

全国卫生专业技术资格考试专家委员会 编写

卫生专业技术资格考试指导

肿瘤放射治疗技术

编委会名单

(按章节顺序排列)

何少琴	柏 森	邱 杰	徐国镇	罗京伟
冯勤富	余子豪	李晔雄	吴令英	谭 力
何志纯	邓小武	张春光	祁振宇	黄劭敏
卢 杰	张红志	戴建荣	胡逸民	毛 凯
张长胜	陆惠忠	许 青	王连元	

山东大学出版社

出版说明

为贯彻国家人事部、卫生部《关于加强卫生专业技术职务评聘工作的通知》等相关文件的精神,自 2001 年全国卫生专业初、中级技术资格以考代评工作正式实施。通过考试取得的资格代表了相应级别技术职务要求的水平与能力,作为单位聘任相应技术职务的必要依据。

自 2005 年起,肿瘤放射治疗技术专业主管技师资格考试将单独进行。为了帮助广大考生做好考前复习工作,特组织国内有关专家、教授编写了《卫生专业技术资格考试指导》肿瘤放射治疗技术部分。本书是以相应技术资格评审条件为基本依据,根据考试大纲中的具体要求,参考国内外权威著作,将考试大纲中的各知识点与学科的系统性结合起来,以便于考生理解、记忆。

本书包括四部分:基础知识(总论、放射治疗物理学基础、放射治疗生物学基础);相关专业知识(头颈部肿瘤、胸部肿瘤、腹部肿瘤、妇科肿瘤);专业知识(放射治疗机及辅助设备、放射治疗过程、照射技术和射野设计、调强适形和立体定向放射治疗、放射治疗的质量保证);专业实践能力(放射治疗技师的工作职责及工作要求、常见肿瘤的照射摆位技术、常见肿瘤的模拟定位技术)。

目 录

肿瘤放射治疗技术主管技师资格考试指导	1
第一篇 基础知识部分	3
第一章 总论	3
第一节 放射治疗的历史、现状和发展方向	3
第二节 放射治疗技师在放疗中的地位	5
第三节 放射治疗技师应具备的基本技能	6
第二章 放射治疗物理学基础	9
第一节 核物理基础	9
第二节 电离辐射与物质的相互作用	12
第三节 电离辐射的物理剂量量度和剂量测量	16
第四节 X(γ)线射野剂量学	21
第五节 高能电子束	29
第六节 辐射防护	31
第三章 放射治疗生物学基础	35
第一节 放射生物在放射治疗中的意义	35
第二节 电离辐射对生物的作用	35
第三节 正常组织放射耐受量	37
第四节 改变放射效应的措施	40
第二篇 相关专业知识部分	42
第一章 头颈部肿瘤	42
第一节 概述	42
第二节 鼻咽癌	49
第三节 口腔癌	52
第四节 喉癌	54
第五节 鼻腔-鼻窦癌	55
第六节 脑瘤	58
第七节 垂体瘤	62
第八节 脑转移瘤	63
第二章 胸部肿瘤	65
第一节 食管癌	65
第二节 肺癌(原发性支气管肺癌)	68
第三节 胸腺肿瘤	71
第三章 腹部肿瘤	74
第一节 乳腺癌	74

第二节	恶性淋巴瘤	77
第三节	直肠癌	81
第四节	睾丸恶性肿瘤	83
第五节	前列腺癌	84
第四章	宫颈癌	87
第一节	概述	87
第二节	治疗原则	87
第三节	放射治疗	88
第三篇	专业知识部分	90
第一章	放射治疗机及辅助设备	90
第一节	放射源的物理性质	90
第二节	kV 级 X 线治疗机	94
第三节	远距离 ^{60}Co 治疗机	98
第四节	医用电子直线加速器	104
第五节	近距离治疗装置	108
第六节	模拟定位机和 CT 模拟机	115
第七节	治疗计划系统	119
第八节	射野挡块及组织补偿	123
第九节	治疗验证及其设备	127
第二章	放射治疗过程	131
第一节	临床剂量学原则	131
第二节	靶区定义和剂量描述方法	131
第三节	放射治疗过程	133
第三章	照射技术和照射野设计	139
第一节	放射源的合理选择	139
第二节	外照射技术的分类及其特点	140
第三节	高能电子束和 X(γ)射线照射野设计原理	141
第四节	相邻野设计	147
第五节	切线野技术	152
第四章	调强适形和立体定向放射治疗	155
第一节	适形放射治疗	155
第二节	X(γ)射线立体定向治疗	166
第五章	放射治疗的质量保证	176
第一节	放射治疗设备的性能精度	176
第二节	放疗计划的实施和核对	176
第四篇	专业实践能力	185
第一章	放射治疗技师的职责	185
第一节	放射治疗技术员的工作职责	185

