



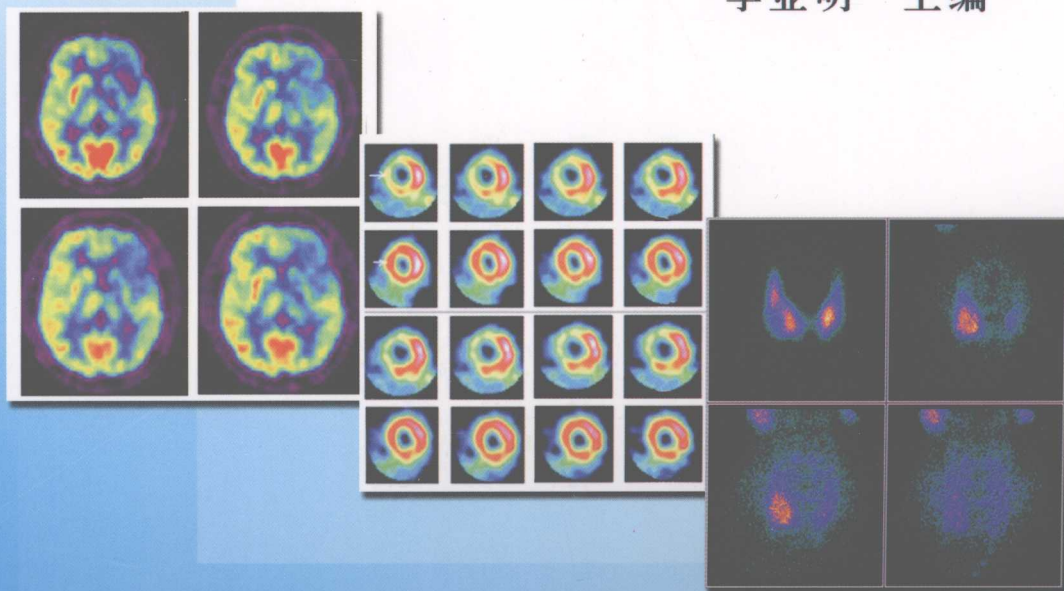
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高等医药院校教材

供临床、预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、检验、护理、法医等专业使用

核医学教程

第2版

李亚明 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高等医药院校教材

供临床、预防、基础、口腔、麻醉、影像、药学、检验、护理、法医等专业使用

核医学教程

第2版

主 编 李亚明

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书由4篇(总论、诊断、治疗和展望)计27章组成。“总论篇”重点介绍和阐述了核医学及其相关知识的基本概念,核医学仪器和药物的质量控制,临床常规诊治的辐射剂量和放射卫生防护监测。“诊断”篇,共分12章,系统阐述了核医学体内、体外检查的原理、方法和临床意义。“治疗”篇系统介绍了核素体内、体外治疗的原理和临床应用,突出了对于核素治疗后出现的临床表现的医学认识。作为培养21世纪医学人才的教材,本书增设了“展望”篇,重点介绍了核医学在现代和未来医学疾病研究、诊治中的价值、进展和发展趋势。

本书是高等医药院校5年制、7年制学生教学用书,也是核医学专业人员、临床医师及研究生的良好参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核医学教程 / 李亚明主编. —2版. —北京:科学出版社,2007
普通高等教育“十一五”国家级规划教材,全国高等医药院校教材
ISBN 978-7-03-019826-6

I. 核… II. 李… III. 原子医学—高等学校—教材 IV. R81

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第134241号

责任编辑:夏 宇 裴中惠/ 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/ 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年8月第 一 版 开本:850×1168 1/16

2007年8月第 二 版 印张:20 1/2

2007年8月第三次印刷 字数:728 000

印数:14 001—20 000

定价:32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

《核医学教程(第2版)》编委名单

主 编 李亚明

副主编 王 铁 匡安仁 张永学 何作祥

编 委 (按姓氏笔画排序)

马云川 首都医科大学宣武医院
王荣福 北京大学第一医院
王 铁 首都医科大学朝阳医院
王雪梅 内蒙古医学院附属医院
尹雅芙 中国医科大学附属第一医院
田月琴 中国医学科学院阜外心血管医院
冯 珏 河北医科大学第二医院
匡安仁 四川大学华西医院
吕中伟 同济大学附属第十人民医院
刘学公 安徽省立医院
关晏星 南昌大学第一附属医院
安 锐 华中科技大学协和医院
李亚明 中国医科大学附属第一医院
李林法 浙江大学医学院附属第一医院
李思进 山西医科大学第一医院
李险峰 山西医科大学第一医院
吴湖炳 南方医科大学南方医院
何作祥 中国医学科学院阜外心血管医院
宋丽萍 辽宁医学院附属第一医院
张永学 华中科技大学协和医院
金龙云 牡丹江医学院附属红旗医院
庞 华 重庆医科大学附属第一医院
秦毅强 内蒙古医学院附属医院
袁卫红 昆明医学院第二附属医院
高 硕 天津医科大学总医院
黄 钢 上海交通大学医学院附属仁济医院
阎 英 沈阳军区总医院
梁昌华 中南大学湘雅医院
蒋宁一 中山大学附属第二医院
韩建奎 山东大学齐鲁医院
樊 卫 中山大学附属肿瘤医院

编写秘书 尹雅芙

第2版前言

为全面贯彻落实科学发展观,切实提高高等教育的质量,教育部制定了普通高等教育“十一五”国家级教材规划。经出版社申报、专家评审、网上公示,最后确定了“十一五”国家级规划教材,《核医学教程》一书被列入其中。

第1版《核医学教程》于2002年编写出版。在过去的6年中,国内外,尤其是我国核医学有了长足的发展,新技术、新方法在临床疾病的研究、诊断和治疗中发挥越来越大的作用和影响。

第2版《核医学教程》全面贯彻教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材编写指导思想。本书的编写作者包括了我国国内知名核医学专家、教授近30人,分别来自中国医学科学院系统、北京、上海、天津、重庆、东北地区、西北地区等多所高等教育学府,他们有着丰富的核医学教学和科研、临床经验。

与第1版相比,第2版《核医学教程》全书字数变化不大,但章节由原来的16章增至4篇(总论、诊断、治疗和展望)27章。在“总论”篇,增加了放射性药物的质量控制与质量检验、放射性药品的使用和管理(如使用原则、近年新实施的相关法律法规、不良反应及防治等)、临床常规诊治的辐射剂量(突出各种显像包括ECT、符合线路、PET、PET/CT)、放射卫生防护监测和管理(包括剂量限值、ICRP的新建议、相关的法律法规、国家现行的最新标准等)。在“诊断”篇,第2版《核医学教程》突出了分子影像的理论和临床应用内容,如将正电子显像作为一节单独论述。在“治疗”篇里,本书除系统介绍了体内、体外治疗外,对于 ^{131}I 治疗 Graves 病出现的甲减,作者认为这是治疗的一个正常转归或结果,而并非副作用、副反应等,从概念上明确了临床治疗中出现的这一争议。

