验核医学和临床核医学两部分,前者以研究生命现象和病理机制为主要内容,后者是以诊断和治疗疾病为主要内容。当前核医学的发展已逐步形成若干分支学科,检验核医学就是其中之一,此外还有核肝病、核神经病学、核心脏病学、核内分泌学、老年核医学、儿科核医学等。

近代科学发展中各学科之间的渗透、交叉,促进了检验核医学的形成。它的超微量分析技术灵敏度可达 $10^{-9} \sim 10^{-15}$ 克,使机体内许多原来认为无法测定的微量物质如内分泌激素、维生素、药物、微量元素等均可准确定量。它的示踪技术可对药物和生理物质进行示踪动力学、代谢机制和精确定位等研究。这些核技术已成为医学检验专业中先进的和不可缺少的技术基础之一。检验核医学的兴起开拓了医学检验的应用领域,而且与医学和其它科学的最新技术成就一起使医学检验技术发生了划时代的变化。因此,检验核医学在医学检验的现代化中占有重要的地位。

二、检验核医学中常用的基本技术

1. 放射配体分析(又称体外放射分析) 是以放射性核素为示踪物标记配体(或特异性结合物),以结合反应原理为基础,在体外条件下进行微量物质定量测定的核技术。因特异性结合物的不同,放射配体分析有许多种类。如以特异抗体为结合物,有放射免疫分析和免疫放射分析;以特异的结合蛋白质为结合物,有竞争性蛋白结合分析;以相应的受体为结合物,有放射受体分析和受体放射配体结合分析等。

2. 活化分析 是以中子、光子或带电粒子作用于物质使之活化再进行分析,从而获得该物质组成元素的定性和定量结果的核技术,医学上主要用于微量元素的检测。

3. 稳定核素分析 用同位素稀释法作微量物质的精确定量,稳定核素也可作为示踪剂应用于人体,追踪药物和生理物质的代谢途径,稳定核素可与放射性核素配合用于双标记实验。

4. 放射自显影术 是以放射性核素的示踪原理为基础,利用射线能使感光材料感光的特点

性,用以研究物质在样品中分布状态的一种核技术。

在上述这些检验核医学技术中,当前在医学检验中广泛应用的是放射配体分析,其中以放射免疫分析尤为突出。

三、检验核医学的进展

当前,各种检验核医学技术的发展十分迅速,分述如下:

1. 放射配体分析 此方法起始于60年代初创立的放射免疫分析。由于其具有灵敏度高、特异性强、准确度高、方法简便、取样量少等优点,已广泛应用于内分泌学、生物化学、药理学、生殖生理学、免疫学、分子生物学及临床学科等各个领域。几乎一切生物活性物质均可用这类方法测定,迄今国际上用它检测的微量生物活性物质已达300多种,我国虽然起步较晚,但发展却十分迅速,建立的放射免疫分析项目也已有70多种。

放射配体分析的发展动向是:①随着蛋白质分析技术的发展,使抗原纯度日臻完善,尤其是单克隆抗体新技术的应用,使抗原和抗体的纯度又有了新的突破。②放射性核素标记技术的进展,如用 ^{125}I 标记来代替 ^3H 标记,在放射性核素标记技术中采用乳过氧化酶和葡萄糖氧化酶促标记法、联结标记法以及Iodogen固相氧化剂标记法等,使标记抗原的质量有新的提高。③在放射配体分析方法中,关键的分离技术趋向采用操作简便、结果可靠的固相分离技术、磁化颗粒分离技术等实用性更好的方法。④单克隆抗体的应用,使免疫放射分析重现其活力,尤其是建立了固相化的双位点免疫放射分析,这是一种集多种先进技术于一体的更令人满意的和有发展前途的超微量免疫分析系统。⑤放射受体分析技术有很大的发展,已从实验研究进入临床应用领域,放射受体分析不仅可测定各种激素和药物的浓度,还为受体的研究提供了唯一的直接定量手段,可直接推算受体量及其亲和常数,为进一步研究激素的生理效应提供方法。⑥扩大测量品种,开拓应用领域。如甲状腺游离激素、神经系统激素、消化系统激素和心素等放射免疫分析方法的相继建立。⑦放射免疫分析试剂盒的商品化和标准化,测定方法和数据处理的自动化以及加强质量控制等,使放射免疫分析技术走上严格定量的阶段。