第二节	放射治疗技术员的工作要求及质量	187
第三节	应急处理	192
第二章	常见肿瘤的模拟定位技术	197
第一节	胸部肿瘤模拟定位技术	197
第二节	腹部肿瘤模拟定位技术	202
第三节	头颈部肿瘤模拟定位技术	205
第四节	CT 模拟定位技术	207
第三章	常见肿瘤的照射摆位技术	210
第一节	治疗体位及体位固定技术	210
第二节	SSD 摆位技术	211
第三节	SAD 等中心照射技术	215
第四节	乳腺癌切线照射及相邻野照射	219
第五节	楔形板野照射技术	223
第六节	大面积不规则野照射技术	225
第七节	X(γ)线全身照射	230
第八节	电子线全身皮肤照射技术	232
肿瘤放射治疗技术主管技师资格考试精选习题解析		235
肿瘤放射治疗技术主管技师资格模拟试卷		247
模拟试卷(一)		249
答案		259
模拟试卷(二)		260
答案		271
肿瘤放射治疗技术主管技师资格考试大纲		273

肿瘤放射治疗技术
主管技师资格
考试指导

第一篇 基础知识部分

第一章 总 论

放射治疗是利用放射线治疗疾病的手段。由于主要用来治疗恶性肿瘤，因此现在都称之为“放射肿瘤学”（Radiation Oncology），它和外科肿瘤学、内科肿瘤学（化疗）一起仍然是治疗恶性肿瘤的三大主要手段。根据国内外统计，大约三分之二的肿瘤患者在病情的不同阶段，出于不同目的需要放射治疗，包括根治性放射治疗和姑息性放射治疗。

根治性放射治疗可以是单一放射治疗，也可以和手术（术前放疗、术后放疗和术中放疗）或化疗（诱导化疗——放射治疗开始前用；同期放化疗——化疗在放射治疗同时应用；辅助化疗——放射治疗结束后用）配合。通常，根治性放射治疗包括原发灶和相关的淋巴引流区，照射剂量比较高。姑息性放射治疗的目的是减轻因肿瘤引起的主要症状，改善患者的生活质量。通常在较短时间内给予低于根治性放射治疗的剂量，不追求肿瘤消退，同时也不会因放射治疗反应而增加患者痛苦。对肿瘤出血、止痛、缓解梗阻或阻塞以及预防病理性骨折发生等都很有效。

第一节 放射治疗的历史、现状和发展方向

一、放射治疗的历史

与医学其他学科相比，放射治疗历史比较短，只有 100 多年历史。1895 年伦琴发现了 X 线；1896 年居里夫人发现镭，不久就将放射线应用在临床治疗病人；1922 年出现深部 X 线机，治愈了 1 例喉癌患者，从此，深部 X 线治疗逐步增多，但 X 线的深度剂量低，皮肤反应大，只能治疗表浅肿瘤；上世纪 50 年代有了 ^{60}Co 远距离治疗机，由于深度剂量比深部 X 线明显提高，并具有皮肤减免作用等物理特性，在临床上能够治疗一些深部肿瘤，疗效也明显提高；从 60 年代出现的电子直线加速器至今，是临床应用最广的外照射治疗机。

近距离放射治疗多年来主要应用镭。配合外照射，在子宫颈癌、舌癌等多种部位肿瘤获得较好疗效。由于镭的防护要求很高，目前已不用于临床治疗。现在主要有 ^{192}Ir 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{125}I 、 ^{198}Au 、 ^{252}Cf 等放射源，并有计算机系统遥控近距离放射治疗机。

放射剂量学：上世纪 30 年代有物理剂量-伦琴（R），50 年代后有吸收剂量拉德（rad），之后又格雷（Gy，Gray）。 $1\text{Gy} = 100\text{cGy}$ ，相当于 100rad 。相应放射防护等也有 Sv 计量单位。就近距离放射治疗而言，早年放射剂量以镭毫克数乘以小时数进行换算。当应用其他放射源时，则也以克镭当量计算伦琴数。后来曼彻斯特系统和巴黎系统逐渐向伦琴单位转变。直到 80 年代发展了现代近距离放射治疗。

放射生物学：由于在放射治疗早期阶段不了解放射线的生物效应，尤其在缺乏相关物理年代，只用发生皮肤红斑反应作为剂量参考，由于临床实践经验的累积，1934 年 Coutard 发明的分割放射治疗方案，成为沿用至今的基本模式，也就是进行分割放射可以达到比单次放射好的疗效，同时放射反应也较轻。1956 年，细胞集落形成率的实验成功，以及对放射线引起细胞增殖死亡的概念，也沿用至今。 ^{60}Co 的应用及疗效的提高，能观察到长期存活患者的

后期放射损伤。临床上对剂量-分割-时间的关系也开始逐步有所了解。70年代 Ellis 提出 NSD 公式曾被应用于放射治疗方案的换算,但很快就被 L-Q 模式取代。L-Q 模式最大特点是区分了肿瘤早期反应正常组织和晚期反应正常组织。虽然它存在不少局限性,但一直沿用至今。