作为培养21世纪医学人才的教材,本书增加部分章节,重点介绍和展望了核医学的进展和发展趋势。这对于医学院校学生、研究生、临床核医学和非核医学医生、技师、护士学习和了解核医学都非常有益。

本教材各位编委均为工作在医教研一线的专家、学者,同时承担各级核医学学会等大量社会工作,在编写过程中大家本着高度的责任心,倾注全力使本书按期完稿,在此表示衷心感谢。中国医科大学附属第一医院核医学科的尹雅英、李雪娜等同志及科学出版社的领导和编辑在本书编辑、文稿校对、整理等工作中付出了辛勤努力,在此表示真诚的感谢。

由于编写时间仓促,水平有限,难免有不当之处,诚恳希望广大读者提出批评和改进意见,以便修订时加以完善和改正。

李亚明

2007年5月于中国医科大学

第1版前言

核医学是一门日益发展的新兴学科,半个世纪以来,由于核医学独特而重要的贡献,现已成为临床医学和实验的重要学科之一。

近年来,国内外核医学发展极为迅速。随着放射性药物、核医学仪器和诊疗项目的不断增加,核医学在不断地拓展新的领域和应用范围,同时也是高等医学院校各类医学生的必修课程,核医学的教学在医学教育中的地位和作用也愈益显得十分重要。

本书是由东北地区医学院校合编的一本核医学教材。根据各院校近年来核医学课程教学情况及近年核医学的发展,尤其是 21 世纪高等医药院校核医学课程教学和临床医师、进修医师学习的需要,集中东北地区主要高等医学院校的核医学专家,总结了近年来教材的使用经验及成果,在我们自己工作的基础上,吸收、总结国内外核医学新进展、新经验和新技术,进行了本书的编写。

全书共分为 16 章,其中第 1~3 章介绍核医学相关的基础知识、概念、核医学仪器、放射性药物及放射卫生防护等。第 4、5 两章为体内影像核医学和体外放射分析技术的原理、特点及应用,包括对新技术和仪器,如图像融合、正电子发射体层显像技术(PET)等显像特点及类型等做了着重阐述。第 6~14 章为临床核医学各论的主要内容,按各系统展开,叙述核素显像及功能检查的主要内容。第 15 章为放射性核素治疗部分,增加了近年开发应用的转移性骨肿瘤、骨质疏松、骨痛的治疗及放射性支架介入治疗等新的内容。第 16 章为小儿核医学,着重阐述了小儿核医学检查的特点及临床应用。

全书总体分为两大部分,即核医学的基础知识和临床应用。为了适应当代医学和分子生物学结合的模式,正电子发射体层显像技术和相应设备开始进入临床实用阶段,本书介绍了 PET 显像原理、图像处理、质量控制及临床应用等方面,力求把 21 世纪核医学的进展和发展趋势展现给读者。

本教材的主要对象为高等医学院校临床医学系开设核医学课的本科生,儿科系及卫生专业的学生,并可作为研究生及进修生的参考书。主要目的是使学生了解核医学的内容、核医学的进展,掌握临床诊疗中常用的核技术,熟悉临床核医学的基本内容及应用,力求帮助学生在临床实践中提高分析和解决实际问题的能力。

本教材的特点是着力反映国内外新成果、新水平、新趋势,具有鲜明的针对性和先进性,力图具有代表性。

本书的全体编写人员团结协作,严谨求实,认真细致地完成各部分的编写工作。在编写过程中受到东北地区主要高等医学院校核医学专家的大力支持与帮助,在此一并表示感谢。由于时间仓促,水平有限,难免有不妥之处,希望相关院校及广大读者在使用过程中提出宝贵意见,以便修订时加以改正。

罗锡圭

2002 年 3 月

目 录

第一篇 总论

第1章 核医学概述	(1)
第一节 核医学的定义和内容	(1)
第二节 核医学的特点	(1)
第三节 核医学的发展历史和现状	(2)
第2章 核物理基础知识	(6)
第一节 原子核及核外轨道电子	(6)
第二节 核衰变类型、规律及放射性活度单位	(7)
第三节 射线与物质的相互作用	(9)
第3章 放射性探测仪器	(12)
第一节 放射性探测仪器基本结构及其工作原理	(12)
第二节 放射性计数类型仪器	(12)
第三节 脏器功能检测仪器	(14)
第四节 脏器显像仪器	(14)
第五节 其他类型放射性探测仪器	(19)
第六节 放射性探测仪器的质量控制	(19)
第4章 放射性药物	(21)
第一节 放射性核素的来源	(21)
第二节 放射性药物的制备	(22)
第三节 放射性药物的质量控制与质量检验	(23)
第四节 放射性药品的使用和管理	(24)
第五节 体内诊断用放射性药物	(25)
第六节 体内治疗用放射性药物	(27)
第5章 放射辐射生物学和防护	(29)
第一节 天然和人工放射源	(29)
第二节 辐射生物效应	(29)
第三节 放射防护的基本原则和措施	(34)

第二篇 诊断

第6章 核医学诊断概论	(38)
第一节 放射性核素显像的基本原理	(38)
第二节 正电子显像的基本原理	(38)
第三节 显像剂聚集的机制	(39)
第四节 放射性核素显像的类型和主要特点	(40)
第五节 放射性核素显像的影像分析	(43)
第六节 放射性核素非显像方法	(44)

第7章 神经系统	(46)
第一节 脑葡萄糖代谢显像和脑血流灌注显像	(46)
第二节 脑池显像和脑室显像	(54)
第三节 神经核医学研究	(57)
第8章 心血管系统	(61)
第一节 心肌灌注显像	(61)
第二节 心肌代谢显像	(70)
第三节 心肌神经受体显像	(73)
第四节 心肌阳性显像与乏氧显像	(74)
第五节 门电路心血池显像	(75)
第六节 大血管显像与深静脉显像	(81)
第9章 内分泌系统	(84)
第一节 甲状腺功能测定	(84)
第二节 甲状腺显像	(88)
第三节 甲状旁腺显像	(95)
第四节 肾上腺显像	(96)
第10章 消化系统显像	(102)
第一节 肝胶体显像	(102)
第二节 肝动脉血流灌注显像和肝血池显像	(105)
第三节 肝胆动态显像	(107)
第四节 唾液腺显像	(110)
第五节 胃肠道出血显像	(113)
第六节 异位胃黏膜显像	(114)
第七节 胃-食管反流显像和胃排空功能测定	(117)
第八节 ^{13}C 或 ^{14}C -尿素呼气试验	(119)
第11章 呼吸系统	(121)
第一节 肺灌注显像和肺吸入显像的原理和方法	(121)
第二节 临床应用	(124)
第12章 骨骼系统	(130)
第一节 静态骨显像	(130)
第二节 动态骨显像	(141)
第三节 关节显像	(145)
第四节 骨密度测定	(147)
第13章 骨髓与淋巴显像	(151)
第一节 骨髓显像	(151)

