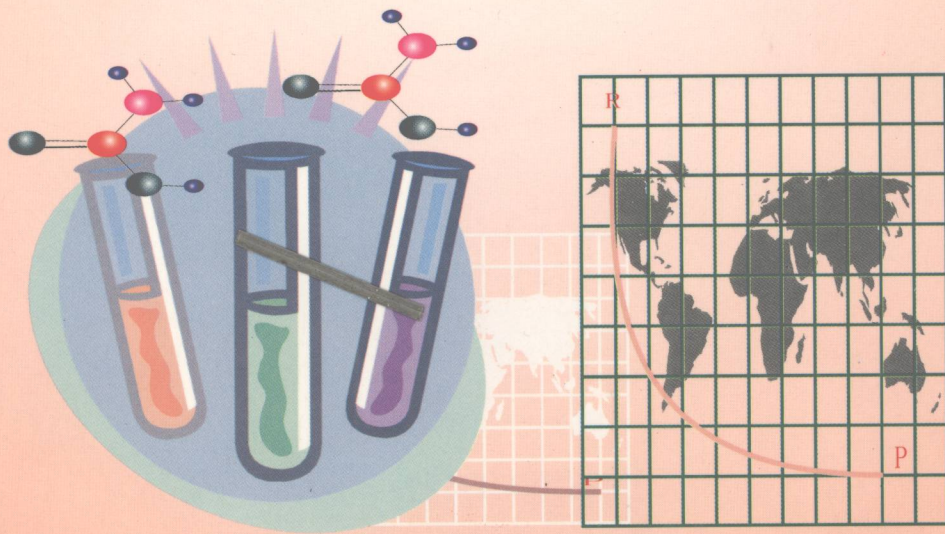


高等医学院校教材
(供医学检验专业用)

检验核医学

主 编 程绍钧 余裕民



重庆大学出版社

7.4
301
-2

高等医学院校教材
(供医学检验专业用)

检验核医学

主 编 程绍钧 余裕民

副主编 李 龙 刘致进 唐培兰

(排名不分先后)

主 审 王鼎年 滕国柱

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书为高等医学院校医学检验专业的专业课程《检验核医学》的基本教材。全书分上、下两篇,共17章。在上篇内容中,除简要介绍了与检验核医学密切相关的核物理学、放射卫生防护学的基本知识,以及核射线探测基本原理、样品放射性的测量方法学等外,着重介绍了以放射免疫分析为代表的体外放射分析原理、方法与质量控制等主要内容。在核技术方法选材上突出样品的体外放射分析,包括:放射免疫分析、免疫放射分析、受体的放射配体分析、酶活性的放射分析等。此外,还扼要介绍了以核素示踪原理为基础的已经用于或有可能用于医学检验的核技术及其相关知识,如:核素标记化合物、核素稀释法、放射自显影术、物质转化示踪技术、核酸探针标记技术、活化分析与原子激发X线发射分析以及稳定核素示踪技术在临床诊断中的应用等。下篇内容着重于介绍以放射免疫分析和免疫放射分析为主要方法的体外放射分析指标的基本性质与生物化学基础知识及其临床意义和医学评价,以适应培养检验医师的要求。

图书在版编目(CIP)数据

检验核医学/程绍钧,余裕民主编. -重庆:重庆大学出版社,1999.2
ISBN 7-5624-1905-1

I. 检… I. ①程…②余… II. ①放射性物质-防护-高等医药院校-教材②放射性物质-放射性测定-高等医药院校-教材 N. R144

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第01680号

高等医学院校教材

检验核医学

主编 程绍钧 余裕民

责任编辑 彭 宁

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆电力印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:368千

1999年1月第1版 2001年4月第2次印刷

印数:7001-10000

ISBN 7-5624-1905-1/R·138 定价:15.00元

编委(按姓氏笔画为序)

于公吉	王 媚	马顺元	刘致进
李 龙	李少林	余裕民	周迪湘
唐培兰	程光亮	程绍钧	

撰稿人员(按院校名称与编写人姓氏笔划为序)

广东医学院	王 媚	孟庆勇	徐美亦	
大连医科大学	于 景	于公吉	赵 明	曹慧玲
张家口医学院	刘致进			
贵阳医学院	唐培兰			
重庆医科大学	李少林			
第三军医大学	程绍钧			
蚌埠医学院	陈兆军	余裕民	程光亮	
福建医科大学	马顺元	闫 平		
镇江医学院	李 龙	许苏眉	高健青	

前 言

检验核医学是高等医学院校医学检验专业的必修课之一。自1988年由蒋慧权、王鼎年主编并定名为检验核医学的教材出版使用后,又于1993年由闵长庚、蒋慧权、程绍钧等主编出版了该教材。经多年使用的实践说明,该教材对于培养高级医学检验人才是十分必要的。为适应当前的教学需要,由程绍钧、余裕民组织国内九所高等医学院校中长期从事检验核医学教学与临床应用的同行专家再次编写出版本教材。编写者依据医学检验专业本科学生既要掌握检验核医学基本理论、基本方法和基本技能,又必须了解检验核医学的临床应用和评价,成为未来的检验医师的培养目标,并参照各院校现行的教学计划,结合检验核医学在医学检验领域中应用的现状和发展趋势,突出了以样品的体外检测为特征的核技术原理、方法学及质量控制知识,强化了检验核医学的临床应用与评价内容。

