



# 肿瘤放射物理学

## Radiation Oncology Physics

胡逸民 主编

胡逸民 张红志 戴建荣 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

肿瘤放射物理学/胡逸民等著. —北京:原子能出版社,1999.9  
ISBN 7-5022-2089-5

I. 肿… II. 胡… III. 肿瘤-放射医学:物理学 IV. R730.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 62112 号

肿瘤放射物理学

---

主 编:胡逸民  
责任编辑:田 宁 孟远辉

---

出版发行:原子能出版社  
经 销:新华书店  
印 刷:保定市印刷厂

---

开 本:787×1092 mm 1/16  
印 张:42.5  
字 数:1061 千字  
版 次:1999 年 9 月北京第 1 版 2003 年 8 月北京第 2 次印刷  
印 数:3101—4100  
定 价:98.00 元

---

謹以此書獻給  
我國跨世紀年輕的

放射物理師

放射腫瘤醫師

己卯年孟夏

胡逸民

## 内 容 简 介

本书共分十三章,详细论述了与肿瘤放射治疗有关的物理问题,从核物理基础到吸收剂量、射线质的测量原理;从X( $\gamma$ )射线、电子束、近距离治疗剂量学,质子重离子剂量学,到临床计划设计的基本原理;从多叶准直器(MLC)、CT模拟、三维治疗计划系统、射野影像系统(EPID),到调强适形放射治疗、X( $\gamma$ )射线立体定向放射治疗等最新技术进展;从剂量计算数学模型到正向优化和逆向计划设计;从分次放射治疗的生物学原理和时间剂量因子数学模型,到TCP(肿瘤控制概率)、NTCP(正常组织放射并发症概率)表述等生物效应与物理剂量分布(DVH)的转换;从QA(QC)到辐射防护等。全书充分体现和反映了本世纪末肿瘤放射物理学中出现的最新思维和最新概念。

本书既可作为放射物理师和中青年放射肿瘤医师的教科书和肿瘤放射治疗专业硕、博士研究生和指导教材,又可作为高年放射肿瘤医师和主任放疗技师的专业参考书。

本书按照医学考试中心制订的“全国医用加速器( $^{60}\text{Co}$ 治疗机)技术人员上岗考试大纲”的要求编写,被国家医学考试中心和中华医学会继续教育部指定为物理师(工程师)上岗培训专用教材。

## Summary

This book aims to provide the comprehensive theory and practice in the field of radiation oncology physics. It consists of 13 chapters covering the fundamentals of nuclear physics, interactions of ionizing radiation with matter, measurements of radiation—dosimetry and radiation quality, radiation sources, the radiation-field dosimetry of X( $\gamma$ )-rays and electron beams, dosimetry of brachytherapy and proton therapy, the principle and practice of radiation treatment planning, and quality assurance (QA) and quality control (QC) in radiation therapy and radiation protection. The significant advances in radiation physics and new concepts appearing in radiation oncology in recent years receive thorough consideration in this book, as do such topics as the MLC technique, CT-simulation, 3D radiation treatment planning system, electronic portal imaging device (EPID), intensity-modulated conformal radiation therapy, X( $\gamma$ )-ray stereotactic radiotherapy, dose calculation algorithms, the time-dose-fractionation models, and the models of converting 3D dose to biological outcomes; tumor-control-probability (TCP) and normal-tissue-complication-probability (NTCP). The scope of this book and the expertise of the authors make the book an essential reading for interested radiation physicists, radiation oncologists, and radiation dosimetrists and for the postgraduated students studying for the Master's or Doctor's degrees in radiation physics and radiation oncology.