第二节 淋巴显像	(154)	第五节 ^{186}Re 及 ^{188}Re 治疗骨转移癌	(234)
第一节 肾图检查	(158)	第六节 其他治疗骨转移癌的放射性药物	(236)
第二节 肾动态显像	(160)	第 21 章 皮肤病的放射性核素治疗	(238)
第三节 肾脏功能介入试验	(164)	第一节 放射性核素治疗皮肤病概论	(238)
第四节 肾图和肾动态显像的临床应用	(165)	第二节 血管瘤的放射性核素治疗	(243)
第五节 肾静态显像	(166)	第三节 其他皮肤病的放射性核素治疗	(246)
第六节 膀胱反流显像	(167)	第 22 章 血液疾病的放射性药物治疗	(250)
第 15 章 肿瘤和炎症显像	(170)	第一节 放射性药物治疗血液病概论	(250)
第一节 非特异性肿瘤显像	(170)	第二节 ^{32}P 治疗真性红细胞增多症	(251)
第二节 特异性肿瘤显像	(175)	第三节 ^{32}P 治疗原发性血小板增多症	(253)
第三节 肿瘤代谢显像	(182)	第四节 ^{32}P 治疗慢性白血病	(255)
第四节 炎症显像	(193)	第五节 其他血液病的放射性药物治疗	(257)
第 16 章 体外标记免疫分析	(197)	第 23 章 放射性核素介入治疗	(259)
第一节 体外标记免疫分析的基本原理	(197)	第一节 放射性粒子植入治疗	(259)
第二节 体外标记免疫分析的基本试剂和基本技术	(198)	第二节 腔内介入治疗癌性胸、腹水	(262)
第三节 体外标记免疫分析的类型	(198)	第三节 放射性核素动脉介入治疗	(263)
第四节 体外标记免疫分析的质量控制	(202)	第四节 放射性支架血管内照射预防血管成形术后再狭窄	(264)
第 17 章 小儿核医学	(204)	第 24 章 放射免疫治疗	(270)
第一节 小儿核医学诊疗中的特殊问题	(204)	第一节 放射免疫治疗的原理	(271)
第二节 临床应用	(205)	第二节 放射免疫治疗用药物	(271)
第 3 篇 治疗		第三节 放射免疫治疗的临床应用和现状	(273)
第 18 章 放射性药物治疗概论	(208)	第 25 章 其他疾病的治疗	(277)
第一节 放射性药物治疗疾病的基本原理	(208)	第一节 $^{99}\text{Tc-MDP}$ (云克) 的治疗	(277)
第二节 治疗用放射性药物的特点	(209)	第二节 嗜铬细胞瘤的核素治疗	(279)
第三节 放射性药物治疗的门诊、病房管理	(211)	第三节 前列腺增生的治疗	(280)
第 19 章 甲状腺疾病的放射性药物治疗	(214)	第四节 ^{131}I 治疗脊髓空洞症	(283)
第一节 甲状腺功能亢进症的 ^{131}I 治疗	(214)	第 4 篇 展望	
第二节 甲状腺高功能腺瘤的 ^{131}I 治疗	(217)	第 26 章 核医学的研究热点	(284)
第三节 分化型甲状腺癌及其转移灶的 ^{131}I 治疗	(219)	第一节 受体显像研究	(284)
第四节 其他甲状腺疾病的放射性核素治疗	(224)	第二节 基因显像与基因治疗研究	(289)
第 20 章 恶性肿瘤骨转移癌的放射性药物治疗	(226)	第三节 凋亡显像研究	(294)
第一节 放射性药物治疗骨转移癌概论	(226)	第四节 动脉粥样硬化斑块显像研究	(296)
第二节 用于骨转移癌治疗的放射性核素	(228)	第五节 乏氧显像研究	(298)
第三节 $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ 治疗骨转移癌	(229)	第六节 放射免疫显像研究	(300)
第四节 $^{89}\text{SrCl}_2$ 治疗骨转移癌	(231)	第 27 章 核医学分子影像展望	(303)
		附录	(307)
		I. 常用放射性核素主要物理参数表	(307)
		II. 放射性核素通用衰变计算表	(309)
		III. 小儿放射性药物投予剂量算法	(311)
		IV. 常用放射性药物	(312)
		英汉名词对照	(314)

第一篇 总论

第 1 章 核医学概述

第一节 核医学的定义和内容

核医学(nuclear medicine)是利用核素(nuclide)及其标记物(labeled compound)进行临床诊断、治疗疾病以及生物医学研究的一门学科,是核技术与医学相结合的产物,是现代医学的重要组成部分,对医学的发展有巨大的影响,已成为举世公认的独立学科。

核医学在内容上分为实验核医学(experimental nuclear medicine)和临床核医学(clinical nuclear medicine)两大部分。

实验核医学应用核素及其核射线进行生物医学的基础理论研究,探索生命现象的本质和物质变化的规律,为认识正常生理、生化过程和病理过程提供新理论和新技术,已广泛应用于生命科学的各个领域。

临床核医学是利用核素及其标记物诊断和治疗疾病的临床医学学科,包括诊断核医学和治疗核医学。

诊断核医学由以放射性核素显像(radi-nuclide imaging, RI)及脏器功能测定为主的体内(in vivo)诊断法和以体外放射分析为主的体外(in vitro)诊断法组成。

利用放射性核素及其标记物进行脏器和病变显像的方法称为放射性核素显像,这种显像有别于单纯形态结构的成像,是一种独特的分子功能影像,是核医学的重要特征之一,特别是现代分子生物学的发展更为临床核医学的分子功能显像(molecular functional imaging)注入了强大的生命力。

如果只以时间-放射性曲线(time-activity curve)等显示形式进行脏器功能测定则称为非显像检查法。

体外放射分析是以放射免疫分析(radio-

immunoassay, RIA)为代表的体内微量生物活性物质定量分析技术,是将实验核医学的相关核技术应用于医学检验领域,是现代医学检验学的重要组成部分,已成为医学检验技术现代化的重要标志之一。

治疗核医学是通过高度选择性聚集在病变部位的放射性核素或其标记物所发射出的射程很短的核射线,对病变进行内照射治疗。

实验核医学和临床核医学是同一学科的不同分支,实验核医学的研究成果不断推动临床核医学的发展,而临床核医学在应用实践中又不断向实验核医学提出新的研究课题,二者相互促进,不断发展进步。

第二节 核医学的特点

核医学成像技术与超声成像(US)技术、X线CT(X-CT)技术和磁共振成像(MRI)技术是当今医学诊断的四大影像技术,在临床诊疗中均占据举足轻重的地位。

核医学功能代谢显像与超声成像、X线和MRI等成像技术是完全不同的。超声成像是利用声纳原理,通过探测回波信号直接成像,以人体不同组织及正常和异常组织声阻抗不同为诊断依据,成像速度快,成本低。X-CT成像是以测定人体的吸收系数为基础,以衰减系数为重建变量,用数学方法通过电子计算机处理而形成重建断层图像,以物理密度差异为诊断依据,成像分辨率高。MRI成像是利用人体中水的氢质子在磁场中经共振吸收后的弛豫过程而形成的多参数重建图像,其共振信号反映了受检体的氢质子密度,以人体正常和病变组织或器官的质子密度分布不同为诊断依据,对软组织的区分能力强。上述三种所获得的影像基本为解剖结构成像,图像清晰。