我国放射治疗历史可追溯到上世纪 30 年代,应用深部 X 线和镭治疗。直到解放初期也只有几家医院有放射治疗设备,专业人员总共仅十余人。以后,开展放射治疗的医院逐渐增多,尤其是 60 年代以来,放射治疗发展很快,除了在专科肿瘤医院外,不少综合性医院也相继建立放射治疗科(或在肿瘤科内),并且和国际上一样脱离了放射科成为独立的临床学科。1987 年成立了中华放射肿瘤学会,1992 年起发行中华放射肿瘤学杂志。根据中华放射肿瘤学会调查结果显示,1986 年全国有放射治疗医院 264 家,从事放射治疗专业人员 4679 人。电子直线加速器 71 台,⁶⁰钴治疗机 224 台。到 2001 年,全国开展放射治疗的医院有 715 家,从事放射治疗事业专业人员 14131 人,其中医生是 5113 人,技术员 3465 人,为 1986 年的 2.44 倍。电子直线加速器和 ⁶⁰钴治疗机的数量也分别增加到 542 台和 454 台。

二、放射治疗的现状

放射治疗的发展和放射治疗设备紧密相关。当前,发达国家都用电子直线加速器进行治疗,而国内不少医院仍在用 ⁶⁰钴治疗。现代电子直线加速器单机可以产生 2~3 种不同能量的光子线(X 线)和几种不同能量的电子线,适应了临床使用时的多种选择。而且相关辅助设备也迅速发展,例如模拟机,CT 模拟机,三维放射治疗计划系统等。它们之间不仅可以通过网络连接,更能与影像诊断系统(CT、MRI、PET 等)相连,大大提高了整体放射治疗水平。

当前,常规二维放射治疗进入了三维放射年代(3DRT),包括三维立体定向放射治疗(X 线,γ线)、调强放射治疗(IMRT),提供了进行精确定位、精确设计和精确治疗系列技术。这不但使照射的高剂量适合肿瘤靶区形状,而且可以更好地达到放射治疗总原则,即达到最大程度对肿瘤杀灭的同时,把对正常组织损伤降到最低,这样才可能提高放射治疗疗效,又减少后遗症,改善了患者生活质量,是当今最高形式的放射治疗手段。

调强放射治疗技术是一个系列过程,除了设备外,需要有掌握先进技术队伍,更需要有更严格质量控制和质量保证。当前国内外运用 IMRT 技术治疗的肿瘤有前列腺癌、头颈部癌(包括鼻咽癌)、乳腺癌、肺癌等。其中从前列腺癌和鼻咽癌的临床结果显示疗效有提高,而且正常组织损伤少。

虽然临床上大多数患者目前接受的还是二维常规放射治疗,但是整体治疗疗效都有提高,放射治疗作为肿瘤综合治疗的地位也较前有较大改变。早期乳腺癌作局部切除(保乳术)加术后根治放射治疗,可以取代根治手术,疗效好且减少了根治术引起心理和美容损害。软组织肿瘤以局部扩大切除加术后放射治疗(外放射+/-近距离放射治疗),取代截肢等创伤大的手术且疗效有提高。直肠癌术后加放射治疗,提高了局部控制率同时降低肝转移率。相反,霍奇金淋巴瘤、精原细胞瘤、白血病、神经母细胞瘤等,因有效的化学治疗的进展,放射治疗范围和放射剂量都较前减少,既提高了疗效又降低了治疗后的损伤。当然手术、放射治疗、化疗加中西医结合的综合手段在不同肿瘤治疗中的应用都在探索。

从放射生物学考虑,要注意治疗的肿瘤控制概率(TCP)和正常组织损伤发生的概率(NTCP)。虽然从 LQ 模式发展出不少有关公式,但还需临床证实。

三、放射治疗的未来

要提高肿瘤放射治疗的疗效,包括提高对肿瘤的疗效和减少对正常组织器官的损伤,简单概括可以从下列几个方面考虑:

(一) 放射物理方面

(1) 调强放射治疗: 除了放射治疗相关设备的发展外, 为了减少每次放射治疗实施时分割放射之间肿瘤靶区位置的移动, 使放射达到更精确, 由影像指导的调强放射治疗(IGRT)和呼吸门控系统等都是提高放射治疗精确性的方向。

(2) 高 LET 射线: 中子射线、重离子、轻离子, 以及质子(具有高 LET 射线物理特性, 而不具有高 LET 射线放射生物学特性), 可以改善乏氧肿瘤细胞周期依赖性等, 对一些放射敏感差的肿瘤可望提高疗效。但是这些设备价格十分昂贵。

(3) 近距离放射治疗: 计算机系统发展促进了近距离放射治疗质量的提高。由于作为外放射配合应用的手段, 对一些实体肿瘤还是很有效。放射源布置精确度的提高, 不同放射源的选择应用, 以及和加热治疗联合应用都有待继续探索。