放射配体分析目前面临着酶免疫分析和荧光免疫分析等非核技术的竞争和挑战,但由于它本身在方法和技术上的不断发展、完善和成熟,在实际应用中仍具有很强的生命力。

2. 活化分析 近年来由于活化装置和探测仪器的不断完善和发展,以及活化分离手续的日益简化,使活化分析得到很大的发展,其中带电粒子活化分析,特别是质子激发X线发射分析(PIXEA)的发展更为迅速。活化分析已成功地应用于环境污染监测、食品检查、职业病、肿瘤、冠心病、地方病和法医等许多领域。活化分析的应用也大大促进了稳定核素分析的医学应用。

3. 稳定核素分析 由于检测技术的提高,如高能核磁共振仪、气相-质谱联合仪器和分析技术的发展,以及稳定核素大规模生产的实现,故近年来稳定核素分析技术的应用得到了很大的发展,已由基础医学研究进入临床应用领域。

4. 放射自显影术 由于电子显微镜技术与放射自显影术相结合,以及感光材料和操作技术的不断改进,放射自显影术的示踪研究已由细胞水平进入亚细胞水平,由定性定位进入到定量阶段,使放射自显影术在医学和生物学上的应用获得很大的发展。

目 录

绪论	(1)
第一章 核物理基础知识	(1)
第一节 原子的基本结构	(1)
第二节 放射性核素与核衰变	(1)
第三节 射线与物质的相互作用	(8)
第四节 辐射量	(8)
第二章 核射线的探测	(11)
第一节 射线探测器	(11)
第二节 记录脉冲信号的仪器	(13)
第三节 γ 放射性测量	(13)
第四节 β 放射性测量	(15)
第五节 放射性计数测量的统计误差	(26)
第三章 辐射防护基础	(29)
第一节 作用于人体的电离辐射源	(29)
第二节 辐射防护标准	(30)
第三节 放射免疫实验室的防护要求	(31)
第四节 安全操作技术规程	(33)
第五节 放射性废物、废液及废气的处理	(34)
第六节 外照射防护的基本方法	(35)
第四章 放射免疫分析的基本原理	(36)
第一节 概述	(36)
第二节 放射免疫分析的基本原理	(37)
第三节 亲和常数的计算	(40)
第五章 建立放射免疫分析的基本条件	(43)
第一节 抗原以及人工免疫原的制备	(43)
第二节 抗血清的制备及鉴定	(47)
第三节 标记抗原	(50)
第四节 标准品	(55)
第五节 分离技术	(57)
第六章 放射免疫分析方法的设计及数据处理	(60)
第一节 放射免疫分析方法的设计	(60)
第二节 剂量反应曲线和数据处理	(67)
第七章 放射免疫分析的质量控制	(77)
第一节 放射免疫分析中的误差	(77)

第二节	放射免疫分析的质量控制指标	(80)
第三节	实验室内部质量控制	(94)
第四节	实验室间的外部质量评价	(100)
第八章	其他放射配体分析法	(102)
第一节	放射受体分析及受体放射配体结合分析	(102)
第二节	免疫放射分析法	(108)
第三节	竞争性蛋白结合分析	(109)
第九章	活化分析法及稳定核素分析法	(110)
第一节	活化分析法	(110)
第二节	稳定核素分析法	(114)
第十章	放射自显影的基本技术	(118)
第一节	放射自显影的一些有关的问题	(118)
第二节	放射自显影的分类	(120)
第三节	制备放射自显影片的盖本方法	(120)
第四节	电子显微镜放射自显影术	(121)
第五节	放射自显影术的应用	(122)
第十一章	下丘脑-垂体-甲状腺轴激素的检测	(123)
第一节	血清甲状腺放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(124)
第二节	三碘甲状腺原氨酸放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(126)
第三节	人血清 $3, 3', 5'$ -三碘甲状腺原氨酸放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(127)
第四节	人血清促甲状腺激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(129)
第五节	人血清促甲状腺激素释放激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(131)
第六节	人血清生长激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(132)
第七节	人卵泡激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(134)
第八节	人促黄体生成激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(136)
第十二章	性腺、肾上腺素及肾素-血管紧张素的检测	(138)
第一节	血浆睾酮放射免疫分析 (^3H 标记)	(138)
第二节	血液孕酮放射免疫分析 (^3H 标记)	(140)
第三节	血浆雌二醇放射免疫分析 (^3H 标记)	(142)
第四节	雌三醇放射免疫分析 (^3H 标记)	(144)
第五节	绒毛膜促性腺激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(146)
第六节	人胎盘泌乳素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(148)
第七节	皮质醇放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(150)
第八节	血浆皮质酮放射免疫分析 (^3H 标记)	(152)
第九节	醛固酮放射免疫分析 (^3H 标记)	(154)
第十节	血管紧张素放射分析免疫 (^{125}I 标记)	(156)
第十三章	胃肠及胰腺激素的检测	(160)
第一节	胃肠激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(160)
第二节	胰腺激素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(163)
第十四章	非激素蛋白质的检测	(169)
第一节	人肌红蛋白放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(169)