参加本书协作编写的有广东医学院、大连医科大学、张家口医学院、贵阳医学院、重庆医科大学、第三军医大学、蚌埠医学院、福建医科大学、镇江医学院等九所医学院校的具有丰富专业教学经验的核医学工作者。本书编委会特聘从事实验核医学教学数十年的王鼎年教授和长期从事临床核医学工作的滕国柱教授分别出任本书上、下篇的主审。

本书既是医学检验专业检验核医学专业课程的基本教材,又可供核医学和临床检验专业人员及临床医师参考。

本书在编写过程中,得到九所院校领导的大力支持,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,书中不足和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1998年9月

目 录

绪论	1
上篇 检验核医学基础知识与方法学	
第一章 核物理与辐射防护基本知识	2
第一节 核素与核衰变	2
第二节 核辐射卫生防护基本知识	9
第二章 放射性测量与稳定性核素分析	20
第一节 射线探测仪器	20
第二节 放射性测量概述	28
第三节 放射性样品的计数测量	30
第四节 放射性测量统计误差及其控制	36
第三章 与检验医学相关的核技术	39
第一节 核素示踪原理与设计	39
第二节 放射性核素标记化合物	41
第三节 相关核技术概述	48
第四章 体外放射分析	62
第一节 放射免疫分析	62
第二节 其它竞争性结合体外放射分析	90
第三节 免疫放射分析	93
第四节 受体的放射配体结合分析	99
第五节 酶的放射分析	107
下篇 检验核医学的临床应用	
第五章 下丘脑-垂体-甲状腺轴激素	113
第一节 甲状腺素与三碘甲状腺原氨酸	113
第二节 游离甲状腺素、游离三碘甲状腺原氨酸	115
第三节 3,3',5'-三碘甲状腺原氨酸	115
第四节 甲状腺素结合球蛋白	116
第五节 促甲状腺激素	117
第六节 促甲状腺激素释放激素	117
第七节 TRH 兴奋试验	118
第八节 甲状腺球蛋白	119
第九节 甲状腺球蛋白抗体与甲状腺微粒体抗体	119
第六章 下丘脑-垂体-肾上腺轴激素	120
第一节 皮质醇	121
第二节 醛固酮	122
第三节 促肾上腺皮质激素	123
第四节 儿茶酚胺类激素	124
第七章 下丘脑-垂体-性腺轴激素	127
第一节 雄激素	128

第二节	雌激素	129
第三节	孕激素(孕酮)	131
第四节	胎盘激素	132
第五节	腺垂体促性腺激素	134
第六节	神经垂体激素	138
第八章	胰腺激素与糖代谢	141
第一节	胰岛素	141
第二节	C-肽	142
第三节	胰岛素原	142
第四节	胰岛素抗体	143
第五节	口服葡萄糖耐量试验	144
第六节	胰多肽	144
第七节	胰高血糖素	145
第八节	糖化血红蛋白 A ₁	146
第九节	诊断胰岛素的激发和抑制试验	146
第九章	甲状旁腺激素与钙代谢	148
第一节	甲状旁腺激素	148
第二节	降钙素	149
第三节	环核苷酸	149
第四节	血钙代谢	150
第十章	胃肠激素	151
第一节	胃泌素	151
第二节	胰泌素	152
第三节	抑胃肽	153
第四节	胆囊收缩素	154
第五节	胃动素	154
第六节	蛙皮素	155
第七节	血管活性肠肽	156
第十一章	心血管系统激素及活性物质	157
第一节	心血管激素	157
第二节	活性物质	163
第十二章	肾脏功能检测	165
第一节	肾脏排泄功能检测	165
第二节	肾脏内分泌功能检测	168
第十三章	血液系统疾病检测	171
第一节	叶酸	171
第二节	维生素 B ₁₂	172
第三节	血清铁蛋白	173
第四节	血清 β_2 -微球蛋白	174
第五节	血小板相关 IgG	174
第六节	抗凝血酶-Ⅲ	175
第十四章	病毒性肝炎与肝功能检测	176
第一节	甲型肝炎血清标志物	176
第二节	乙型肝炎血清标志物	176

第三节	丙型肝炎血清标志物	185
第四节	丁型肝炎血清标志物	186
第五节	戊型肝炎血清标志物	187
第六节	甘胆酸	187
第七节	透明质酸	188
第八节	肝纤维化的其他血清标志物	188
第十五章	肿瘤标志物	190
第一节	胚胎类肿瘤标志物	191
第二节	蛋白类肿瘤标志物	195
第三节	其他肿瘤标志物	200
第十六章	细胞因子和免疫球蛋白	206
第一节	干扰素	206
第二节	白细胞介素	207
第三节	粒细胞巨噬细胞-集落刺激因子	207
第四节	肿瘤坏死因子	208
第五节	免疫球蛋白 E	208
第六节	免疫球蛋白 A, 免疫球蛋白 G, 免疫球蛋白 M	208
第七节	免疫球蛋白 D	209
第十七章	药物浓度检测	210
第一节	地高辛	210
第二节	庆大霉素	211
第三节	丁胺卡那霉素	211
第四节	苯妥英钠	212
第五节	苯巴比妥	212
第六节	氯丙嗪	213
附 录		214
附录一	中华人民共和国法定计量单位	214
附录二	常用核素数据表	215
附录三	通用放射性核素衰变因子($e^{-\lambda t}$)表	216
附录四	体外放射分析的主要国产试剂	216
附录五	本书标注的检验核医学专业(英汉)词汇	218
主要参考文献		225