(4) 加热治疗: 和放射治疗、化疗配合仍会有一定疗效。

(二) 放射生物方面

(1) 非常规分割放射: 虽然至今常规放射治疗仍是主要的, 以上皮癌为例, 每次分割剂量 1.8~2Gy, 一周照射 5 天, 总剂量 60~70Gy, 6~8 周内完成仍是有效的。但是对不同肿瘤改变疗程、分割剂量和总放射剂量仍是研究的重要方面。甚至应用调强放射治疗、三维立体定向放射等新技术, 仍脱离不了分割方案。因而, 结合肿瘤放射生物特性深入研究, 建立不同肿瘤的放射治疗分割方案会有很重要的临床意义。

(2) 放射增敏/保护剂: 增加放射线对肿瘤的生物效应, 不增加正常组织损伤是放射增敏的前提; 与之相反, 保护正常组织(即减少放射线对正常组织损伤)而不减少肿瘤组织生物效应为放射保护的原则。继续从实验研究找到临床上有使用价值的化学制剂或生物制剂是一个重要方面。

(三) 全身途径

(1) 化疗: 由于放射治疗是一种局部的治疗手段, 在不少肿瘤局部治疗获得控制但因远处播散而导致患者死亡。找寻有效的化疗药物将有助于降低远处播散, 加大放射治疗疗效。

(2) 基因、免疫、靶向治疗: 当今调强放射治疗技术已达到给予靶区内不同部位不同放射剂量, 肿瘤内对放射敏感性差的乏氧细胞, 增殖快的细胞群、生长比率大的细胞群是难以从当前影像学手段精确确定, 如果从广义的基础研究, 用针对上述细胞群的靶向治疗可能是有价值的。

要强调的是放射肿瘤学的发展离不开其他学科的发展, 对肿瘤本身生物学特性的掌握, 继而给予相应的治疗, 使达到最满意的疗效才是我们的目标。

第二节 放射治疗技师在放疗中的地位

放射肿瘤科是一个临床学科。通常临床科室主要由医师和护士组成, 而放射肿瘤科则由多种工种人员组成一个有机团队, 包括医师、技术员、放射物理师、护士、维修人员等。要对患者进行放射治疗是一个涉及多个环节的、相互紧密连接的过程, 各种技术人员则承担不同的任务。

放射治疗主要流程是: 放射肿瘤医师首先对患者进行全面检查, 作出诊断和临床分期后, 确定治疗目的(根治/姑息治疗; 单一放射治疗/与手术、化疗综合治疗等)。经模拟机和/或 CT 模拟机定位, 确定照射肿瘤靶区与剂量和相关正常组织和器官与剂量。由放射物理师进行放射治疗计划(TPS)优化, 包括放射源选择、射线种类和能量、放射野布置和剂量分配、放

射野整修等等。所选最佳放射治疗方案最终由放射肿瘤医师确认。然后，在模拟机和治疗机上摆位、摄验证片，在获得一个满意的结果后才可以开始进行放射治疗。

在整个放射治疗中，放射治疗技师不但是参与者，更是实施放射治疗执行者。在开始放射治疗前的一系列流程中，放射治疗技师参与了患者固定装置的制作、模拟定位全过程、制作光子射线和电子线的铅挡块、填充物，在模拟机和放射治疗上摆位和拍验证片等，一旦放射治疗开始后，每一次放射治疗都由放射治疗技师按医嘱执行，无论外放射还是近距离放射，安全、准确、无误地完成每一次治疗都影响到放射治疗质量的好坏，直接影响到患者的疗效。因此，我们说放射治疗技师在整个放射治疗过程中起着关键的作用，而不是简单的摆位、按按钮。不然放射治疗设备再先进，治疗计划再完善，放射治疗实施不好，质量不保证，放射治疗整体水平也不可能得到保证。

第三节 放射治疗技师应具备的基本技能

我国放射肿瘤事业的迅速发展，整体队伍不断扩大。放射治疗的设备数量增加与更新换代，参与的技术员也随之增多。据中华放射肿瘤学会四次调查的不完全显示：技术员总数在1986年仅有1410名，其中主管技师只占3%，而且80%为中专或高中文化程度，大专以上只占4%。2001年资料显示，技术员人数增加到3465名，为1986年的2.44倍，但主管技师仍占少数。但是由于大多数技术员还是由护士、放射诊断或其他专业的技术员改行而来，放射治疗技术员整体队伍杂乱不齐，层次不一的现象亟待改进以适应当前的需要。