第二节	核蛋白放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(170)
第三节	癌胚抗原放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(172)
第四节	甲胎蛋白放射免疫电泳自显影测定 (^{125}I 标记)	(174)
第五节	β_2 微球蛋白的放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(176)
第六节	免疫球蛋白放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(178)
第七节	β 血小板球蛋白放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(182)
第十五章	抗体及病原体检测	(184)
第一节	甲状腺疾病的抗体检测 (^{125}I 标记)	(184)
第二节	血清 DNA 抗体放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(186)
第三节	肝炎病毒抗原及抗体的放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(187)
第十六章	药物浓度检测	(192)
第一节	药物放射免疫分析的特点	(192)
第二节	地高辛放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(193)
第三节	庆大霉素放射免疫分析 (^{125}I —标记)	(195)
第四节	苯妥英钠放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(196)
第五节	苯巴比妥放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(198)
第十七章	其它活性物质检测	(200)
第一节	前列腺素放射免疫分析 (^3H 标记)	(200)
第二节	血栓素放射免疫分析 (^3H 标记)	(203)
第三节	环磷酸腺苷放射免疫分析 (^3H 标记)	(205)
第四节	环鸟苷酸放射免疫分析 (^3H 标记)	(207)
第五节	血清甘氨酸放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(209)
第六节	心钠素放射免疫分析 (^{125}I 标记)	(210)
第七节	胸腺嘧啶核苷掺入法淋巴细胞转化试验 (^3H 标记)	(211)
附录1	常用放射性核素主要物理常数	(213)
附录2	通用放射性核素衰变计算表	(215)
附录3	十进位数词首及符号	(217)
附录4	相对离心力计算	(217)

第一章 核物理基础知识

第一节 原子的基本结构

世界万物都是由各种元素构成的。现已发现的元素有109种。其中,93种是天然存在的,另16种是人工制造的。构成元素的基本单位是原子。原子由原子核和核外电子组成,原子核位于原子的中心,电子按照一定轨道绕核运动。原子核又由质子和中子等(统称为核子 nucleon)组成。原子的化学和物理特性主要取决于原子核中的质子数和中子数及其能量状态。国际上通常以符号 A_ZX 来表示原子的结构,其中X表示某元素的化学符号;A为该元素的质量数,它近似的等于原子核内的质子和中子的总数;Z为元素的原子序数,等于原子核中的质子数。例如:常用的元素 ${}^{127}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{131}_{53}\text{I}$ 、 ${}^1_1\text{H}$ 、“131”、“125”、“3”均表示元素的质量数;“53”、“1”为原子序数。通常还可把 A_ZX 简写为 AX 。

核素 (nuclide) 凡原子核具有特定的质子数、中子数以及一定能量状态的原子,即称为核素。核素和元素是不同的概念。质子数相同的原子,属于同一种元素,它们的原子序数相同,具有相同的化学特性,但原子核内的中子数可以不相同,因而物理特性可以有某些差异。每种元素可以包括若干种核素。例如: ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^{127}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{131}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{197}_{79}\text{Au}$ 、 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ 、