核医学成像以核素示踪技术为基础,以放射性浓度为重建变量,以组织吸收功能的差异为诊断依据。将放射性核素标记的分子探针(molecular probe)和(或)显像剂(imaging agent)、示踪剂(tracer)引入机体后,探测并记录引入体内靶组织或器官的放射性示踪剂发射的 γ 射线,并以影像的方式显示出来。这不仅可以显示脏器或病变的位置、形态、大小等解剖学结构,更重要的是可以同时提供有关脏器和病变的血流、功能、代谢和受体密度的信息,甚至是分子水平的化学信息,因此,有助于疾病的早期诊断。这也是核医学成像最有特色之处。

此外,放射性核素显像为无创性检查,所用的放射性核素物理半衰期(physical half life, $T_{1/2}$)短,显像剂化学量极微,病人所接受的辐射吸收剂量(absorbed dose)低,因此,发生毒副作用的几率极低。

近年来,由于同时反映功能代谢和解剖形态的新型核医学显像仪器问世,将单光子发射型计算机断层仪(single photon emission computed tomography, SPECT)和正电子发射型断层仪(positron emission tomography, PET)同机配置了CT装置,即SPECT/CT和PET/CT,改写了传统的核医学影像由于引入放射性及仪器分辨率的限制不能提供病变细微结构的历史,这是核医学功能代谢显像发展的一个新里程碑。

PET/CT是将高性能的PET和多层螺旋CT通过多种技术在硬件和软件方面结合在一起的高科技产品,这种结合并不是X线CT功能和正电子符合探测功能的简单相加,除具有螺旋CT功能和正电子符合探测功能之外,还具有螺旋CT和正电子符合成像设备单独不具备的同机图像融合功能,是目前最先进的医学影像检查设备之一。因此,核医学显像具有灵敏度高、特异性强、分辨率和安全性好,对病灶提供精细定位和定性诊断,快速获得全身显像、分子功能显像及反映病理生理过程的疾病的早期诊断特点是其他影像技术不可替代的。

近年来,各种成像技术均有很大的发展。超声成像利用更多的声学参数作载体,以获取更多的生理、病理信息;通过数字化等途径,努力提高声像图质量,使其能显示更微细的组织结构。对比造影剂增强CT和动态CT、螺旋

MRI、磁共振波谱技术(MRS)等可显示血流动力学、分子微观运动、生理、生化代谢变化及化合物定量分析。

新的挑战更促使核医学向发挥自己优势的方向快速发展。图像融合(fusion imaging)技术可将CT、MRI解剖结构影像与核医学SPECT和PET获得的功能代谢影像相叠加,更有利于病变精确定位和准确性诊断。

放射性核素示踪技术与分子生物学技术相结合产生的分子核医学(molecular nuclear medicine)发展十分迅速,单克隆抗体或基因工程抗体放射免疫显像(radioimmunoimaging, RII)和放射免疫治疗(radioimmunotherapy, RIT)、基因表达显像(gene expression imaging)和基因治疗(gene therapy)、反义显像(antisense imaging, ASI)和反义治疗(antisense therapy, AST),以及分子显像(molecular imaging)探针等临床应用研究非常活跃,具有广阔的应用前景。

可以预见,核医学仪器设备和放射性示踪剂的发展对提高威胁人类健康的肿瘤和心脑血管疾病的早期影像诊断技术及治疗水平方面将起到十分重要的作用。

第三节 核医学的发展 历史和现状

一、核医学的发展历史

现代科学技术的四大标志是电子计算机技术、空间技术、生物技术和原子能的和平利用,后者一个多世纪以来获得了迅速发展,已深入到国民经济的各个领域和部门。

1895年,伦琴(Roentgen)发现X线,1896年贝克勒尔(Becquerel)发现铀[^{238}U]的天然放射性,从而打开了核物理学的大门。

1898年,居里(Curie)夫妇成功提炼出镭[^{226}Ra]和钋[^{218}Po]放射性核素,制成Ra针,Ra治疗揭开了核医学的序幕。

1930年加速器问世,实现了人造放射性核素,但因产量小、品种少、价格昂贵而难以推广。

1938~1942年,首次用 ^{131}I 诊断和治疗甲状腺疾病,为诊治核医学的发展及广泛应用开

辟了光明大道。

1942年,原子能反应堆建成,使人造放射性核素的产量、品种增多,价格降低,为核医学发展打下了物质基础。应用的核素包括碘 ^{131}I 、 ^{125}I 、磷 ^{32}P 、氚 ^3H 、碳 ^{14}C 、硫 ^{35}S 、锝 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。

20世纪50年代,甲状腺功能仪、肾功能仪、闪烁扫描机的应用,揭开核医学显像诊断的序幕。20世纪60年代, γ 照相机、钼 ^{99}Mo -锝 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器、RIA等体外放射分析的应用,核医学、核药学(nuclear pharmaceuticals)开始腾飞,放射性核素标记物(如标记抗原、抗体、配体)和放射性药物(radiopharmaceuticals)如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记药物在品种、数量和质量上获得了很大的发展。20世纪70年代,电子计算机在核医学中应用,核医学仪器得到进一步完善,核医学诊断水平得到进一步提高,实现了脏器功能测定和动态显像。20世纪80年代以来,SPECT、PET、符合线路SPECT、SPECT/CT、PET/CT仪器的发展;另一方面,核药学研制更好的脏器动态显像剂,建立快速标记法,研制超短半衰期核素标记的代谢显像剂,如镓 ^{67}Ga 、铊 ^{201}Tl 、铟 ^{111}In 、 ^{123}I 、 ^{11}C 、氮 ^{13}N 、氧 ^{15}O 、氟 ^{18}F 标记药物,核医学已发生了翻天覆地的变化,取得了令人瞩目的成就。

我国的核医学经过了从无到有、从小到大的发展过程,在老、中、青三代核医学工作者几十年的共同努力下,我国核医学事业从规模到水平都得到了良好的发展,在某些领域已达到或接近国际先进水平,核医学技术在临床工作中已成为诊治疾病和医学研究不可缺少的手段。

二、核医学的发展现状

(一) 放射性药物

放射性药物是临床核医学发展的重要基石,其中用于放射性核素显像的放射性药物种类繁多,发展也非常迅速。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 是显像检查中最常用的放射性核素,目前全世界应用的显像药物中, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 及其标记的化合物占80%以上,广泛用于心、脑、肾、骨、肺、甲状腺等多种脏器疾患的检查,并有配套药

盒供应。此外, ^{131}I 、 ^{67}Ga 、 ^{201}Tl 、 ^{111}In 、 ^{123}I 等放射性核素及其标记物也有较多应用,在临床中发挥着各自的特性和作用。