一、职业道德

医务工作者应当有爱心和敬业精神，必须从革命的人道主义出发，加强社会主义精神文明建设，提高职业道德修养，提高医疗服务质量，全心全意为患者服务。而放射治疗工作者面对绝大多数肿瘤患者，治疗的手段又是放射线，因此要求我们对每一位患者更需有高度责任心和同情心，肿瘤患者不但承受疾病引起的肉体的痛苦，同时也承受很大的精神心理上的困扰，患者对得了肿瘤的恐惧和悲观，以及对放射治疗的不了解，包括对放射治疗的恐惧和可能带来反应的顾虑等等，不但会影响到患者战胜疾病的信心，也会影响治疗的顺利进行，还会影响到患者家属精神心理状态。放射治疗技术人员每天执行治疗任务，如果以常见上皮癌为例，常规放射治疗的疗程在6~8周，技术人员接触患者的时间甚至会多于主管的医师，他们常常是在第一线发现患者问题，及时与医师沟通的桥梁。

由于放射治疗技术人员工作的特殊性，除了严格遵守医院、科室的各项规章制度外，还要遵守国家和地方对放射工作者的各项规定和放射设备的操作规程。要坚持严肃和严谨的工作作风。放射治疗是使用放射线，它是看不见但又是杀伤力很强的医疗手段。在整个为患者治疗过程中都应当严肃对待，要高度负责，集中精力，专心致志，时刻想着自己的工作直接关系到患者的安危。当前所使用的各种放射治疗设备多数是有自动控制系统甚至计算机系统、网络系统，因而可能会发生完全依赖自动化而忽略了自己亲自观察、监控患者在机房内的情况，但是必须牢牢记住计算机系统也会出错。例如放射治疗时间（或跳数 Mu）没有按设定自动终止，操作的技术人员又未专心关注，甚至离开控制台，患者就会接受过多放射线照射，带来一系列问题，甚至发生死亡悲剧。当发生这种不正常现象时，如果操作人员有高度责任心，又熟悉其性能，就会及时发现治疗时间超出设定定位的不正常现象，通过手动操作终止治疗，以防患者接受超量照射。

技术员接到放射治疗医嘱后，要了解治疗目的，认真仔细阅看各项要求，包括患者体位、

照射野各有关条件、剂量以及特殊要求，如果有疑问，应当及时向主管医师反映，不得擅自改动。每次治疗后，认真填写治疗单并签名，在条件较好的科室，对定期拍验证片和其他质控检查都要很好地配合执行。由于工作和医师、放射物理师、检修人员等关系密切，一定要记住要有团队精神，各环节工作配合好，而且要团结协作，虚心学习，不要不懂装懂。如果工作中发现问题，应当及时和有关人员联系解决，不得擅自拆开有关设备部件，要严格遵守各相关操作规程。在放射治疗实施过程中，我们既面对患者，同时应用的都是十分昂贵的机器，我们对设备要爱护。放射治疗技术人员要有高度防护意识，包括遵守有关规定，佩戴防护监测胸牌，接受定期体格检查等。如发现异常情况，要从保护患者、保护设备和保护自己出发，掌握必须紧急处理方法，及时向上级领导汇报，共同解决。通常发现不正常情况是放射设备运转异常以及患者在机房内发生突发变化。

二、专业知识

放射治疗技术人员的工作是一门多学科的专门技术。国外发达国家都必须经放射治疗技师专科学校培养的毕业生才能担任放射治疗技术人员工作。文化程度相当于我国大专水平。由于历年来多种因素的影响，我国至今才开始有几所培养放射治疗技术员的专科学校，远远不能适应发展的需要，因此技术员的培养基本上依靠边工作边学习和师傅带徒弟的培养方式。要成为一名放射治疗技术员，基本的文化水平是高中毕业，包括数学、物理、化学和生物等科目，由护士或其他专业转行的也必须在这文化水平基础上，同时要热爱放射治疗专业，安心工作。此外必须掌握以下相关学科知识：

1. 肿瘤学 要了解常见肿瘤临床表现、诊断和鉴别诊断、病理类型、放射治疗适应症；哪些肿瘤对放射线敏感，哪些敏感性差；肿瘤生长和播散途径等，这样才能了解医师制定的放射治疗目的和要求；如何提高放射线对肿瘤的杀伤和减少正常组织器官放射损伤；以及治疗后疗效和常见并发症。当然对外科、化疗等治疗的应用也要有所了解。

2. 肿瘤解剖学 即与肿瘤相关的应用解剖、局部解剖。不论参与模拟定位、制作铅挡块、治疗计划优化，还是实施放射治疗，都要了解所要放射治疗肿瘤所在解剖部位和它周围相关正常器官，才能正确理解放射治疗计划，才知道正确摆位，保护重要器官（如脊髓、晶体、肾、喉等最为常见）。只有很好理解该患者放射治疗计划，才能正确执行实施放射治疗计划，完成患者的治疗。