# 序

肿瘤放射物理是放射肿瘤学的重要基础。一个世纪以来,放射治疗的发展及其疗效的提高,大多以物理技术的改进和发展为先导。放射物理师不仅发挥了积极的原动力的作用,而且能及时将现代物理学、影像学、计算机科学等的最新成果应用于肿瘤患者的放射治疗,充分发挥了技术桥梁的作用。《肿瘤放射物理学》一书不仅充分反映了一百年来放射治疗技术的发展进程,也充分体现了最近十年肿瘤放射治疗物理学中出现的最新思维和最新概念。

最佳的肿瘤放射治疗,决定于由放射肿瘤医师、放射物理师、放射治疗技师等组成的队伍的协同努力和该队伍成员的技术素质。《肿瘤放射物理学》详细论述了肿瘤放射治疗的物理和生物学基础,治疗计划设计与执行的过程、放射治疗技术及进展、放射治疗的质量保证和质量控制等内容,既强调基础知识的完整,又展示了上述几方面的最新进展。它不仅是放射物理师的专业教材,也是放射肿瘤医师和资深放疗技师必读的参考书。此书的出版,必将进一步推动和促进我国放射肿瘤学的发展,使放射物理师、放射肿瘤医师以更更新的面貌跨入新世纪、迎接中国放射肿瘤学新时代的到来。

肖锐之

一九九九年五月十八日

## 前 言

肿瘤放射物理学是医学物理学的一个重要分支,是放射肿瘤学的重要基础,它将放射物理的基本原理和概念应用于肿瘤的放射治疗。1985年伦琴发现X射线以来的一百多年来,放射肿瘤学取得的成就紧密系于肿瘤放射物理学的进展。作为肿瘤放射物理学的重要进展,钴-60治疗机和高能医用加速器的相继建立与普及,标志着放射肿瘤学步入成熟的时代,成为治疗肿瘤的三大手段之一。60年代初提出的、经过30多年精心哺育发展起来的三维适形放射治疗技术,正在或即将成为跨世纪的放射肿瘤学的临床实践。它不仅能使肿瘤得到最大控制和治愈,延长肿瘤患者的寿命,而且使肿瘤患者愈后有一个健康的高质量的生存。因此,作为肿瘤放射物理学又一重要进展的三维适形放射治疗,必将促使放射肿瘤学的面貌发生革命性的变化。《肿瘤放射物理学》正是为适应这种形势的发展而编写的,它集中了笔者几十年来的工作经验,特别是近十年来的工作成果,充分体现和反映了肿瘤放射物理学中的最新思维和最新概念。

全书共分十三章,详细论述肿瘤放射治疗中的各种物理问题,侧重点放在物理原理应用于临床实践。前三章介绍核物理的基础知识,电离辐射与物质的相互作用,电离辐射吸收剂量的测量原理。此三章构成本书的物理基础。第四章介绍放疗用的放射源和放射治疗机的物理特性,多叶准直器和质子剂量学等前沿技术。第五、六章介绍X( $\gamma$ )射线、电子束的射野剂量学特性,就射野剂量学中的一些基本物理概念,如原散射线、准直器和体模散射因子、不规则射野和特殊照射技术的剂量计算、偏轴射野和多叶准直器射野的剂量计算、电子束旋转照射、组织不均匀性对剂量分布的影响等,进行了精辟的论述。第七章论述近距离治疗中影响剂量分布的物理和几何因素、源周围剂量分布的特点、放射源的校准、后装放射源的定位技术、腔内组织间布源规则以及治疗方案的优化等。第五、六、七章构成了内、外照射临床应用的物理基础,是本书的重点。第八章论述了治疗计划设计的物理原理和生物学基础,包括计划设计中应考虑的临床和生物学因素、靶区及靶区剂量规定、射野设计原理、时间剂量因子、肿瘤控制概率(TCP)和正常组织并发症概率(NTCP)等。第九章在简述治疗计划设计与执行的基本过程和步骤的基础上,详细介绍了治疗体位和体位固定技术;模拟定位机和CT模拟;三维计划系统的特点及功能、图像登记方式、射野设计工具(如BEV,REV)、计划评估工具(如DVH);射