20世纪70年代以来,随着PET、医用回旋加速器及目前PET/CT显像仪器的问世及推广应用; ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 等短半衰期的正电子放射性核素的应用也逐年增多,在研究人体生理、生化、代谢、受体等方面显示出独特优势,其中 ^{18}F 标记的氟代脱氧葡萄糖(^{18}F -fluorodeoxyglucose, ^{18}F -FDG)是目前临床应用最为广泛的正电子放射性药物,其他如肿瘤代谢显像剂 ^{11}C -MET、心、脑灌注显像剂 ^{13}N - NH_3 、tk报告基因显像剂 ^{18}F -FHBG、乏氧心肌显像剂 ^{18}F -FMISO以及受体显像剂 ^{18}F -FES、 ^{123}I (^{11}C)- β -CIT、 ^{18}F -dopa、 ^{123}I (^{11}C)-QNB、 ^{131}I (^{11}C)-CFN等逐步应用于临床或显示出很好的临床应用前景。

治疗用放射性药物种类也很多, ^{131}I 仍是治疗甲状腺疾病最常用的放射性药物;镱 ^{89}Sr 、钐 ^{153}Sm -EDTMP和铼 ^{188}Re -HEDP等放射性药物在骨转移癌的缓解疼痛治疗中也取得了较为满意的效果;其他治疗性放射性药物还有 ^{32}P 、钇 ^{90}Y 、 ^{131}I -MIBG等。

我国对放射性药物的研究自1985年以后发展较快,取得了令人瞩目的成果,尤其是一批 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记的放射性药物的研制成功大大促进了临床核医学的发展,如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -ECD、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA等已成为心肌灌注显像、脑血流灌注显像和肾动态显像的常用显像剂。此外, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -N(NOEt) $_2$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HL91、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -TRADOT-1等一批新型放射性药物也开始应用于冠心病、细胞乏氧和早期帕金森病诊断的临床应用研究,同时 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -IBZP、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -ABZM、 ^{18}F -7-OH-AFPM等受体显像剂的研制也取得了可喜的进展。

(二) 核医学仪器

核医学仪器是核医学工作中必不可少的条件,它包括核医学诊疗工作中所使用的各种放射性探测仪器,其中显像仪器是最重要的组成部分。

1958年,Anger发明了第一台 γ 照相机(γ camera),为核医学显像技术的应用奠定了基础,使 γ 照相机成为最基本的显像仪器。

20世纪80年代推出了SPECT,实现了全

身显像和断层显像,从而大大提高了图像的空间分辨率和诊断的灵敏度及准确性,加速了临床核医学的发展,SPECT已成为目前核医学科最常用的显像仪器,并列为国家三级甲等医院必需配备的检查仪器。PET是目前临床核医学领域中最先进的显像仪器,被美国2000年《时代周刊》评为20世纪最具有创意且已商业化的三大发明之一。迄今为止,全世界已有1000多个PET中心。近年来研制成功了双探头和三探头符合线路SPECT(coincidence circuit SPECT),它在SPECT基础上兼有部分正电子显像功能;此外,在PET、符合线路SPECT基础上通过配置CT成像系统,实现了衰减校正(attenuation correction, AC)与同机图像融合,即SPECT/CT、PET/CT,可同时获得病变部位的功能代谢状况和精确解剖结构的定位信息,已成功用于临床。此外,动物SPECT(microSPECT)、动物PET(microPET)和动物PET/CT(microPET/CT)已研制成功并推广到临床实验研究应用中,对今后生物学基础理论研究及新药开发具有重要应用意义。目前,我国在临床运行的 γ camera 100多台,SPECT 500多台,符合线路SPECT 120余台,PET 11台,PET/CT 70多台,进口和国产microPET各一台。

(三) 临床核医学

1. 放射性核素显像 放射性核素显像是临床核医学的重要组成部分,其检查内容几乎涵盖了全身各个系统,在心血管系统、骨骼系统、泌尿系统、神经系统和内分泌系统疾病、肿瘤中的应用更为广泛。

(1) 核心脏病学(nuclear cardiology):是临床核医学的重要组成部分之一。心肌灌注显像与心室显像已成为目前无创性诊断冠心病和评价心功能的灵敏而准确的方法;门控心肌灌注断层显像在观察心肌血供状况的同时可以评价左室室壁运动和左心功能状况,具有更大的实用价值。

近年来,心肌代谢显像检测存活心肌、心脏神经递质和受体显像了解心脏神经支配功能完整性及受体分布、密度与亲和力等新的显像技术的应用,在冠心病治疗决策、心脏介入治疗及心脏移植术后的疗效评价等方面均有重要意义。

(2) 神经核医学(nuclear neurology):在观察和研究脑血流分布、代谢、受体等方面有着重要作用。局部脑血流(regional cerebral blood flow, rCBF)显像是研究脑局部血供状况的常用方法,合并应用负荷试验,可以显著提高对缺血性脑血管病的诊断灵敏度和准确性;脑 ^{18}F -FDG显像在痴呆的鉴别诊断和脑功能研究方面有其独特优势。

近年来脑神经递质和受体显像也从实验室研究进入临床应用,其中 ^{123}I 标记的多巴胺 D_2 受体(IBZM)显像、5-羟色胺转运蛋白(β -CIT)显像以及 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记的多巴胺转运蛋白(TRANOT-1)显像已开始应用于帕金森病的诊断和疗效观察、精神分裂症患者的耐药筛选及药量选择和药物成瘾及戒毒应用研究。

此外,在探索人类行为、情感等生理行为变化和脑部疾患上,神经递质和受体显像越来越受到重视,这方面的研究国外已进入临床应用阶段,国内的实验研究取得了令人满意的结果。我国已成功合成了 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -TRANOT-1并进行了猴帕金森病模型实验和临床前研究。

(3) 肿瘤核医学(nuclear oncology):近年来异军突起,利用 ^{67}Ga 、 ^{201}Tl 、 ^{131}I 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{18}F 等放射性核素及其标记化合物进行非特异性或特异性肿瘤显像在肿瘤诊断和疗效观察等方面的价值日益受到临床的关注。特别是 ^{18}F -FDG肿瘤代谢显像在肿瘤良恶性鉴别、分级和分期、治疗后复发和坏死的鉴别、疗效和预后判断等方面具有独特优势。

近年来,随着PET/CT及正电子核素的广泛应用,放射性核素显像已进入分子水平,以肿瘤代谢、基因、受体等为对象的肿瘤分子显像展示了诱人的前景。代谢显像中除葡萄糖代谢显像外,核苷酸代谢显像、氨基酸代谢显像等都具有重要临床价值。

放射免疫显像从临床试用至今检查患者已达数万例,肿瘤类型涉及结肠癌、卵巢癌、乳腺癌、胃癌、甲状腺癌、肺癌、膀胱癌、黑色素瘤以及淋巴瘤等多种恶性肿瘤。

受体显像是一种无创的、能在活体内、从受体分子水平上研究肿瘤生物学的新方法,并对肿瘤病因学探讨、早期诊断和指导治疗具有重要的临床价值,诊断效能明显优于传统的影像学检查。