3. 相关基础知识 包括放射物理学和放射生物学。我们每天都操作放射治疗机器或辅助设备，必须掌握所操作使用的机器基本结构和性能，明了放射线如何产生、与物质作用后产生的效应、如何根据患者的肿瘤情况选择使用不同种类与不同能量的射线、如何制作和优化出最佳放射治疗计划、如何达到肿瘤靶区最理想照射方式和剂量以及相关重要正常组织和器官最低照射、通过哪些放射治疗技术方法达到理想放射治疗效果。由于当前不少相关设备由较为复杂的计算机系统控制，不同设备之间业已网络化，因此计算机知识和外文也是不可缺少的。在放射生物学方面，必须了解不同放射线对人体组织的生物效应、为何利用放射线可以治疗肿瘤并能得到一定效果、放射治疗引起什么急性和后期反应、各重要组织器官对放射线耐受量是多少、如何从放射生物学概念提高放射线对肿瘤杀灭和保护正常组织减少放射损伤，以达到最终提高肿瘤放射治疗疗效同时又改善患者的生活质量。

4. 其他 放射治疗技术员工作是医护工作的一种专业性较强工作，必须了解和掌握一些医学心理学知识（包括患者及其家属和亲友和工作人员）和一般的护理知识，这样在临床工作中才能使患者在身心方面都达到治疗的最佳状态，鼓励和帮助患者克服治疗过程中的困难，完成治疗是每个医务人员的职责。

总之，放射治疗技术员发奋进取，精益求精，了解新动态，掌握新知识和新技术，用学到的知识和高度责任心为广大患者服务的精神，正确和熟练操作各种放射治疗设备，精心细致地执行医嘱，使患者得到最好的放射治疗效果，也最终使我们的放射肿瘤事业日趋提高和发展。

第二章 放射治疗物理学基础

第一节 核物理基础

一、原子结构

物质由分子和原子构成，分子由原子组成。目前已知的原子（也称元素）有 109 种。原子又有着它自己的结构。了解原子的结构对于我们认识放射线的产生及与物质的相互作用是十分必要的，因为这些过程都发生在原子的范围内。

原子由原子核和核外电子组成。原子核带正电，位于原子中心。核外电子带负电，围绕在原子核外。原子的直径约为 10^{-8}cm 。原子核的直径约为 10^{-12}cm ，但集中了几乎整个原子的质量。原子核由质子和中子组成。中子和质子统称为核子，它们的质量近似相等，为一个原子质量单位。质子带正电荷，中子不带电。电子质量约为 $1/1840$ 个原子质量单位，且带负电。一个原子内的正负电荷数量相等，故呈中性。原子可以用三个量按 ${}^A_Z\text{X}$ 符号表示。其中，X 为原子种类符号；Z 为原子序数，即核内质子数；A 为原子的质量数，即核内的质子数和中子数之总和。显然，核内中子数应等于 $A-Z$ 。另外，因原子呈中性，核外电子数应等于 Z。核外电子分布于不同的壳层。每壳层中电子数目遵从 $2n^2$ 规律，其中 n 为从内层到外层的壳层数，并习惯称为 K、L、M、N、O、……层。从内层起，每壳层中的电子数分别为 2、8、18、32、……

二、原子能级

原子根据核外电子所处的不同壳层状态而呈不同的能量级别，即不同壳层的电子有不同的结合能。结合能是核外电子在原子系统库仑场中所具有的势能。习惯上规定当电子与原子核相距无穷远时，这种势能为零，故原子核外壳层的电子势能为负，即该电子与原子核的结合能为负值，例如钨原子的 K 层电子结合能为 70keV。要想将某壳层的电子逐除原子外，至少必须克服该电子与原子核的结合能。例如使 K 层电子脱离原子核的束缚，原子需接受外界至少 70KkeV 的能量。内壳层电子脱离原子核的束缚而出现空穴，此时外层（更高能级）上的电子马上填补该内壳层上的空穴，并将多余的能量释放。释放的能量以光子的形式表现，称为特征辐射，因为这种辐射光子的波长是恒定的，为两电子轨道的能级差，这个能级差对特定的原子也是特定的，故该特征辐射应是单能的，不是连续能谱。如对某种原子，L 层电子填补入 K 层，则将释放能量为 70keV~53keV 的 γ 光子，相应于这种辐射称为 K 系特征辐射。同样存在 L 层电子脱离原子核的束缚，有 M、N、O 等层电子向它填补，所产生的辐射称 L 系特征辐射。余此类推。

三、核能级

原子核内核子（质子、中子）间的相互作用，使原子核通常保持在基态。如受外界能量的激发，原子核的能级状态将按一定的规律发生变化而处于激发态。当原子核由激发态返回基态时，便以释放 γ 光子的形式辐射能量，该光子的能量值等于跃迁能量值之差。跃迁回基态的过程可由一次跃迁完成，也可由多次跃迁来完成。

由于微观粒子能量很小，能量单位通常不是以国际单位制（SI）单位焦耳（J）表示，而是电子伏特（eV）或千电子伏特（keV）或兆电子伏特（MeV）。1 个电子伏特是一个电子在真空中通过 1 伏特电位差所获得的动能。这四个单位的转换关系是

$$1\text{eV}=1.0\times 10^{-3}\text{keV}=1.0\times 10^{-6}\text{MeV}=1.602192\times 10^{-19}\text{J}$$