绪 论

检验核医学(Laboratory nuclear medicine)是将实验核医学(Experimental nuclear medicine)的相关核技术应用于医学检验领域,与医学检验学相融合的一门边缘学科。因此,它既是实验核医学的一个分枝,也是现代医学检验学的重要组成。它的主要内容和任务是应用核素示踪技术和体外放射分析技术进行机体的功能研究和对体内的微量物质实施超微量分析,以揭示机体在生理或病理状态下的代谢规律,为疾病的诊断,治疗方案的拟定,预后判断,以及病因研究等提供科学依据。

自20世纪30年代第一台回旋加速器建立到40年代世界上第一个核反应堆建成,人工放射性核素的生产成为现实,为放射性核素的医学应用打下了物质基础,其中 ^{32}P 、 ^{131}I 最先投入临床医学的诊断应用。尤其是S. A. Berson和R. A. Yalow于60年代初成功地创建了放射免疫分析法,不仅引起生物活性物质分析技术的一场革命,也为检验核医学的崛起奠定了基础。在放射免疫分析技术的带动下,多项体外放射分析技术先后创立,特别是进入70年代后,由于射线探测技术和仪器的成熟和进步,电子计算机应用的普及,使体外放射分析的自动化,数据处理能力,质量控制水平等均得以显著提高。科学技术的进步促进了检验核医学的内容不断丰富,为学科的形成和日趋成熟创立了条件。

检验核医学的形成和发展,不仅开拓了医学检验的应用领域,还与医学和其它科学的最新成就一起使医学检验技术发生了划时代的变化,成为医学检验技术现代化的重要标志之一。

建立在实验核医学基础上的检验核医学承袭了核医学的灵敏、特异、简便等主要特点,已广泛应用于内分泌学、生物化学、药理学、肿瘤学、免疫学、生殖生理学、分子生物学及临床医学的各个学科。尤其是内分泌学、生殖生理学、肿瘤学等与检验核医学的关系极为密切,由于绝大多数的内分泌激素、生殖激素、肿瘤标志物等的体内正常含量很低,它们的体内含量微弱变化或存在与否都会导致机体的功能或病理改变。尽早发现它们的变化对于疾病的早期诊断,治疗方案的拟定与疗效观察,疾病的预后评价等具有重要意义。检验核医学以其超微量分析的灵敏度与高强度的特异性,以及简便快速的方法领先于其它定量分析方法。此外,检验核医学的放射性核素示踪技术对于物质的体内分布、代谢、转化规律揭示,功能酶活性测定,核酸序列分析,受体的生化、药理特性研究等生物化学、分子生物学问题的阐明都是不可缺少的技术。在极毒药物的药代动力学分析与作用靶点的定位研究中更是唯核素示踪技术不可。检验核医学以其方法的先进性活跃于医学之林,以其方法的灵敏性和特异性独领风骚于医学检验领域的各种方法之中。

自然科学的发展史反复证明,科学发展中各学科之间的交叉渗透,促进了各学科的发展进步。检验核医学也不例外,自奠基之日起,就不断吸收各学科的精华,在丰富自身的同时,也为医学的进步作出贡献。学习的目的在于应用,作为医学检验医师,岗位职责要求其既要掌握专业基本理论和熟练的基本技能,还应了解专业学科的临床应用知识。在校学习时期要为今后在工作岗位上更好地为伤病员服务打好学业基础。为此,本教材依据培养医学检验医师的目标,在突出与医学检验密切相关的核技术前提下,强化了其临床应用内容,以适应培养高层次医学检验人才的教学要求。

上篇 检验核医学基础知识与方法学

第一章 核物理与辐射防护基本知识

核医学的各个分支学科都是研究核素及其技术在医学中应用的理论与方法的科学。因此,学习和从事检验核医学的人员,为了学好并科学、合理、规范地应用这门学科的知识,必须对核物理学及核辐射防护的基本知识有较清晰的认识。

第一节 核素与核衰变

一、核素

1. 原子核组成

原子核由一种力量强大而作用范围很小的核力(Nuclear force)将若干个中子(Neutron, 简称为 n)和质子(Proton, 简称为 p)等聚合在一起而形成。中子和质子统称为核子(Nucleon)。n 和 p 的质量相近,稍大于 1 个原子质量单位(Atomic mass unit, 简写 amu, $1\text{amu} = 1/12$ 的 ^{12}C 质量。n 的质量 $= 1.008665\text{amu}$, p 的质量 $= 1.007276\text{amu}$)。将 1amu 定义为 1 个质量数(Mass number),质量 $< 1\text{amu}$ 的质量数为零,故 n、p 的质量数均为 1。可见,原子核的质量数 A 等于核内 n 的个数与 p 的个数之和。又因 n 为电中性,而 p 带一个单位正电荷,故核的正电荷数等于核内的 p 个数,用 Z 表示。Z 又称为原子核序数(Atomic number)。

2. 原子核的分类

人们用 ^m_ZX 和 ^mX 分别表示核的种类和能态:X 代表核的名称(与原子、元素名称相同),m 表示该核处于高能状态,即激发态(Excited state),又称亚稳态。无 m 者为基态(Ground state)。例如:符号 ^2_1H 表示该核名称为 H(氢),是由 1 个质子($Z=1$)和 2 个中子($A=1+2=3$)组成,且处于基态;符号 $^{99m}_{43}\text{Tc}$,表示该核名称为 Tc(锝),由 56 个 n 和 43 个 p 组成,处于激发态。