${}^{115}_{49}\text{In}$ 、 ${}^{76}_{34}\text{Se}$ 等分别为6种元素的8种不同的核素。目前已知的核素有1900多种。

同位素 (isotope) 凡同一种元素的不同核素,它们在元素周期表上处于相同位置,互称为该元素的同位素。例如: ${}^{127}_{53}\text{I}$ ~ ${}^{131}_{53}\text{I}$ 分别为20种核素,彼此都是碘的同位素。由此可见,核素是表示某种原子具有一定特征的名称,同位素则是表示核素之间相互关系的名称。每种元素都有几种或几十种天然和人工的同位素,如 ${}^1_1\text{H}$ 有3种, ${}^6_6\text{C}$ 有10种同位素。

同质异能素 (isomer) 原子核内的质量数和原子序数相同,而能量状态不同的核素称为同质异能素。激发态的原子是基态原子的同质异能素。书写时一般在核素质量数后面加上字母“m”,以表示处于较高能态,即亚稳态。如 ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$,前者与后者为同质异能素。

同质异位素 (isobar) 原子核内质子数不同(原子序数不同)而质量数相同的核素,称为同质异位素。例如: ${}^{131}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{131}_{55}\text{Cs}$; ${}^{132}_{53}\text{I}$ 、 ${}^{132}_{52}\text{Te}$ 等。

第二节 放射性核素与核衰变

一、稳定核素与放射性核素

在已发现的1900多种核素中,不稳定核素有1700多种,稳定核素只有279种。不稳定核

素能自发地发生衰变,并放射出一种或几种射线而转变为别种核素,又称为放射性核素(radionuclide)。此种转化过程称为放射性核衰变(decay)。放射性核素有天然的和人工的。原子序数在82以下的天然放射性核素为数不多,原子序数等于和大于83的元素则只有放射性核素,没有稳定核素。人工放射性核素可以由核反应堆、加速器、放射性核素发生器等生产制造,以获得符合医学要求的放射性核素。

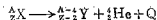
二、核衰变和衰变规律

核衰变是由原子核内部的矛盾运动而决定的。每种元素的原子核,其中子数和质子数必须在一定的比例范围内才是稳定的,比值过大或过小则都不稳定,以致发生核衰变。核衰变的速度、方式及放射出的射线种类和能量均各有不同,这取决于原子核内部的特征,不受外界环境的影响。

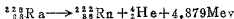
放射性核素的主要衰变方式有:α衰变、β⁻衰变、β⁺衰变、核外电子俘获及γ跃迁等。经过衰变后的核有的是稳定的,有的是不稳定的,后者继续衰变直至稳定。通常把衰变前的核称为母核,衰变后的核称为子核。子核若继续衰变则有第三代子核以至更多代的子核。

(一) 核衰变方式

1. α衰变 α衰变主要发生在原子序数大于82的重元素核素。每次衰变放射出一个α核,称α粒子,母核失去两个质子和两个中子,故子核的原子序数较母核减少2,原子质量数减少4。α衰变可用下式表示:



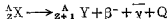
例



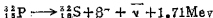
中X代表母核,Y为子核(核衰变后的核),Q表示衰变能。

α粒子是带正电荷的粒子流,α粒子的能量都是固定值,是不连续的单能线谱。α粒子在空气中射程很短,穿透能力很小,用一张纸就可以遮蔽,但其电离能力很大。

2. β⁻衰变 主要发生在中子数相对过剩的核素。核内一个中子转变为质子,总核子数不变,同时放射出一个负电子及一个反中微子($\bar{\nu}$)。衰变后子核的原子序数比母核增加1,原子质量数不变。 $\bar{\nu}$ 是一种质量极小的不带电的中性粒子。β⁻衰变可用下式表示:



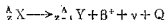
例



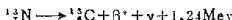
衰变过程中所释出的能量主要由β⁻粒子和反中微子带走,能量随机地分配给β⁻和 $\bar{\nu}$,β⁻粒子能量可以从0到Q,形成β⁻连续能谱。