四、电磁辐射

X 射线或 γ 射线和光波、无线电波、紫外线、红外线一样都是电磁辐射（电磁波），它们之间的区别仅是频率不同，即能量不同而已。

电磁辐射的能量与频率关系为：

$$E=h\nu \quad (2-1)$$

上式中，能量 E 的单位是焦耳（J）；频率 ν 的单位是（1/秒）； h 是普朗克常数， $h=6.626\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ 。

电磁辐射的频率 ν 和波长 λ 的关系为：

$$\lambda=c/\nu \quad (2-2)$$

上式中波长的单位是米（m），频率的单位是（1/秒）， c 为光速，其值为 $2.997924580\times 10^8\text{m/s}$ 。

上述关系式说明辐射的能量与频率成正比。因此我们经常说电磁辐射的频率越高，能量越大；波长越小，能量越大。

五、质能关系式

质量和能量都是物质的基本属性。质量和能量是可以相互转变的，即物体的质量发生变化时，其能量也发生相应改变，反之亦然。

质量和能量的关系是：

$$E=m\cdot c^2 \quad (2-3)$$

质量变化和能量相应的改变之间的关系是：

$$\Delta E=\Delta m\cdot c^2 \quad (2-4)$$

式中 E 为物体的能量，单位为焦耳， ΔE 为能量相应的改变； m 为物体的质量，单位为千克， Δm 为物体的质量变化； c 为光速。

例如，具有一定能量而无静止质量的光子，可以转换为具有一定质量的正负电子对。

爱因斯坦的相对论指出，运动物体的质量 m 随其运动速度 v 的变化而变化。当速度为零时，该物质的质量称为静止质量 m_0 。物体的质量随它的运动速度增大而增大。任何物体的运动速度不可能超过真空中的光速。

六、放射性核素及指数衰变规律

同位素是一类元素，这类元素有着相同的核电荷数（或电子数）和不同的质量数。实际上同位素主要是核内中子数不相同。同位素有稳定的和不稳定的两种。原子序数小于 82 的元素至少存在一种稳定核素，而原子序数大于 82 的元素都不稳定，会自发地放射出 α 粒子或自发衰变而成为铅（原子序数为 82）的稳定同位素。

不稳定核素自发地放射出射线，转变为另一种核素，这种现象称为放射性，这个过程称为放射性衰变，这些核素称为放射性核素。不稳定的同位素具有放射性。同位素的这种不稳定性主要是由原子核中的质子和中子不平衡性造成的。随着原子序数的增加，一种元素的同位素越来越多。元素周期表后面的重核不稳定，具有天然放射性。例如，钴⁵⁹₂₇Co 有 8 个同位素，分别是⁵⁴₂₇Co、⁵⁵₂₇Co、⁵⁶₂₇Co、⁵⁷₂₇Co、⁵⁸₂₇Co、⁶⁰₂₇Co、⁶¹₂₇Co 和⁶²₂₇Co，其中仅⁵⁹₂₇Co 是稳定的，其余都具有放射性。这些放射性的核素都要通过不同的方式衰变成稳定同位素。

衰变是放射性核素的一种属性。衰变必然伴随有放射。放射性核素衰变主要有三种方式：

α 衰变, β 衰变, γ 跃迁和内转换。

α 衰变是原子核自发地放射出 α 粒子 (氦的原子核) 的转变过程。重核易发生 α 衰变。

β 衰变是原子核自发地放射出电子或正电子 (带正电荷的电子) 或俘获一个轨道电子的转变过程。放射出电子称为 β^- 衰变, 放射出正电子称为 β^+ 衰变; 俘获轨道电子的称为轨道电子俘获。

处于激发态的原子核通过以放射 γ 射线的方式释放能量, 从而跃迁到较低的能态或基态, 该过程称为 γ 跃迁。若处于激发态的原子核将跃迁的能量直接转移给一个轨道电子并让其脱离该原子, 这种现象称为内转换, 发射出的电子称为内转换电子。

放射性核素衰变到稳定状态时往往需要多次衰变才能完成, 因此可能同时产生不同能量的 α 、 β 、 γ 射线。例如, ^{60}Co 放射源既产生 β 射线, 又产生两种不同能量的 γ 射线。

放射性衰变服从指数衰变规律:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-5)$$

式中 N_0 为衰变前的原子数; N 为衰变到 t 时刻的原子数; t 为由原子数 N_0 衰减到原子数 N 的时间; λ 为衰变常数, 每种放射性核素的每一个衰变过程都有自己独特的 λ 常数; e 是自然对数的底, 约等于 2.718。

放射性核素的原子核数目衰减到原来数目一半所需要的时间称为放射性核素的半衰期 ($T_{1/2}$)。半衰期与衰变常数 λ 的关系是:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda \quad (2-6)$$