在国外,神经多肽受体显像、类固醇受体显像与 σ 受体显像等已用于多种肿瘤的诊断、分期、治疗方案选择与预后评价。

反义显像技术是利用放射性核素标记的人工合成的反义寡核苷酸注入体内后,通过体内核酸杂交而显示特异性癌基因过度表达的癌组织。目前大多数用金属放射性核素直接标记DNA,单链或双链DNA先用初级胺在反义DNA的两端将其衍生,再用不同的金属双功能螯合剂,如DTPA、SHNH或 MAG_3 进行螯合以减少空间障碍,最后用 ^{99m}Tc 进行标记。使用单独或用聚乙二醇包裹的脂质体作为载体来提高转运效率,提高细胞内探针的浓度。

乏氧组织显像是应用乏氧组织显像剂探测缺血、缺氧组织,动物和人实体肿瘤中普遍存在乏氧细胞,对肿瘤患者治疗前后肿瘤氧水平进行检测,可评价疗效、有助于制定治疗方案。目前,国内外报道 ^{99m}Tc -HL91和 ^{18}F -FMI-SO乏氧显像已成功地应用于临床肿瘤显像。

此外,其他各系统的放射性核素显像在长期的临床应用实践中也得到不同程度发展和完善。

2. 放射性核素治疗 放射性核素治疗安全、经济且疗效肯定,已成为治疗疾病的一种有效手段。放射性核素治疗始于20世纪40年代中后期,当时主要用于内分泌、血液系统疾患的治疗。经过几十年的发展,经典的 ^{131}I 治疗甲状腺功能亢进症和功能性甲状腺癌转移灶及 ^{131}I -MIBG治疗嗜铬细胞瘤等仍然是临床治疗的有效手段。

近年来, $^{89}SrCl_2$ 、 ^{153}Sm -EDTMP和 ^{188}Re -HEDP等用于治疗恶性肿瘤骨转移癌引起的骨痛取得了较为满意的效果。

我国研制的 ^{99m}Tc -MDP(亚甲基二磷酸盐,商品名“云克”)对类风湿性关节炎、骨转移癌骨痛治疗的疗效逐渐得到肯定。

肿瘤的核素导向治疗包括放射免疫治疗,受体导向治疗已经或正在进入临床研究阶段,具有广阔前景。基因治疗和反义治疗的研究在血液病等领域取得了许多可喜的结果。

^{125}I 粒子组织间植入方法治疗实体瘤等肿瘤新疗法也越来越受到人们的关注,并得到临床推广应用。另外,冠状动脉狭窄血管成型术后进行放射性核素内照射治疗来预防冠脉再狭窄的方法国内已开始试用于临床,并取得

了较好效果。

3. 体外放射分析 Yalow和Berson于1959年建立 ^{131}I -胰岛素RIA,1968年Miles和Hales建立免疫放射分析(immunoradiometric assay, IRMA),开辟了医学检验史上的新纪元,Yalow并因此获得了诺贝尔生理学或医学奖。RIA填补了定量测定体内极微量生物活性物质方法的空白,在其后40多年来大大推动了内分泌学科的飞速发展。

我国RIA起步于1962年,当时首次建立了胰岛素的RIA分析方法并应用于临床,之后RIA试剂药盒的生产、RIA测试仪器的研制及其临床应用方面都逐渐发展起来。全国各地的大中型医院和部分基层医院都建有RIA实验室或RIA中心,能够进行激素、蛋白、抗体等300余种生物活性物质的检测,每年检测数量约5000万人次,收到极好的社会效益和经济效益。

在RIA的测定原理基础上,其他体外分析方法也得到了不断发展,如酶免疫分析(ELISA)、化学发光免疫分析(CLIA)、时间分辨荧光免疫分析(TbFIA)等非放射性体外分析技术对RIA提出了挑战,这就需要不断发展高灵敏的免疫放射分析法使检测的灵敏度大大提高,改进标记和检测技术并不断开发新的检测项目等,充分发挥体外放射分析方法的优点,以适应临床医学的发展。



学习要点与思考

1. 掌握核医学的定义、内容和特点及核医学诊治疾病的基本原理及其特点。

2. 熟悉本学科在生物医学领域的地位、尤其有别于其他医学影像技术而反映组织细胞功能代谢和受体密度的特点及优势,科学和客观地对核医学这门交叉渗透知识性非常强的边缘学科有一个新的全面认识。

3. 了解核医学发展历史、现状、新进展和学科发展的前景。为今后学习各章节和运用核医学新技术、新疗法为临床医学服务打下坚实的基础。

(王荣福)

第 2 章 核物理基础知识

第一节 原子核及核外轨道电子

一、原子结构

在自然界中有些物质是由分子构成的,有些物质是由原子直接构成的。构成物质的分子也都是由原子构成的。

具有相同的核电荷数(即质子数)的同一类原子总称为元素(element)。

原子(atom)是元素的基本单位。原子由质子、中子和电子(electron, e)组成。原子的中心是原子核,带有正电荷;其核外有数量不等的绕核旋转的电子,每个电子带有一个单位的负电荷。当核外电子与原子核所带的电荷数相等时,原子呈电中性。

原子的直径是 10^{-8} cm,原子核仅占极小的空间,其直径只有 10^{-13} cm。但它几乎集中了原子的全部质量。例如氢原子只有一个电子,其质量为 9.108×10^{-28} g,它的原子核(只有 1 个质子)质量为 1.672×10^{-24} g,原子核的质量是核外电子的 1836 倍。原子核集中了整个原子 99.9% 以上的质量。所以,一般用原子核的质量数代表整个原子的质量。国际上统一规定将 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 作为原子质量单位(atomic mass unit, u)。

$$1\text{u} = 1.660 \times 10^{-24}\text{g}$$

核外电子以固定的轨道绕着原子核运行。核外可有几个电子壳层,每个壳层有一定数量的轨道,按轨道半径由内到外依次为 K、L、M、N、O、P、Q 层,每层能容纳的电子数为 $2n^2$ (n 代表第几壳层);各壳层上的电子具有一定的能量,以电子伏特(eV)为单位,1eV 为 1.6×10^{-12} erg(尔格)($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$),它是指一个电子沿电场方向通过 1V 电位差时获得的能量。电子离核越远,位能越高(图 2-1)。

原子核由若干个基本粒子[称核子(nucleon)]组成。主要的核子是指质子(proton,

P)和中子(neutron, n)。

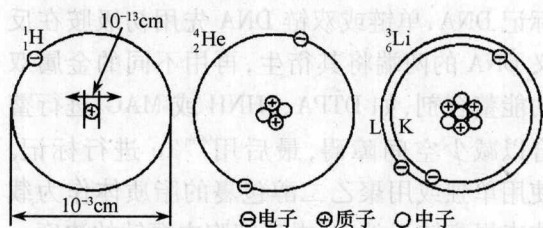


图 2-1 原子的结构

质子和中子质量相近,每个质子带有一个单位的正电荷,中子不带电荷。按照国际统一规定,一般用 X 表示某元素,用 A 表示原子的质量数,用 Z 表示原子核的质子数(原子序数),用 N 表示中子数,则 $A = Z + N$ 。这一元素可以写成: ${}_Z^AX$ 。原子核反应主要是指原子核中的核子变化。