野影像系统;以及射野挡块及组织补偿技术等。第十章系统地介绍了X( $\gamma$ )射线、高能电子束的剂量计算物理模型,以及治疗方案优化(即逆向设计)的算法,论述了物理目标函数和生物目标函数。第十一章详细地叙述了调强适形放疗的定义、临床价值、对设备的要求和调强放疗的实现方式,以及X( $\gamma$ )射线立体定向放疗的原理、方法及其与调强适形放疗的关系等。上述四章是本书的精华,为读者展示了本世纪末的最后十年,放射肿瘤学界中已发生的革命性变化,应是我国年轻的放射物理师、放射肿瘤医师和高年放疗技师必须攻读的内容,其中部分内容也应成为放射生物学家工作台面上的参考资料。第十章的内容专为资深放射物理师和肿瘤放射治疗学专业的硕士、博士研究生撰写,希望他们在研读本书其他章节的基础上,仔细钻研本章内容,进一步拓宽自己的视野。第十二章在分析了放射治疗计划设计和执行过程中的误差来源及其对剂量准确性的影响后,介绍了开展质量保证(质量控制)的物理和技术措施。第十三章介绍了辐射防护的基本原则和标准、外照射的防护措施和防护建筑的设计方法,可供医院物理师、工程师和建筑部门设计施工时参考。

本书第一章、第二章、第五章第九节、第九章第五节由戴建荣博士执笔,第三章、第五章第十二节、第六章、第七章、第十三章由张红志研究员执笔,第七章第六节由王连元主任技师执笔,其余章节由胡逸民研究员撰写。全书由胡逸民研究员统稿。

本书按照国家医学考试中心制订的《全国医用加速器(钴-60治疗机)物理人员上岗考试大纲》的要求编写,被中华医学会继续教育部指定为全国放射物理师、工程师上岗培训的教材;也可作为我国医学物理系(科)的专业教科书和攻读肿瘤放射治疗硕士、博士学位的研究生的指导教材;亦可作为放射肿瘤医师和高年放疗技师的专业参考书。本书是《肿瘤放射治疗学》和《肿瘤放射治疗技术》的姊妹著作。

尽管笔者想极力避免陷入“井蛙观天”之尴尬,但因受笔者的学术水平、思维方式、手边参考资料的可得程度的限制,又因时间的仓促,难免出现“一孔之见”,希望同行们指正。同时借此书出版发行之际,对书中引用的观点、概念以及文字插图的原作者表示深切感谢。

本书的出版,要感谢美国CMS公司、美国皮克(Picker)国际公司、西门子(Siemens)中国有限公司、深圳柯瑞特(CREAT)电子技术公司、美国瓦里安(Varian)公司、美国医疗国际集团(APMG)、瑞典医科达(Elektu)公司提供了赞助,感谢国家医学考试中心和中华医学会继续教育部指定此书为全国放射物理师、工程

师上岗教训的教材,感谢张春利、章众等同志做了大量的绘图、打字及整理工作,感谢沈瑜教授、在读博士研究生杨勇、硕士研究生季明烁对书稿提出了宝贵意见,感谢中国医学科学院肿瘤医院放射治疗科的领导及同道对本书编写的关怀,感谢此书编著者的家属们在过去一年中给予了精神和生活上的支持。

胡逸民

1999年5月18日于北京

## 目 录

## 前 言

<b>第一章 核物理基础</b> .....	(1)
<b>第一节 基本概念</b> .....	(1)
一、原子结构 .....	(1)
二、原子、原子核能级 .....	(2)
三、原子、原子核的质量 .....	(3)
四、质量和能量的关系 .....	(4)
五、单位体积(单位质量)物质中的原子数、电子数 .....	(4)
六、基本粒子的种类和物理特性 .....	(5)
<b>第二节 放射性</b> .....	(6)
一、原子核的稳定性 .....	(6)
二、衰变类型 .....	(7)
三、放射性度量 .....	(10)
四、递次衰变和放射平衡 .....	(12)
五、人工放射性核素 .....	(13)
<b>第二章 电离辐射与物质的相互作用</b> .....	(15)
<b>第一节 带电粒子与物质的相互作用</b> .....	(15)
一、带电粒子与物质相互作用的主要方式 .....	(15)
二、总质量阻止本领 .....	(18)
三、质量角散射本领 .....	(19)
四、射程 .....	(19)
五、比电离 .....	(20)
六、传能线密度 .....	(20)
<b>第二节 X(<math>\gamma</math>)射线与物质的相互作用</b> .....	(21)
一、光子与物质相互作用系数 .....	(22)
二、光电效应 .....	(25)
三、康普顿效应 .....	(27)
四、电子对效应 .....	(30)
五、光子与物质的其他相互作用过程 .....	(32)
六、各种相互作用的总系数和相对重要性 .....	(33)