β⁻粒子是高速运动的粒子流,空气射程比α粒子远,而电离能力则比α粒子弱,能被铝箔和组织所吸收。

3. β⁺衰变 主要发生在核内中子相对不足的核素。可看作是核内一个质子转变为中子,同时放射出一个正电子(β⁺粒子)及一个中微子(ν)的过程。核子总数不变,原子序数减少1而原子质量数不变。β⁺衰变可用下式表示

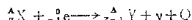


例



β^{+} 粒子是带正电荷的正电子，其能量也是连续谱。天然存在的核素不发生 β^{+} 衰变，只有人工放射性核素衰变时才会发生 β^{+} 衰变。

4. 核外电子俘获 (electron capture, EC) 发生在核内中子数相对不足的核素。衰变时原子核先从核外较内层的电子轨道 (K层几率最大、L层次之) 俘获一个电子，使核内一个质子转化为中子，同时放射出一个中微子。原子质量数不变，原子序数减少1。电子俘获可用下式表示：



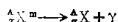
例



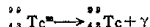
发生电子俘获后，轨道上少了一个电子，留下一个空位，此时较外层轨道上有一个电子跃迁到内层填补空缺。由于外层电子的能量比内层电子高，多余的能量就以X线的形式辐射出来，该X线为子核的特征X线。有时此多余的能量传给另一轨道的电子，使之脱离轨道的束缚成为自由电子，称俄歇电子 (Auger electron)。

5. γ 跃迁及同质异能跃迁 上述四种衰变的子核可能先处于激发状态，在退回到基态时以 γ 光子的形式释出多余的能量。此过程称为 γ 衰变或 γ 跃迁。有时激发态的核发生能级跃迁时，将释出的能量传给一个核外电子 (K层几率最大)，使之脱离轨道而发射出去，此过程称为内转换 (internal conversion, IC)。发射出的电子称为内转换电子。

同质异能跃迁实质上是延迟的 γ 跃迁。核衰变过程中形成的激发态的子核可维持较长的时间，通过 γ 跃迁衰变成原子序数和原子质量数均与激发态核相同，而能级不同的基态子核，可测出 γ 跃迁的半衰期。此过程即称为同质异能跃迁，激发态核素与基态核素是同质异能素。 ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}\text{Tc}$ 、 ${}^{113\text{m}}\text{In}$ 和 ${}^{113}\text{In}$ 都是可辐射出 γ 射线和内转换电子的同质异能素。可用下式表示：



例



核衰变是比较复杂的过程，即使是同一种核素，也常并存有两种或两种以上的衰变方式，并且各有一定的机率。例如： ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ ， β^{-} 占31%， β^{+} 占15%，EC占54%。

(二) 放射性衰变规律

放射性核素自发地进行衰变。不同的核素衰变速度有快有慢，同种核素的每个核的衰变也不是同时发生的，而是遵循着一定规律进行的。实验证明，单位时间 (dt) 内衰变的核数 (dN) 与存在的核的总数 (N) 成正比，即

$$\frac{dN}{dt} \propto N$$

或

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \dots\dots\dots (1-1)$$

λ 为衰变常数 (decay constant)，其含义是同种核素在单位时间内，母核衰变掉的核数占当时存在的核总数的百分比。它是个恒定值，各种核素都有自身的 λ 值，它反映该种核

或

$$A = A_0 e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}} \quad (1-5)$$

(1-5)式中 A_0 、 A 分别为衰变前后的放射性活度。

如果知道某种放射性核素的半衰期和出厂到使用时经过的时间(t)，就可用(1-4)或(1-5)式进行计算现有核素的量。实际工作中常用放射性核素衰变计算表来求某时刻核素的活度。

按照(1-5)式： $A = A_0 e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}}}$

根据 $t/T_{1/2}$ 值，由通用放射性核素衰变计算表(见附录)查得 $e^{-\lambda t}$ 值，乘以已知 A_0 即得 A 量。

例如： ^{131}I 放射性浓度为 86mCi/ml ，经过17天后，每 ml 尚有多少 mCi ?