原子核是物质,具有质量和能量两个基本的属性。从这两个基本属性出发,可将大千世界中无法统计的,名目繁多的原子核归纳为以下几类,并冠以不同的称谓。

(1) 元素(Element) 指具有相同质子数的一类原子核。视其 p 的数目赋予确定的名称、符号,称为某元素。

(2) 核素(Nuclide) 凡是原子核内的质子数相等(Z 相等),中子数相同(即质子数与中子数之和相等, A 相同),所处的能态也一致的一类核,称为某元素的某核素。例: ^1_1H 、 ^2_1H 、 ^3_1H 分别是氢元素的三种核素,称谓分别是氕、氘、氚; $^{12}_6\text{C}$ 、 $^{13}_6\text{C}$ 、 $^{14}_6\text{C}$ 分别是碳元素的四种核素;

可见,每种元素由多种核素构成。迄今为止已发现的元素仅百余种,组成它们的核素却有二千多种。

(3) 同质异能素(Isomer) 指原子核内质子数相等, 中子数相同, 但所处能态不一致的核素间的相互关系称谓。例: $^{99}_{43}\text{Tc}$ 和 $^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 属同质($Z=43$, $A=99$), 但前者处于基态, 后者处于激发态。这两种核素间互称同质异能素。

(4) 同位素(Isotope) 指同种元素各核素间的关系称谓。同种元素的 Z 相等, 即具有同一个原子序号, 在元素周期表中同处一个位置。

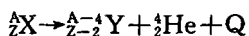
(5) 放射性核素与稳定核素 在已经发现的二千多种核素中, 绝大多数(约 1700 多种)具有下述特性: 能自发地发生核的结构或/和能态变化, 释放粒子或/和光子, 生成另一种核素。这种性质叫做核的放射性(Radioactivity); 这种变化过程称为放射性衰变(Radioactive decay); 具有放射性的核素称为放射性核素(Radioactive nuclide)。不具有放射性的核素被称为稳定核素(Stable nuclide)。

二、核衰变

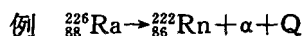
1. 核衰变类型

按核衰变释放的射线性质来分类, 核衰变有以下常见类型:

(1) α 衰变(Alpha decay) 指核变化时释放一个携带 2 个单位正电荷, 质量数为 4 的粒子的衰变。该粒子被命名为 α 粒子, 其本质是氦原子核(^4_2He)。 α 衰变的通式:



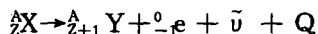
母核 子核 α 衰变能



α 衰变的衰变能(Decay energy) Q 由 α 粒子携带。对于特定 α 衰变的核素, 其 α 粒子能量是一个定值。

(2) β 衰变(Beta decay) 从核变化前后的结构分析, 此类衰变属于核内 n 、 p 之间的转移, 以达到维持合理 n/p 比的目的。包括三种方式, 即 β^- 、 β^+ 和电子俘获。分述如下:

1) β^- 衰变(β^- decay, Negatron decay, 省略写为 β 衰变) 指核变化时释放一个携带 1 个单位负电荷, 质量数为 0 的轻粒子, 其本质是电子($^0_{-1}\text{e}$), 又称 β^- 粒子(β^- Particle)。 β^- 衰变多发生于核内中子过剩的核, 因为 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$, 使中子数减少, 质子数增加, 达到核结构合理。 β^- 衰变的通式:



母核 子核 β^- 反中微子 衰变能

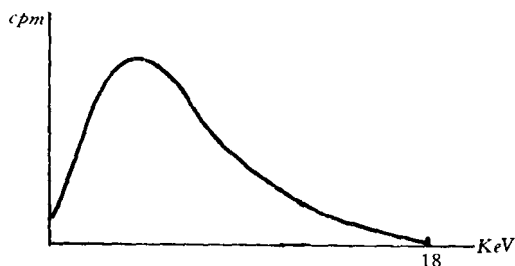
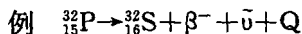


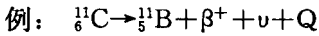
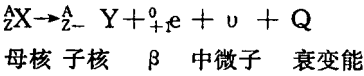
图 1-1 ^3H 能谱曲线示意图

β^- 衰变释放 β^- 粒子的同时, 还释放一个电中性的, 质量数比电子更小的基本粒子, 称为反中微子(Anti-neutrino, 用符号 $\bar{\nu}$ 表示)。因此, 衰变能 Q 成为 e^- 和 $\bar{\nu}$ 共享的能量。由于分配的随机性, 导致同种核素释放的各个 β^- 粒子的能量不相等, 有的可以多至与 Q 相等, 有的却少至近于零, 多数 β^- 粒子能量在 $0 \sim Q$ 之间, 形成一个连续能谱。例如: 将 ^3H 的各个 β^- 粒子能量从小到大分布图示出来(图 1-1)。

可见, ^3H 的 β^- 粒子能量大多数约等于 $Q/3$ 值(分布曲线峰位能量)。不同种 β^- 衰变的核素 Q 值不同, 能量分布曲线形态有异。各种核素表、手册、附录中列出的 β^- 粒子能量指其几乎与 Q

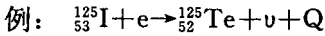
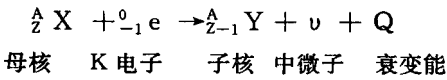
值相等的最大能量。例如： ^3H 的 $E_\beta=0.0189\text{MeV}$ ， ^{14}C 的 $E_\beta=0.155\text{MeV}$ 等。

2) β^+ 衰变(β^+ decay, Positron decay) 指核衰变时释放一个携带 1 个单位正电荷, 质量数为 0 的粒子, 其本质是正电子(${}^0_{+1}\text{e}$), 称为 β^+ 粒子(Positron)。这种衰变多发生于核内中子数相对不足的核, 因为 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$, 使核内质子数减少而中子数增加, 以维持合理的核结构。 β^+ 衰变的通式:



由于 Q 被 β^+ 和 ν 随机分配, β^+ 粒子的能量与 β^- 一样是连续的能谱。

3) 电子俘获(Electron capture decay, 简写 EC) 某些核内中子数相对不足的核可以俘获 1 个离它最近的绕行轨道电子(K 电子)进入核内, 形成 $p + e \rightarrow n + \nu$, 使核内中子增加, 质子减少, 达到结构合理。EC 衰变的通式:



EC 的 Q 由 ν 携带, 其能量是单色的, $E_\nu \approx Q$ 。由于 K 电子被俘获, K 层出现电子空缺, 此时比 K 层能级高的绕行电子(如 L 层电子)跃迁至 K 层填补空位, 这样就出现电子的能级差 $\Delta E (\Delta E = E_L - E_K)$, 对于特定的核素, ΔE 是一个确定值。 ΔE 有两种可能的归宿: ①以电磁波形式释放。该电磁波的波长、频率属 X 线范畴, 称为特征 X 线。② ΔE 被其它轨道电子接受而使该电子被高度激发乃至脱离核的约束而成为自由电子, 称之为俄歇电子(Auger electron)。EC 衰变图示于图 1-2。

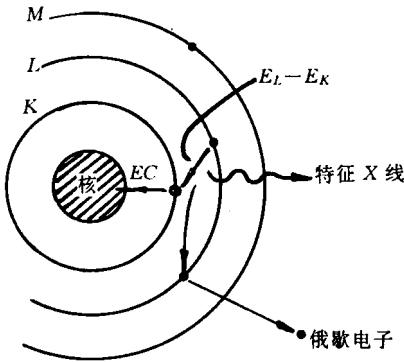
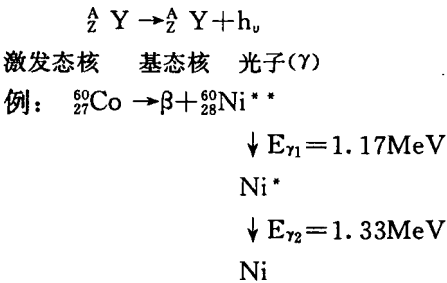


图 1-2 电子俘获(EC)图

(3) γ 跃迁(Gamma transition) 经过 α 或 β 衰变生成的子核往往处于高度激发态, 并很快退激(一步或多步), 将退激能以光子(Photon)形式释放。这种衰变称为 γ 跃迁。通式为:



也有的激发态核并不马上退激, 可以维持一段时间再按自身的衰变速度进行退激, ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ 就是一例, 它的半衰期约为 6.02 小时。

上述三类衰变类型共五种衰变形式。有的核素只有单一衰变类型, 如 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{35}S 等只有 β 衰变; 有些则是多种形式同期或先后进行, 如 ${}^{22}\text{Na}$ 和 ${}^{64}\text{Cu}$ 的衰变就有 β^- 、 β^+ 、EC、 γ 等多种形式。

2. 核衰变规律

作为放射性原子核的个体,其衰变是独立的随机事件,相互间没有制约,衰变先后没有规定的次序,也不是同时发生衰变。表面看似杂乱无章,毫无规律可言。但是,作为有很多个核组成的放射性物质而言,核衰变却表现为具有一定的规律性:对一定量的放射性物质测其计数率 n ,发现 n 的数值随时间的延长而逐渐减少。精确的实验证明,在时间间隔为 t 到 $t + \Delta t$ 内,衰变的原子核数目 ΔN 是和 Δt 及在该时刻尚未衰变的总核数 N 成正比,即

$$\Delta N \propto N \Delta t, \text{写成等式: } \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

式中: λ 是比例常数,称为衰变常数(Decay constant),符号右侧的负号表示 N 值随 t 增加而减少,即 ΔN 是负的(衰变掉的)。若时间间隔极微小,用 dt 表示,上式可写成微分式:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

经积分得: $\ln N = -\lambda t + K$, K 为积分常数,当 $t=0$ 时, $N=N_0$,代入上式: $K = \ln N_0$,

$$\text{故 } \ln N = -\lambda t + \ln N_0$$

$$\text{或 } N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-1)$$

式(1-1)就是放射性衰变公式。它指出, N 值按时间的指数函数而衰减。

从上述的公式演化过程中,可写出

$$\lambda = \frac{dN/dt}{N}$$

其物理意义是: λ 指单位时间内核的衰变几率。每一种放射性核素都有其固有的衰变常数,例如: ^{60}Co 的 $\lambda = 4.439 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$, ^{125}I 的 $\lambda = 1.337 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$, ^3H 的 $\lambda = 1.782 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$ 。

除 λ 可描述放射性核的衰变速率外,通常使用半衰期(Half life)来表示核的衰变速率更加方便,用符号 $T_{1/2}$ 来表示。其定义为:放射性原子核在某时刻的总数因衰变而减少一半所经历的时间。这种减少是核本身的衰变造成,故又称 $T_{1/2}$ 为核的物理半衰期(Physical half life)。

3. 放射性活度及其校正

放射性物质除有其化学量,液态物质有其体积外,还有放射量的问题。放射量包括两方面的内涵:一是放射性物质本身的衰变量;二是释放的射线对物质照射中,物质接受射线能量的度量,依据不同条件,有照射剂量、吸收剂量和剂量当量等,又称核辐射剂量(待后述)。这里仅就放射性物质本身的衰变形成的放射量作如下介绍。