二、核素、放射性核素和稳定性核素

1. 核素 质子数、中子数相同,并处于同一能级状态的原子,称为一种核素(nuclide)。例如, ^1H 、 ^2H 、 ^3H 分别为三种不同的核素。每种元素可以包括若干种核素。目前已知的核素有 2300 多种,分别属于 100 多种元素。核素可分为稳定性核素和放射性核素。

2. 放射性核素(radioactive nuclide) 又称为不稳定性核素(unstable nuclide),它能够自发地发生核内结构或能级的变化,同时可放出某种射线而转变为另一种核素。

3. 稳定性核素(stable nuclide) 能稳定地存在,不会自发地发生核内结构或能级的变化。在已经发现的 2300 余种核素中稳定核素只有 297 种。

三、同位素和同质异能素

1. 同位素 凡属同一种元素的不同核素,它们在元素周期表中处于相同的位置而中

子数不同,称为元素的同位素(isotope),例如 ^3H 、 ^2H 和 ^1H 互为氢的同位素。

2. 同质异能素 核内质子数和中子数都相同但能级不同的核素互称为同质异能素(isomer),如 ^{99}Tc 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 互为同质异能素。

第二节 核衰变类型、规律及放射性活度单位

一、核衰变类型

放射性核素的原子核处于不稳定状态,能自发地放出一种或几种射线转变成另一种新的核素,这一过程称为放射性核衰变(radioactive decay)。

核衰变的速度、方式、释放出的射线种类和能量只与该核素的核性质有关,而与温度、压力、磁场以及理化性质等外界因素无关。

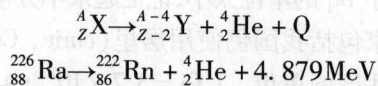
核衰变的过程严格遵从能量守恒定律,保持衰变前后的电量守恒、质量守恒和核子数守恒。

(一) α 衰变

α 衰变是放射性核素释放出 α 粒子的衰变过程,并伴有能量的释放。

α 粒子具有射程短、能量高和电离能力强的特点。主要发生于 $Z > 82$ 的核素。

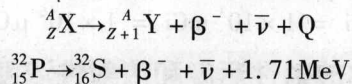
α 衰变每次释放出1个粒子,母核(X)失去2个质子和2个中子,子核(Y)原子序数减少2,质量数减少4。这一过程也释放出衰变的能量(Q),单位是MeV。 α 衰变通式和举例如下:



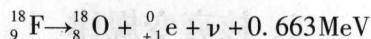
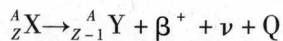
(二) β 衰变

β 衰变分为 β^- 衰变、 β^+ 衰变和电子俘获三种形式。

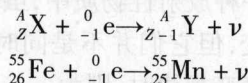
1. β^- 衰变 是由于原子核内中子相对过多而造成不平衡,致使原子核释放 β^- 粒子即放出电子,达到平衡,下式中 $\bar{\nu}$ 为反中微子。



2. β^+ 衰变 是由于原子核内质子相对过多而使核内放射出 β^+ 粒子即正电子,使原子核达到平衡,下式中 ν 为中微子。

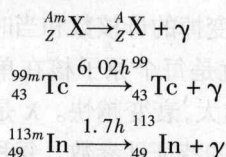


3. 电子俘获(electron capture, EC) 是指原子从核外电子壳层中俘获一个电子,而使核内的一个质子转变为中子和中微子的过程。



(三) γ 衰变

有些放射性核素在发生 α 衰变或 β 衰变以后,仍处于不稳定的激发态,它往往通过放出 γ 光子,然后从激发态回到基态或低能状态,这种过程称为 γ 衰变。



原子核由激发态向基态跃迁时,可以将多余的能量直接传给核外电子,使之获得足够的能量脱离轨道成为自由电子(free electron),这一过程称内转换(internal conversion)。由内转换放射出的自由电子称内转换电子(internal conversion electron)(图2-2)。

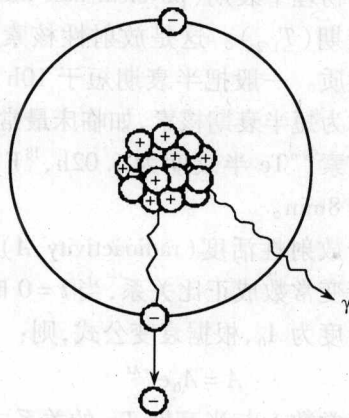
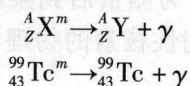


图2-2 γ 衰变和内转换模式图

核衰变形成的激发态子核有时可维持相当长的时间才退激。这种子核可看作是一种单独的放射性核素,本身又可作为母核,通过释放 γ 射线回到基态。此种衰变母核和子核的原子序数和质量数相同,只是母核和子核的能级不同。这种同质异能的变化称同质异能跃迁,其通式和举例如下:



二、核衰变规律

(一) 衰变定律

在任何一种放射性物质中,虽然所有原子都能发生衰变,但它们并不是同时进行,以公式表示其核衰变规律时,则为:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

式中: N_0 为 $t=0$ 时的放射性核素的原子核数; N 为经过一定时间 t 后的放射性核素的原子核数; e 为自然对数的底($e=2.718$); λ 为衰变常数(decay constant),表示单位时间内某种放射性核素自发衰变掉的母核数和当时存在的母核总数之比,也就是每个原子核在单位时间内衰变的几率, λ 越大,衰变越快。 λ 是反映放射性核素衰变速率的特征性参数。每种放射性核素都有自己的衰变常数,其公式为:

$$\lambda = 0.693/T_{1/2}$$

(二) 半衰期

1. 物理半衰期 某一放射性核素在衰变过程中,原有的放射性活度减少至一半所需要的时间称物理半衰期(physical half life, $T_{1/2}$),简称半衰期($T_{1/2}$)。这是放射性核素所特有的物理性质。一般把半衰期短于10h的放射性核素称为短半衰期核素,如临床最常使用的放射性核素 ^{99m}Tc 半衰期为6.02h, ^{18}F 的半衰期是109.8min。

由于放射性活度(radioactivity, A)与原子核数和衰变常数成正比关系,当 $t=0$ 时,初始放射性活度为 A_0 ,根据衰变公式,则:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

其中衰变常数 λ 与半衰期 $T_{1/2}$ 的关系式:

$$\lambda = 0.693 \cdot T_{1/2}^{-1} \text{ 或 } \lambda T_{1/2} = 0.693$$

所以上式可以改写成:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-0.693t/T_{1/2}}$$