已知 ^{131}I 的 $T_{1/2}$ 为3.01天， $t/T_{1/2} = 17/3.01 = 2.11$ ，查表， $e^{-\lambda t}$ 为0.232，则 $A = A_0 \times 0.232 = 86 \times 0.232 = 19.95\text{mCi/ml}$

放射性核素的半衰期($T_{1/2}$)表示衰变速度，表1-1列出常见放射性核素的半衰期。一般把半衰期短于10小时的核素称为短半衰期核素。随着临床诊断和医学研究的发展，短半衰期核素的医学应用已成为核医学的重要发展方向。

在医学领域中还经常使用生物半衰期(biological half life, T_b)及有效半衰期(effective half life, T_e)。前者是指生物体内的放射性核素由于生物代谢自体内排泄、分泌，使其从体内排出到原有量的一半所经历的时间。有效半衰期是指放射性核素由于生物代谢和放射性核素本身衰变的共同作用，使核素的量减少到原有量的一半所需要的时间。三者的关系如下

表1-1 常用放射性核素半衰期

核 素	$T_{1/2}$
^{137}Cs	2.8×10^{10} 秒
^{14}C	20,35分
^{18}F	1.78小时
^{131}I	8.04天
^{51}Cr	27.72天
^{59}Fe	45.1天
^{125}I	60天
^3H	12.5年
^{14}C	5720年
^{235}U	45亿年

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_b \quad (1-6)$$

$$1/T_e = 1/T_{1/2} + 1/T_b \quad (1-7)$$

$$T_e = \frac{T_{1/2} \times T_b}{T_{1/2} + T_b} \quad (1-8)$$

(三) 放射性活度及其单位

放射性活度是用以表示核素特征的一个重要辐射量。1975年第15届国际计量大会批准了国际制单位的专门名称为贝可勒尔(Becquerel)，简称贝可，符号为 Bq 。其含义是1 Bq 等于每秒1次核衰变。放射性活度的国际制单位是 S^{-1} 。

$$1\text{Bq} = 1\text{S}^{-1}$$

过去一直沿用居里(Ci)为放射性活度专用单位。1Ci等于 3.7×10^{10} 次核衰变/秒(dps)。贝可与居里换算关系是:

$$1\text{Bq} = 1\text{S}^{-1} = 2.703 \times 10^{-11}\text{Ci}$$

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$$

居里的派生单位有毫居里(mCi)和微居里(μCi)，

$$1\text{Ci} = 10^3\text{mCi} = 10^6\mu\text{Ci}$$

在放射性工作中，人们还经常使用放射性比度（或比放射性）和放射性浓度这两个术语。

放射性比度是指每单位质量物质内所含有的放射性活度。其单位常用 Bq/mg 、 mCi/mg 或以分子量表示为 Bq/mol 、 mCi/mol 。

放射性浓度是指单位容积物质内所含有的放射性活度。常用单位是 Bq/ml 和 mCi/ml 。

第三节 射线与物质的相互作用

一、带电粒子与物质的相互作用

带电粒子通过物质的原子时，由于静电库仑力作用，使核外壳层电子获得能量，由较低能级的轨道跃迁到较高能级的轨道，或者使电子完全脱离原子核的引力束缚而成为自由电子。前种现象称为激发(excitation)；后种现象称为电离(ionization)。如果相互作用力很强，被电离的电子就可能带有较大的动能，它又能使其他原子产生电离，这种现象称为次级电离。

带电粒子与物质作用时，在它经过的途径四周产生许多离子对，单位长度径迹周围形成的离子对数目，称为电离密度(ionizational density)。电离密度是衡量射线粒子电离能力的指标，它与入射粒子的速度有关。速度大，则电离密度小；速度小，则电离密度大。在单位长度径迹上能量的消耗，称为传能线密度(linear energy transfer, LET)。传能线密度与入射粒子的能量、吸收物质的原子密度和原子序数等因素有关。对于同种被作用物质，同等能量的 α 、 β^- 粒子相比较， α 粒子的电离密度及LET均远较 β^- 粒子为大， α 粒子的生物效应也相对的比 β^- 粒子大。