七、粒子输运和蒙特卡罗方法 .....	( 36 )
<b>第三章 电离辐射吸收剂量的测量 .....</b>	<b>( 38 )</b>
<b>第一节 剂量学中的辐射量及其单位 .....</b>	<b>( 39 )</b>
一、粒子注量 .....	( 39 )
二、能量注量 .....	( 39 )
三、照射量 .....	( 40 )
四、吸收剂量 .....	( 40 )
五、比释动能 .....	( 41 )
六、当量剂量 .....	( 41 )
七、照射量、吸收剂量、比释动能的关联和区别 .....	( 42 )
<b>第二节 电离室测量吸收剂量原理 .....</b>	<b>( 45 )</b>
一、电离室的工作机制 .....	( 45 )
二、电离室的工作特性 .....	( 48 )
三、电离室测量吸收剂量的原理 .....	( 52 )
<b>第三节 电离辐射质的确定 .....</b>	<b>( 54 )</b>
一、X( $\gamma$ )射线质的确定 .....	( 55 )
二、高能电子束射线质的确定 .....	( 59 )
<b>第四节 吸收剂量的校准 .....</b>	<b>( 63 )</b>
一、吸收剂量测量用电离室、模体、几何条件的技术要求 .....	( 63 )
二、中低能 X 射线吸收剂量校准 .....	( 67 )
三、高能电离辐射吸收剂量校准 .....	( 71 )
<b>第五节 平行板电离室 .....</b>	<b>( 79 )</b>
一、平行板电离室的几何结构和物理特性 .....	( 80 )
二、平行板电离室校准高能电子束的吸收剂量 .....	( 81 )
<b>第六节 吸收剂量的其他测量方法 .....</b>	<b>( 86 )</b>
一、量热法 .....	( 86 )
二、化学剂量计法 .....	( 87 )
三、热释光剂量计 .....	( 88 )
四、胶片剂量仪 .....	( 89 )
五、半导体剂量仪 .....	( 93 )
<b>第四章 放射源和放射治疗机 .....</b>	<b>( 99 )</b>
<b>第一节 放射源的种类及照射方式 .....</b>	<b>( 99 )</b>
<b>第二节 近距离治疗用放射性同位素源 .....</b>	<b>( 99 )</b>
一、镭-226 源 .....	( 99 )
二、铯-137 源 .....	( 100 )

三、钴-60 源 .....	(100)
四、铯-137 源 .....	(101)
五、碘-125 源 .....	(102)
六、新型近距离治疗用放射源 .....	(102)
七、近距离治疗用放射源的比较 .....	(104)
八、镭-90 同位素 $\beta$ 源 .....	(104)
九、铷-252 中子源 .....	(104)
第三节 X 射线治疗机 .....	(106)
一、X 射线的产生及其能谱 .....	(106)
二、X 射线质的改进——滤过板的作用 .....	(107)
三、X 射线机的一般构造 .....	(107)
第四节 钴-60 治疗机 .....	(108)
一、钴-60 $\gamma$ 射线的特点 .....	(108)
二、钴-60 治疗机的一般结构 .....	(109)
三、钴-60 半影 .....	(111)
四、钴-60 源更换 .....	(112)
第五节 医用电子加速器 .....	(113)
一、历史回顾 .....	(113)
二、电子感应加速器 .....	(114)
三、电子直线加速器 .....	(116)
四、电子回旋加速器 .....	(121)
第六节 多叶准直器 .....	(123)
一、多叶准直器基本结构和剂量学考虑 .....	(123)
二、多叶准直器的安装位置 .....	(126)
三、多叶准直器叶片的控制 .....	(127)
四、多叶准直器控制文件的生成 .....	(129)
五、多叶准直器的验收和质量保证与质量控制 .....	(130)
六、多叶准直器叶片的设置 .....	(131)
第七节 重粒子治疗 .....	(133)
一、概况 .....	(133)
二、快中子治疗 .....	(135)
三、 $\pi$ 介子治疗 .....	(136)
四、质子治疗 .....	(136)
五、放射治疗用重离子 .....	(144)
<b>第五章 X(<math>\gamma</math>)射线射野剂量学 .....</b>	<b>(149)</b>
第一节 人体模型 .....	(149)