半衰期的单位是秒, 也可用分钟、天、年等时间单位来表示。在经过 n 个半衰期后, 原子核数目衰减到初始值的 $(1/2)^n$ 。

放射性核素的平均寿命 τ 是指放射性原子核的平均生存时间。平均寿命与衰变常数的关系为:

$$\tau = 1 / \lambda = 1.44 T_{1/2} \quad (2-7)$$

放射性活度是一定量的放射性核素在一个很短的时间间隔内发生的核衰变数除以该时间间隔, 即:

$$A = -dN/dt = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2-8)$$

式中 A_0 和 A 分别是初始时刻和 t 时刻的放射源活度, λ 为衰变常数。

活度的国际单位是贝可勒尔, 简称贝可 (Bq), 衍生单位有 MBq、GBq 和 TBq。它们之间的关系是:

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

在此之前, 放射性活度的单位是居里 (Ci), 衍生单位有毫居里 (mCi)、微居里 (μCi)。它们的关系是:

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

居里与贝可的关系是:

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

例如有台钴治疗机装机时 ^{60}Co 放射源活度为 185TBq (5000 居里), ^{60}Co 放射源的半衰期为 5.27 年 (每月约衰减 1.1%), 一年后放射源活度还有:

$$185 \text{ TBq} \times e^{(-1 \times 0.693/5.27)} = 162.2 \text{ TBq} = 4384 \text{ Ci}$$

同样, 两年后放射源的活度还有 142.2TBq (3844 Ci), 3 年后放射源的活度还有 124.7TBq

(3370Ci)，5年后放射源的活度还有95.8TBq(2590Ci)。

钴放射源的平均寿命： $\tau = 1.44 \times 5.27 = 7.59$ (年)。

第二节 电离辐射与物质的相互作用

电离辐射与物质的相互作用，是研究辐射效应和进行剂量测量的物理基础。在与物质的相互作用中，带电粒子与不带电粒子有着显著的差别。

一、带电粒子与物质的相互作用

一般情况下，带电粒子与原子核和核外电子发生电磁作用，主要引起电离或激发、散射和各种形式的辐射损失，结果使入射带电粒子损失动能和改变运动方向。带电粒子穿过物质时，几乎与相遇的每个原子发生作用，作用次数十分频繁，但每次作用损失能量不多。所以从宏观上看带电粒子似乎是连续损失能量。

带电粒子与靶物质中的原子相互作用主要有四种：与核外电子发生非弹性碰撞、与原子核发生非弹性碰撞、与原子核发生弹性碰撞、与核外电子发生弹性碰撞。

(一) 带电粒子与核外电子发生非弹性碰撞

当带有正电荷或负电荷的粒子从靶物质原子近旁掠过时，入射粒子与核外电子之间的库仑作用，使电子受到吸引或排斥，从而使电子获得一部分能量。若获得的能量足够大，使电子可以摆脱原子核的束缚而脱离原子，成为自由电子，原子变成一个失去一个电子的原子——正离子，这个过程称为电离。这个自由电子称为次级电子或 σ 电子。若次级电子有足够的动能，可继续与其它原子发生作用。若该自由电子来自于内壳层，其逃逸后留下空穴，外层电子就要来填补(跃迁)，从而产生特征X射线或俄歇电子。

带电粒子与核外电子发生非弹性碰撞，导致原子的电离或激发，是带电粒子穿过物质时损失动能的主要方式。我们把这种方式引起的能量损失称为电离损失。

(二) 带电粒子与原子核发生非弹性碰撞

带电粒子靠近原子核时，它与原子核之间的库仑作用，引起非弹性碰撞，使入射粒子的速度和方向发生改变。此时带电粒子的一部分动能就变成具有连续能量的X射线辐射出来，这种辐射称为轫致辐射(连续X射线)，这种方式引起的入射带电粒子的能量损失称为辐射损失。

电子质量较小，与原子核发生非弹性碰撞后运动状态改变明显。因此， β 粒子与物质发生相互作用时，辐射损失是其重要的一种方式。

(三) 带电粒子与原子核发生弹性碰撞

当带电粒子与靶物质原子核库仑场发生相互作用时，尽管带电粒子的运动方向与运动速度发生了变化，但不辐射光子，也不激发原子核，满足动能和动量守恒定律，属于弹性碰撞，入射粒子产生弹性散射。对质量较小的入射粒子，碰撞后，绝大部分动能仍由被散射的入射粒子(也即散射粒子)带走，并可进行多次弹性碰撞。多次散射后，质量较小的入射粒子运动方向改变很大，故在物质中的运动径迹十分曲折。

(四) 带电粒子与核外电子发生弹性碰撞

同样，入射的带电粒子也会与核外电子发生弹性碰撞。但这种相互作用只在极低能量($< 100\text{eV}$)的 β 粒子入射时才会考虑。

事实上，带电粒子进入靶物质后，要与许多原子发生许多次碰撞。例如1MeV的带电粒子进入靶物质后，要发生 10^4 数量级的碰撞次数，带电粒子逐步慢化。如靶物质足够厚，带