(1)放射性活度(Radioactivity) 指单位时间内放射性原子核衰变的核数(期望值)。常用符号 I 表示,式(1-2)可写为:

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \quad (1-2)$$

当放射性活度与放射性物质的化学量联系时,即单位化学质量的放射性物质所具有的放射性活度,称为放射性比活度(Specific activity)。通常用 S 表示。

当放射性活度与液态放射性物质的体积相联系时,即单位体积的放射性物质所拥有的放射性活度,称为放射性浓度(Radioactive concentration)。常用 C 表示。

放射性活度、放射性比活度、放射性浓度等三个反映放射性物质自身放射量的概念是相互紧密联系的,在放射性标记物(示踪剂)制备、使用中,是很重要的参数。

(2)放射性活度的单位 1975年第15届国际计量大会批准使用放射性活度的国际制(SI)单位:贝可勒尔(Becquerel,简写 Bq),简称贝可。其定义:1Bq 等于每秒1次核衰变,即 $1\text{Bq} = 1\text{S}^{-1}$ 。并明确规定在一切公开场合(会议报告,论文发表,资料文献出版等)必须使用 SI 制单位。从贝可单位的定义可见,这是一个非常微小的放射量,为了实际需要,在此基础上作千进位

扩大,即

$$1\text{KBq}=10^3\text{Bq},$$

$$1\text{MBq}=10^3\text{KBq}=10^6\text{Bq}$$

$$1\text{GBq}=10^3\text{MBq}=10^6\text{KBq}=10^9\text{Bq}$$

$$1\text{TBq}=10^3\text{GBq}=10^6\text{MBq}=10^9\text{KBq}=10^{12}\text{Bq}$$

平时工作中,仍有习惯于使用1975年前的放射性活度专用单位:居里(Curie,简写 Ci)。定义:1Ci 等于 3.7×10^{10} 次核衰变/秒,即 $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{S}^{-1}$ 。这是一个数值很大的放射性活度单位,在它的基础上作千倍缩小,即

$$1\text{Ci}=1000\text{mCi}=1000000\mu\text{Ci}$$

两种单位的相互关系:

$$1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}, 1\text{Bq}=2.703\times 10^{-11}\text{Ci}$$

$$\text{或 } 1\text{Ci}=37\text{GBq}, 1\text{mCi}=37\text{MBq}, 1\mu\text{Ci}=37\text{KBq}$$

(3)放射性活度校正 核衰变的独立性决定了放射性物质的放射性活度每时每刻都因衰变而减少。因此,自产品出厂前的检验之日起到使用之日,其放射性活度早已不是产品出厂说明书上注明的数值,尤其是 $T_{1/2}$ 较短的放射性物质,减少的程度更加显著,必须在使用之日进行放射性活度校正。

校正方法有多种,如衰变因子法,修正系数法,计算法等。这里仅就最常用的衰变因子法(Decay factor)作说明:

所谓衰变因子,即公式(1-1)与(1-2)中的 $e^{-\lambda t}$ 。将式(1-2)改写为:

$$\frac{I}{I_0}=e^{-\lambda t}$$

又依半衰期的定义可将上式演变如下:

当 $t=T_{1/2}$,即 $t/T_{1/2}=1$ 时, $I=I_0/2$,上式写为

$$\frac{I}{I_0}=\left(\frac{1}{2}\right)^1$$

当 $t=2T_{1/2}$, $t/T_{1/2}=2$ 时, $I=\frac{I_0/2}{2}=\frac{I_0}{4}$, $\frac{I}{I_0}=\left(\frac{1}{2}\right)^2$

当 $t=3T_{1/2}$, $t/T_{1/2}=3$ 时, $I=\frac{I_0/4}{2}=\frac{I_0}{8}$, $\frac{I}{I_0}=\left(\frac{1}{2}\right)^3$

当 $t=nT_{1/2}$, $t/T_{1/2}=n$ 时,有通式:

$$\frac{I}{I_0}=e^{-\lambda t}=\left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (1-3)$$

若预制 $n-e^{-\lambda t}$ 表(见本书附录),就可依据实际时日计算出 n 后,查表获得 $e^{-\lambda t}$ 值,再代入式(1-3)计算 I (I_0 为产品说明书中注明的值)。

三、射线与物质的相互作用

射线与物质相互作用的规律既是核辐射生物效应的机制基础,又是核辐射防护的理论根据,也是核辐射探测器的设计依据。

在检验核医学中,涉及到的核衰变所释放的射线局限于 β 、 γ 、X射线三种,属于带电粒子(β)和电磁波(γ ,X线)两个类型。因此,下面仅就带电粒子和 γ 射线与物质相互作用产生的效应作简要介绍。

1. 带电粒子与物质相互作用

(1) 激发与电离 带电粒子入射物质后,带电粒子与被作用物质的原子核外壳层电子间的静电作用,使壳层电子获得能量而加速运动。若电子获得的能量只能使其由内层轨道跃迁至外层轨道,导致该电子所属的原子由基态变为高能态,称为带电粒子对物质的激发(Excitation)。若电子获得的能量足以使其脱离原子而形成自由电子,失去电子的原子成为正离子。自由电子与正离子合称离子对(Ionpair)。若带电粒子与壳层电子相碰撞,使壳层电子被击出原子,也形成离子对。带电粒子入射物质后,使物质的原子变为离子对的作用称为电离(Ionization)。这类电离叫做带电粒子的直接电离作用。被击出的高速运动电子再使其它原子电离,则称带电粒子的间接电离作用。

电离作用的强弱,以带电粒子在物质内行进的每厘米路程上产生的离子对数目,即被称为电离比值或电离密度(Ionization density)来衡量。电离密度越大,电离强度越强。