按照衰变公式可计算出任何一种放射性核素,经历任何时间间隔后的放射性活度。在实际工作中为了简便,通常先算出 $t/T_{1/2}$,在“通用放射性核素衰变计算表”中查出相应的 $e^{-\lambda t}$ 数值,乘以 A_0 ,即可求得现有的放射性活度 A 。这里的 t 为测量后到某时刻的间隔时间, $T_{1/2}$ 为该放射性核素的物理半衰期, $e^{-\lambda t}$ 为衰变比值。

例如:现有 ^{131}I 注射液一瓶,出厂时测得放射性活度为3700 MBq(100mCi),测量日期为2007年1月5日,2007年1月20日使用时,其放射性活度为多少? 间隔时间 $t=15\text{d}$ 。

$$^{131}\text{I} \text{ 的 } T_{1/2} = 8.01\text{d}$$

$$t/T_{1/2} = 1.85$$

$$\text{查表 } e^{-\lambda t} = 0.277$$

2007年1月20日使用时 ^{131}I 的放射性活度 $A=1025\text{ MBq}$ (27.7mCi)。

2. 生物半衰期和有效半衰期 核医学中还经常使用生物半衰期(biological half life, T_b)和有效半衰期(effective half life, T_{eff})的概念。

(1) 生物半衰期:是指进入生物体内的放射性活度经由各种途径从体内排出原来一半所需要的时间。

(2) 有效半衰期:是指生物体内的放射性活度因从体内排除和物理衰变的双重作用,在体内减少到原来一半所需要的时间。

物理半衰期、生物半衰期和有效半衰期三者之间的关系为:

$$T_{\text{eff}} = (T_{1/2} \cdot T_b) \cdot (T_{1/2} + T_b)^{-1}$$

(三) 放射性活度

放射性活度(radioactivity)是表示单位时间内发生的核衰变次数。

放射性活度的国际制单位是贝可(Becquerel, Bq),定义为每秒发生一次核衰变。实际使用的放射性活度一般在 $1 \times 10^3\text{ Bq}$ 以上,常用的倍数单位有千贝可(kBq)、百万贝可(MBq)、十亿贝可(GBq)和万亿贝可(TBq)。

由于Bq的单位太小,记忆起来不方便,目前一些国家包括我国仍使用居里(curie, Ci)作为放射性活度的单位。 $1\text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \cdot \text{s}^{-1}$ 次核衰变。Bq和Ci的换算关系为:

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

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

由于居里(Ci)单位太大,实际工作中常采用它的分数单位,如毫居里(mCi)和微居里(μCi),它们的关系为:

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

(四) 比放射性活度和放射性浓度

比放射性活度(specific activity)是指单位质量物质内含有的放射性活度,简称比活度,单位是Bq/g或Bq/mol。放射性浓度(radio-

active concentration)是指单位体积溶液内含有的放射性活度,单位是 Bq/L。

(五) 放射性活度和质量的关系

根据阿伏加德罗常数(Avogadro constant) 1mol 的各种元素含 6.023×10^{23} 个原子,可以推算出放射性核素的质量与放射性活度的关系式如下:

$$m = (A \cdot T_{1/2} \cdot m_a) \cdot (4.17 \times 10^{17})^{-1}$$

$$m = (A_c \cdot T_{1/2} \cdot m_a) \cdot (1.13 \times 10^{13})^{-1}$$

式中 m 为质量(g), A 为放射性活度(MBq), A_c 为以居里(Ci)为单位的放射性活度, m_a 为原子质量数。现以 ^{131}I 为例计算如下:

$$^{131}\text{I} \text{ 的 } T_{1/2} = 8.01\text{d}, m_a = 131$$

代入上式可以得出 1MBq ^{131}I 质量为 $9.39 \times 10^{-11}\text{g}$ 同样的方法可以计算出 1 MBq 的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 质量为 $5.12 \times 10^{-12}\text{g}$ 。

应该说明计算放射性核素的质量时,所计算的放射性核素应是无载体(carrier-free)的,即纯粹的放射性核素不含有稳定性核素。若同时存在稳定性核素即有载体时(carrier-containing)。计算时应考虑到载体的影响。

第三节 射线与物质的相互作用

电离辐射是由射线所引起的。

射线包括直接致电离粒子,如 α 粒子、 β 粒子、电子和质子等;间接致电离粒子,如 X 线、 γ 射线、中子等。

射线与物质相互作用时产生的各种效应是辐射生物效应、放射线探测、辐射防护与核医学治疗应用的核物理基础。

一、带电粒子和物质的相互作用

1. 电离 带电粒子和物质原子中的电子发生相互作用,使轨道电子获得足够的能量脱离原子,形成正负离子对的过程称电离(ionization)。它是一些放射性探测器测量射线的物理基础,也是射线引起物理、化学变化和生物学效应的主要机制之一。

电离的强弱常用射线在每厘米路程上产生的离子对数来度量,即电离密度(ionization density)或比电离(specific ionization)。带电

粒子的电荷量越大,运动速度就越慢,所经过的物质密度越大,比电离就越大,带电粒子的能量损失也就越多。

2. 激发 当核外轨道电子从入射的带电粒子所获得的能量比较小时,只能使低能级的轨道电子跃迁到高能级轨道上去,使整个原子处于能量较高的状态,这种现象称激发(excitation)。由于原子的内层轨道缺少电子,原子处于激发态是不稳定的,很容易自发跃迁回到基态,同时以光子或热能的形式释放出多余的能量。激发作用是射线引起物理、化学变化和生物学效应的机制之一,也是一些放射性探测器工作的物理基础。

3. 轫致辐射 高速带电粒子通过原子核电场时受到突然的阻滞,运动方向发生了大的偏移,将一部分动能转化为连续能谱的电磁辐射,这种辐射称轫致辐射(bremsstrahlung)。产生轫致辐射的能量与带电粒子的能量成正比,也与被作用物质的原子序数 Z 成正比,与带电粒子的质量平方成反比。临床常见的轫致辐射主要发生于 β^- 粒子与物质相互作用时(图 2-3)。

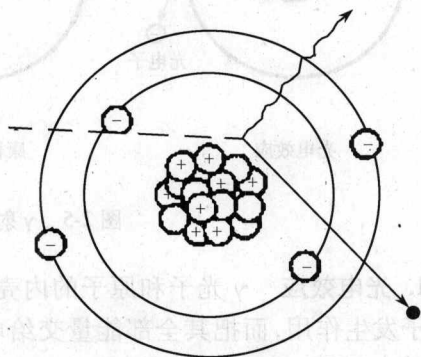


图 2-3 轫致辐射模式图

4. 散射 入射的带电粒子受到物质中原子核库仑电场的作用而改变运动方向、损失能量的过程称散射(scattering)。其中仅运动方向改变而能量不变者称弹性散射。 α 粒子的质量较大,其径迹基本上是直线进行的,散射不甚明显; β 粒子的质量较轻,其径迹是折线进行的,散射较为明显。散射作用对测量和防护都有意义。

5. 湮没辐射 β^+ 粒子的平均寿命仅有 10^{-9}s ,它与物质相互作用经历 $1 \sim 3\text{mm}$ 的距离。并完全耗尽其动能前,与物质中的自由电子相结合,正负两个电子的静止质量转化为方