## 4 目 录

一、组织替代材料 .....	(149)
二、组织替代材料间的转换 .....	(150)
三、模体 .....	(151)
四、剂量准确性要求 .....	(152)
第二节 百分深度剂量分布 .....	(152)
一、照射野及有关名词定义 .....	(152)
二、百分深度剂量 .....	(153)
第三节 组织空气比 .....	(159)
一、组织空气比定义及影响因素 .....	(159)
二、反散因子 .....	(160)
三、组织空气比与百分深度剂量的关系 .....	(161)
四、不同源皮距百分深度剂量的计算——组织空气比法 .....	(162)
五、旋转治疗剂量计算 .....	(163)
六、散射空气比 .....	(164)
第四节 组织最大剂量比 .....	(165)
一、原射线和散射线 .....	(165)
二、射野输出因子和模体散射因子 .....	(165)
三、组织模体比和组织最大剂量比 .....	(170)
四、散射最大剂量比 .....	(171)
第五节 等剂量分布与射野离轴比 .....	(171)
一、等剂量分布 .....	(171)
二、加速器 X 射线束射线质变化规律 .....	(174)
三、射野离轴比 .....	(174)
第六节 处方剂量计算 .....	(178)
一、处方剂量 .....	(178)
二、加速器剂量计算 .....	(178)
三、钴-60 剂量计算 .....	(179)
四、离轴点剂量计算——Day 氏法 .....	(180)
第七节 不规则射野 .....	(182)
第八节 楔形照射野 .....	(187)
一、楔形野等剂量分布与楔形角 .....	(187)
二、楔形因子 .....	(189)
三、一楔合成 .....	(190)
四、楔形板临床应用方式及其计算公式 .....	(192)
五、动态楔形野 .....	(193)
第九节 不对称射野和多叶准直器射野处方剂量计算 .....	(194)
一、不对称射野 .....	(194)

二、加速器 X 射线束原射线剂量的离轴变化 .....	(195)
三、不对称射野处方剂量计算 .....	(195)
四、多叶准直器射野处方剂量计算 .....	(198)
第十节 人体曲面和组织不均匀性的修正 .....	(205)
一、均匀模体和人体之间的差别 .....	(205)
二、人体曲面的校正 .....	(205)
三、不均匀组织对剂量分布影响的校正方法 .....	(206)
四、组织补偿 .....	(211)
第十一节 乳腺切线照射剂量计算 .....	(213)
一、楔形板补偿 .....	(213)
二、靶区剂量给定点的选取 .....	(214)
三、源皮距的影响 .....	(216)
四、腋、锁淋巴结的剂量问题 .....	(216)
五、小结 .....	(217)
第十二节 X( $\gamma$ )射线全身照射剂量学 .....	(217)
一、基本治疗模式 .....	(217)
二、基本剂量学 .....	(218)
三、患者剂量学 .....	(222)
<b>第六章 高能电子束射野剂量学 .....</b>	<b>(229)</b>
第一节 治疗电子束的产生 .....	(229)
第二节 电子束射野剂量学 .....	(233)
一、中心轴百分深度剂量曲线 .....	(233)
二、电子束的等剂量分布 .....	(237)
三、电子束射野均匀性及半影 .....	(238)
四、电子束的“虚源”及有效源皮距 .....	(239)
五、电子束的输出剂量 .....	(240)
第三节 电子束治疗的计划设计 .....	(241)
一、能量和照射野的选择 .....	(242)
二、电子束的斜入射校正 .....	(242)
三、组织不均匀性校正 .....	(243)
四、电子束的补偿技术 .....	(248)
五、电子束照射野的衔接技术 .....	(249)
六、电子束照射野的挡铅技术 .....	(250)
第四节 电子束旋转照射剂量学 .....	(255)
一、电子束旋转照射的实现方法 .....	(255)
二、电子束旋转照射的剂量学特点 .....	(257)