当带电粒子通过物质时，会受到原子核库仑场的作用而改变运动的方向，此现象称为散射。运动方向改变而总动能保持不变者为弹性散射；伴有能量损失的称为非弹性散射。

高速带电粒子通过原子核电场时，运动突然受阻，运动方向发生很大偏离，其部分动能或全部动能转化为连续能谱的电磁辐射，这种辐射称为韧致辐射(bremsstrahlung)。它产生的机率是随带电粒子能量增大而增大的，与受阻物质的原子序数的平方成正比。受阻物质的原子序数越大，产生的韧致辐射越强。因而为防止 β^- 粒子产生的韧致辐射的损伤作用，其屏蔽材料应用低原子序数的材料，如有机玻璃或铝箔等。

带电粒子通过物质时，由于电离、散射和韧致辐射等作用，使能量逐步消耗直至完全消失，这个过程称为吸收。此过程所经过的路程距离，称为最大射程。使其强度减少一半的物质厚度，称为半吸收厚度。

二、 γ 射线与物质的相互作用

γ 射线与物质的相互作用有以下三种方式

(一) 光电效应 (photoelectric effect) γ 射线与物质原子轨道上的电子相互作用, 把本身的全部能量交给了电子, 使电子脱离原子而运动, 该电子即为光电子, 此种作用称为光电效应。 γ 光子本身被物质吸收而消失的过程称为光电吸收。光电效应的几率与光子本身的能量及物质的原子序数有密切关系, 光子能量低, 物质原子序数越大, 发生光电效应的几率也越多。因此防护低能 γ 射线时, 用高原子序数的物质效果较好。

(二) 康普顿-吴有训效应 (Compton effect) γ 光子与物质原子的轨道电子作用时, 只把一部分能量交给电子, 并使其脱离原子而发射出去, 光子本身能量减低并改变了运动方向, 这种现象称为康普顿-吴有训效应。

γ 光子通过康普顿效应, 能量逐渐消耗最后被物质吸收。这种效应与 γ 射线的能量成反比, 与物质的密度成正比。 γ 光子能量为0.5~1MeV时康普顿效应就变得明显了。

(三) 电子对生成效应 (positron electron pair) 高能 γ 光子通过物质时, 在原子核电场的作用下, γ 光子转化为一对带正负电荷的电子, 而 γ 光子本身随之消失, 此即称为电子对生成效应。

当 γ 光子能量>1.02MeV时才会发生这种效应。产生的电子对各带有0.511MeV的能量。 γ 光子多余的能量分配给两个正负电子, 并作为它们的动能以不同角度发射出去。

正电子 e^+ 通过物质损失其动能后, 和一个 e^- 电子结合而转化为一对能量相等的光子(0.511MeV), 此谓之光化辐射。

三、中子与物质的相互作用

中子不带电, 是不稳定的。中子把部分能量传给被碰撞的原子核, 使它受到反冲而脱离壳层电子运动而成为反冲核, 此即称弹性散射(elastic scattering)。经过多次弹性散射后, 中子逐渐损失了其全部能量。反冲核在物质中快速运动, 使物质产生电离和激发。其电离密度和LET与 α 粒子相似。

中子与氢原子核碰撞形成反冲质子, 由于质子和中子质量近似相等, 中子丢失的能量最多, 而反冲质子所得到的能量则最大。当中子与重原子核相碰撞时, 只丢失能量的一部分。因此中子容易为轻物质所吸收(含氢原子多的物质如水、石蜡等), 但却能通过很厚的重物质(如铅、铁等)。这在防护上是很意义的。

快速中子与物质的原子核作用, 逐渐减慢速度形成慢中子, 慢中子被物质原子核俘获的几率较大, 其俘获中子后形成稳定的或不稳定的新核素, 这是一种核反应。不稳定的新核继续衰变放射出 β 、 γ 等射线, 称为感生放射性。例



生成的 ${}^1_6\text{C}$ 就是一种中子核反应后的新的放射性核素。

第四节 辐 射 量

辐射量与射线的医学应用及辐射防护等有密切的关系。国际辐射单位与测量委员会(ICRU)对辐射量经过多次修改,于1974年提出建议,在若干年后取消辐射量的专用单位,代之以国际制单位(SI)。目前新旧单位暂时并用。

一、照射量 (exposure)

照射量是度量辐射场的一种物理量,以 X 表示。其定义是:在质量为 dm 的小体积空气中, X 或 γ 射线与原子相互作用释出的所有次级电子,在空气中完全被阻止,所产生的正负离子对同种符号离子的总电荷 dQ 与该质量 dm 之比。其表达式为