电离密度的大小与以下因素有关:①带电粒子在物质内的运动速度越大,在壳层电子周围通过的时间短,与壳层电子间静电作用的持续时间也少,电离密度相应就小。反之,电离密度越大。②带电粒子本身的电荷越多,静电作用强,电离密度大,反之则小。③被作用物质的密度越大,电子密度相应越大,壳层电子与带电粒子间的静电作用几率和强度均增大,故电离密度大,反之则小。

激发与电离作用使带电粒子的能量逐渐损耗,直至殆尽。带电粒子在物质内运行的单位路程上损失的能量,称为传能线密度,又称线性能量传递(Linear energy transfer,简写 LET),量度单位:MeV·cm⁻¹。

(2) 散射 带电粒子入射物质受到物质的原子核库仑电场作用而改变运动方向,称为散射(Scattering)。只改变运动方向而带电粒子的动能不变的散射,称为弹性散射(Elastic scattering)。 β 粒子的质量小,被散射的折角往往较大,且多次散射。当散射角大于90°时,称为反散射(Backscattering)。反散射对于 β 粒子的探测有明显干扰。

散射是物质原子核电场对带电粒子的库仑力作用,因此核电场越强(Z 越大),散射作用越显著。

(3) 韧致辐射 高能 β 粒子入射物质通过原子核附近时,受到核库仑电场作用而急剧减速,一部分动能以光子的形式辐射出去,这种辐射称为韧致辐射(Bremsstrahlung)。

韧致辐射使带电粒子的能量损失称为辐射损失。用物质的线性辐射阻止本领 $S_{\text{辐射}}$,即单位路程上由于韧致辐射损失的能量来反映韧致辐射产生的机率。 $S_{\text{辐射}}$ 与以下因素有关:

$$S_{\text{辐射}} \propto \frac{EZ^2}{m^2} \quad (1-4)$$

式中: E 为带电粒子能量, Z 为物质的原子序数, m 为带电粒子质量。

由式(1-4)可见:①带电粒子的能量增大,产生韧致辐射的机率增大。对于同种射线,能量越高者,这种辐射的机率越大。如: $^{32}\text{P} > ^{14}\text{C} > ^3\text{H}$ 。②与物质的 Z^2 成正比。因此,高能 β 粒子入射高 Z 物质比入射低 Z 物质产生的韧致辐射更显著。③与带电粒子的 m^2 成反比。因此, α 粒子不仅质量大,运行速度也慢,故产生韧致辐射的机率极小,而轻质的 β 粒子就显著得多。

所以,韧致辐射主要发生于高能 β 粒子入射高 Z 物质中。对诸如 ^{32}P 等产生高能 β 射线的核素,应采用低 Z 和高 Z 物质的依次双层防护,即先让高能 β 粒子通过低 Z 物质,使其能量的多数消耗于对低 Z 物质的激发和电离作用(在物质内部发生),少部分能量发生韧致辐射释放出的光子(γ 射线的能量相应也低)再通过后面的高 Z 物质被有效地阻挡。

(4) 契伦科夫辐射 高能电子入射折射率较大的透明介质时,若其在该介质中的运动速度

$V > C/n$ (光在该介质中的相速度, C 为光在真空中的速度, n 为介质的折射率), 则在 β 粒子经过的径迹处, 将沿一定方向发射出近紫外波长的微弱可见光, 这种辐射叫做契伦科夫辐射 (Cerenkov radiation)。契伦科夫辐射的产生条件是:

$$V > C/n, \text{ 即 } V/C > 1/n, \text{ 令 } V/C = B, \text{ 有 } B \cdot n > 1$$

可见, 当 B 越大和/或 n 也越大时, $B \cdot n > 1$ 的条件易于达到, 契伦科夫辐射也易于发生。在确定的介质中, 能量越高的 β 粒子, 其 V 越大, B 值也增加; 若 β 粒子的能量确定, 在 n 值大的介质中, 光的相速度 (C/n) 变小, $V > C/n$ 的条件也易于实现。

由于契伦科夫辐射, 可利用液体闪烁计数器在无闪烁液, 只用水等 n 值大的溶液作介质条件下, 对 ^{32}P 等高能 β 射线实现有相当高计数效率的测量。

(5) 吸收 带电粒子对物质的激发、电离以及物质对带电粒子散射等作用的结果, 表现为物质对粒子的吸收, 即带电粒子在物质中运行产生的上述效应使其能量逐渐消耗直至全部, 粒子的运行停止, 并和周围的物质发生一些特殊作用, 如 β^- 粒子成为自由电子, β 粒子与自由电子结合形成湮没辐射等。原来的带电粒子不复存在, 这种现象称为吸收 (Absorption)。

带电粒子被物质吸收前, 在物质中所经过的距离称为它在该物质中的射程 (Range)。一定能量的 α 粒子在一定密度的物质中有一定的射程 R (图1-3A); β^- 粒子在物质中的吸收与 α 粒子不完全相同, 因散射而使其径迹曲折, 所以其射程测定也较复杂, 通常以吸收物质的质量吸收厚度 (d_m) 作为 β^- 粒子的最大射程 R_m (单位: g/cm^2), 见图1-3B。