三、电子束旋转照射的剂量计算与校准 .....	(261)
四、电子束旋转照射计划设计 .....	(263)
第五节 电子束全身皮肤照射 .....	(268)
一、照射技术 .....	(268)
二、剂量学参数 .....	(271)
第六节 术中照射剂量学 .....	(274)
<b>第七章 近距离照射剂量学 .....</b>	<b>(279)</b>
第一节 近距离照射剂量学基本特点 .....	(279)
一、平方反比定律 .....	(279)
二、剂量率效应 .....	(280)
第二节 放射源的校准 .....	(283)
一、放射源强度的表示方法 .....	(283)
二、放射源的校准 .....	(285)
第三节 放射源周围的剂量分布 .....	(287)
一、放射源周围剂量分布的特点 .....	(287)
二、放射源周围剂量分布计算的传统方法 .....	(288)
三、放射源周围剂量分布计算的推荐方法 .....	(290)
第四节 放射源的定位技术 .....	(293)
一、正交技术 .....	(293)
二、立体-平移技术 .....	(295)
三、立体变角技术 .....	(295)
四、放射源定位技术的误差分析 .....	(295)
第五节 腔内照射剂量学 .....	(296)
一、腔内照射的经典方法 .....	(296)
二、腔内照射的 ICRU 方法 .....	(298)
第六节 组织间照射剂量学 .....	(303)
一、组织间照射的术语和概念 .....	(303)
二、剂量学系统 .....	(308)
第七节 管内照射剂量学 .....	(314)
第八节 近距离照射的剂量优化 .....	(316)
一、相对于施源器的剂量优化 .....	(317)
二、立体定向插植照射的剂量优化 .....	(321)
<b>第八章 治疗计划设计的物理原理和生物学基础 .....</b>	<b>(328)</b>
第一节 计划设计中的临床和生物学因素 .....	(328)
一、临床要求 .....	(328)



二、临床和生物学因素 .....	(329)
第二节 临床剂量学原则及靶区剂量规定 .....	(333)
一、临床剂量学原则 .....	(333)
二、放射源的合理选择 .....	(333)
三、外照射靶区剂量分布的规定 .....	(337)
第三节 照射技术和射野设计原理 .....	(341)
一、体外照射技术的分类 .....	(341)
二、高能电子束和 X( $\gamma$ )射线射野设计原理 .....	(342)
三、相邻野设计 .....	(351)
四、不对称射野 .....	(361)
五、鼻咽癌布野技术 .....	(362)
第四节 时间剂量因子 .....	(367)
一、分次放射治疗的生物学基础 .....	(367)
二、时间剂量因子数学模型 .....	(375)
第五节 肿瘤控制概率和正常组织并发症概率——三维物理剂量分布 对生物效应的转换 .....	(391)
一、基本概念 .....	(392)
二、肿瘤控制概率及其影响因素 .....	(393)
三、正常组织并发症概率 .....	(395)
四、无并发症的肿瘤控制概率与最佳靶区剂量 .....	(403)
五、小结 .....	(404)
<b>第九章 治疗计划的设计与执行 .....</b>	<b>(408)</b>
第一节 治疗计划的设计步骤 .....	(408)
一、体模阶段 .....	(410)
二、治疗计划的设计 .....	(414)
三、治疗计划的确认 .....	(419)
四、治疗计划的执行 .....	(419)
第二节 治疗体位及体位固定技术 .....	(421)
一、治疗体位的选择 .....	(421)
二、体位固定技术 .....	(423)
三、体位参考标记 .....	(425)
第三节 模拟定位机和 CT 模拟机 .....	(427)
一、模拟定位机 .....	(427)
二、模拟定位机的功能 .....	(429)
三、模拟机 CT .....	(431)
四、CT 模拟 .....	(431)