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

照射量的SI单位为库伦·千克 $^{-1}$ ($C \cdot kg^{-1}$)

旧有专用单位为伦琴(R),两者的关系:

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

$$1C \cdot kg^{-1} = 3.877 \times 10^3 R$$

单位时间内的照射量,称为照射量率 (exposure rate),以符号 X_r 表示:

$$X_r = \frac{dX}{dt}$$

照射量率的SI单位是库伦/千克·秒 ($C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$),专用单位是 R/min 、 mR/h (毫伦琴/小时)等。

二、吸收剂量 (absorbed dose)

1953年国际辐射单位与测量委员会(ICRU)制定了吸收剂量(D)。其定义是任何被照射物质每单位质量(dm)所吸收的任何电离辐射的平均能量,即

$$D = \frac{dE}{dm}$$

吸收剂量的SI单位是焦耳·千克 $^{-1}$ ($J \cdot kg^{-1}$),即1千克受照射物质吸收1焦耳的辐射能量。其单位名为戈瑞(Gray, Gy),即:

$$1Gy = 1J \cdot kg^{-1}$$

吸收剂量的旧有专用单位为拉德(rad),其派生单位有毫拉德(mrad),微拉德(μrad)等。

$$1rad = 100 \text{ 尔格} \cdot \text{克}^{-1}$$

$$1rad = 0.01Gy \text{ 或 } 1Gy = 100rad$$

单位时间内的吸收剂量,称为吸收剂量率 (absorbed dose rate),以符号 P 表示。

$$P = \frac{dD}{dt}$$

SI单位是戈瑞/秒(Gy/s),或拉德/分(rad/min)、毫拉德/小时($mrad/h$)等。

三、剂量当量 (dose equivalent)

由于辐射种类和照射条件的不同,受同等量的吸收剂量照射所产生的生物效应皆不相同,为了统一各种辐射所致生物效应的物理量,便引用了剂量当量这一概念。剂量当量是用修正因数对吸收剂量进行加权,从而使其更好地统一衡量各种辐射对生物机体危害作用程度。用H表示剂量当量

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

式中D为吸收剂量, Q为品质因数, N为其他任何修正因数的乘积, 目前国际防护委员会(ICRP) 建议 $N=1$ 。

Q是与辐射品质有关的修正因数, 可通过它来反映不同类型辐射诱发损伤的几率或严重程度。品质因数Q值(表1-2)。

剂量当量的SI单位是“西沃特”(Sievert, Sv)。

$$1\text{Sv} = 1\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

旧有专用单位是雷姆(rem), Sv与rem的单位换算关系为

$$1\text{rem} = 0.01\text{Sv}$$

$$1\text{Sv} = 100\text{rem}$$

单位时间内的剂量当量称为剂量当量率, 以 H_r 表示

$$H_r = \frac{dH}{dt}$$

H_r 的单位为Sv/s或rem/s。

表1-3列出常用辐射量国际制单位与专用单位对照关系。

表1-2 不同种类辐射的品质因数Q

辐射种类	品质因数
X射线、γ射线、电子或正电子	1
中子(能量<10KeV)	3
中子(能量>10KeV)	10
质子	10
α粒子	20
裂变碎片、反冲核	20

表1-3 几种常用辐射量及其单位对照表

辐射量名称(符号)	SI单位		专用单位名称(符号)	单位换算关系
	通名(符号)	专名(符号)		
放射性活度(A)	1/秒(S^{-1})	贝可(Bq)	居里(Ci)	$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ $1\text{Bq} = 2.7 \times 10^{-11}\text{Ci}$
照射量(X)	库仑/千克($\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	伦琴(R)	$1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ $1\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} = 3.88 \times 10^3\text{R}$
吸收剂量(D)	焦耳/千克($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	戈瑞(Gy)	拉德(rad)	$1\text{rad} = 0.01\text{Gy}$ $1\text{Gy} = 100\text{rad}$
剂量当量(H)	焦耳/千克($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	西沃特(Sv)	雷姆(rem)	$1\text{rem} = 0.01\text{Sv}$ $1\text{Sv} = 100\text{rem}$