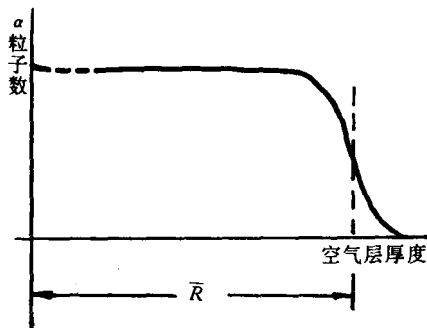


图1-3A α 粒子在空气中的吸收规律曲线

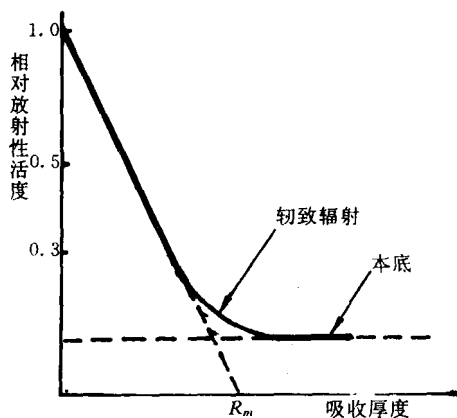


图1-3B β^- 线中物质中的吸收规律曲线

2. γ 射线与物质相互作用

(1) 光电效应 指 γ 射线入射物质后, 与物质的原子核外壳层电子 (多数为 K 电子, 也可以是 L 电子) 碰撞, 将能量全部交给电子, 使该电子被击出成为高能电子而 γ 射线不复存在的效应, 称为光电效应 (Photoelectric effect)。被击出的电子称为光电子 (Photoelectron)。

经研究认为, 光电效应的发生机率几乎与光子能量的三次方成反比。因此, 光电效应主要发生在能量较低的 γ 射线入射物质的过程中。同时, 光电效应的发生机率又与物质的密度以及物质的原子序数 Z 的 4.1 次方成正比。因此, 低能 γ 射线入射高密度或/和高 Z 物质时, 光电效应是主要的, 即用高密度, 高 Z 物质防护 γ 射线的效果十分显著。

(2) 康普顿-吴有训效应 当光子与物质原子核的核外壳层电子发生非弹性碰撞

(Nonelastic collision),即光子将其一部分能量交给该电子,使其脱离核的约束,成为高能电子逸出,而光子损失部分能量后继续在物质内改变方向运行,这种现象称为康普顿-吴有训效应(Compton - Wu effect),简称康普顿效应(Compton effect)。由于光子与壳层电子非弹性碰撞后继续运行的方向与原来入射方向的夹角是任意的,可以是 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 中的任意一个角度值。依据能量守恒与动量守恒定律,入射光子与散射光子的波长差($\Delta\lambda$)及康普顿电子的能量是从零到一个最大值的连续变量。

康普顿效应导致 γ 射线能量减弱的机率,与物质的密度及原子序数成正比,但随 γ 射线的能量增大而减少。

(3)电子对生成 当能量大于两个电子静止质量(m_0)的相应能量(即 $E_{\gamma} > 1.022\text{MeV}$)的 γ 射线入射物质后,受到原子核与核外壳层电子的库仑电场作用,可转化为一个正电子和一个负电子,这种现象称电子对生成。 γ 射线用 1.022MeV 的能量转化为电子对,多余的能量则作为该电子对的动能。

由于电子对生成消耗 γ 射线能量,即电子对生成导致物质对 γ 射线减弱,同样是与物质的密度及原子序数(Z^2)成正比,与 γ 射线能量也成正比。

(4) γ 射线的吸收 γ 射线能量因上述三种效应而减弱。研究证明,无论何种物质,对 γ 射线强度的吸收规律相同,即与物质的厚度成指数函数关系:

$$A = A_0 e^{-\mu d} \quad \text{或} \quad A = A_0 e^{-\mu_m d_m} \quad (1-5)$$

式中: A_0 是入射物质前 γ 射线强度;

A 是入射一定厚度(d 或 d_m)物质后的 γ 射线强度;

d, d_m 分别指物质的厚度和质量厚度;

μ, μ_m 分别指物质对 γ 射线的总吸收系数和总质量吸收系数。

$$\text{又} \because \mu = \tau + \sigma + x, \mu_m = \tau/\rho + \sigma/\rho + x/\rho \quad (1-6)$$

式中: τ, σ, x 分别代表光电效应、康普顿效应、电子对生成的吸收系数, ρ 为物质密度。

物质对 γ 射线吸收与 γ 射线能量关系的研究证实,随 γ 射线能量增大,总吸收系数变小,说明 γ 射线在物质中的贯穿本领变大;当 γ 射线能量小于 0.1MeV 时,在 μ 中 τ 是主要成分;能量为 $0.1\sim 2\text{MeV}$ 时, σ 上升为 μ 的主要成分;能量超过 10MeV 时, μ 主要取决于 x 。

从上述内容可知,无论何种效应占主导地位,对 γ 射线的有效防护,应使用高密度、高原子序数的物质。

第二节 核辐射卫生防护基本知识

核医学工作中接触的放射性核素具有以下特征:衰变类型以 γ, β 为主,无 α 衰变体。但射线对生物体都具有直接或/和间接的电离作用,故称核辐射为电离辐射;开放型;放射性活度低;使用经常性;易产生低水平的放射性废物等。因此,只要遵守开放型放射性实验室规则,科学地按操作规程工作,妥善地按要求处理放射性废物,就不会对机体产生危害。虽然安全度很大,但作为放射性工作的专职或非专职人员,都必须学习、掌握核辐射卫生防护的基本知识和方法原则。至于具体的卫生防护方法可在需要时查阅相关专业资料和书刊。

一、常用辐射量及其单位

在电离辐射生物效应与核辐射卫生防护学中,衡量电离辐射的物理量叫做辐射剂量(Ra-