

TomoTherapy

肿瘤断层放射治疗

马林 王连元 周桂霞 主编

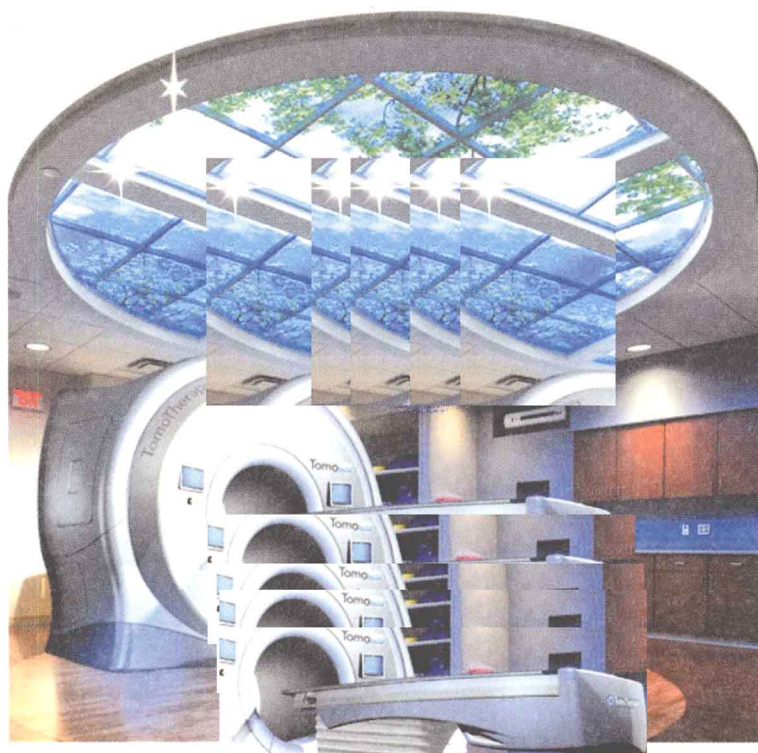


四川出版集团·四川科学技术出版社

TomoTherapy

肿瘤断层放射治疗

马林 王连元 周桂霞 主编



四川出版集团·四川科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

TomoTherapy 肿瘤断层放射治疗/马林, 王连元, 周桂霞主编. - 成都: 四川科学技术出版社, 2010. 9

ISBN 978 - 7 - 5364 - 7084 - 2

I. ①T… II. ①马…②王…③周… III. ①肿瘤 - 放射治疗学 IV. ①R730.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 184923 号

TomoTherapy 肿瘤断层放射治疗

主 编 马 林 王连元 周桂霞
责任编辑 李 红
封面设计 圣立文化
责任出版 邓一羽
出版发行 四川出版集团·四川科学技术出版社
成都市三洞桥路 12 号 邮政编码 610031
成品尺寸 185mm × 260mm
印张 19.5 字数 400 千
印 刷 四川西南建筑印务有限公司
版 次 2010 年 9 月第一版
印 次 2010 年 9 月第一次印刷
定 价 100.00 元
ISBN 978 - 7 - 5364 - 7084 - 2

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书, 请与本社邮购组联系。

地址/成都市三洞桥路 12 号 电话/(028) 87734035

邮政编码/610031 网址: www. sckjs. com

编委名单

主 编：马 林¹ 王连元¹ 周桂霞¹

副主编：冯林春¹ 张 楠¹ 徐寿平¹

主编助理：张 岳¹²

编 委：(按姓氏笔画排序)

邓小武 ¹⁰	王晓萍 ⁶	王运来 ¹	卢卫国 ¹⁸ (Weiguo Lu)
卢泰祥 ¹⁰	史斌斌 ¹²	史 捷 ¹³ (Jie Shi)	刘 安 ¹⁶ (An Liu)
曲宝林 ¹	陈卫彬 ¹	杜浩雷 ¹²	杜 镭 ¹ 李荣清 ⁹
李晓川 ¹⁵ (Allen Li)		李世俊 ¹	李 玉 ⁵ 邱 杰 ⁸
张 岳 ¹²	张建英 ⁷	张福泉 ⁸	严 勇 ¹ 杨 艳 ¹
杨经中 ¹⁷ (Jack Yang)		郎锦义 ¹¹	孟玲玲 ¹ 郑明民 ³
段继梅 ⁹	侯友贤 ²	徐建康 ¹²	夏廷毅 ⁴ 阎 英 ⁵
韩春晖 ¹⁶ (Chunhui Han)		曾昭冲 ⁷	解传滨 ¹ 蔡博宁 ¹
戴相昆 ¹	鞠忠建 ¹		
Mingli Chen ¹⁸	Yu Chen ¹⁸	Quan Chen ¹⁸	
Peter Hoban ¹⁸	Kristofer Kainz ¹⁵		
Thomas Rockwell Mackie ^{14,18}	(托马斯·洛克·麦肯)		
Gustavo Hugo Olivera ^{14,18}	Guang Fang ¹⁸	Donald Parnell ¹⁸	
Sharon Qi ¹⁵	Sang Sim ¹⁷	Mitchell Weiss ¹⁷	

- | | |
|--|--|
| <p>1 中国人民解放军总医院</p> <p>3 中国人民解放军北京军区总医院</p> <p>5 中国人民解放军沈阳军区总医院</p> <p>7 上海复旦大学附属中山医院</p> <p>9 昆明医学院第一附属医院</p> <p>11 四川省肿瘤医院</p> <p>13 Sun Nuclear Corporation
425 - A Pineda Court
Melbourne, FL 32940 USA</p> <p>15 Department of Radiation Oncology
Medical College of Wisconsin
Milwaukee Wisconsin USA</p> <p>17 Department of Radiation Oncology
Monmouth Medical Center
300 second avenue
Long Branch, NJ 07740 USA</p> | <p>2 中国人民解放军广州军区总医院</p> <p>4 中国人民解放军空军总医院</p> <p>6 中国人民解放军八一医院</p> <p>8 北京协和医院</p> <p>10 广州中山大学附属肿瘤医院</p> <p>12 恒欣科技公司 (TomoKnife Company Ltd)</p> <p>14 Department of Medical Physics
University of Wisconsin
Madison WI, USA</p> <p>16 Department of Radiation Oncology
City of Hope National Medical Center
Duarte CA USA</p> <p>18 TomoTherapy Incorporate
1240 Deming Way
Madison, WI 53717 USA</p> |
|--|--|

序 一

当我被邀请为《TomoTherapy—肿瘤断层放射治疗》一书写序时，感到特别高兴。这是世界上第一部正式出版的关于 TomoTherapy 的专著，并且以中文形式在中国首发也非常适宜。中国正在重塑自己而成为世界上最重要的国家之一。在过去的十年中，中国培养出的工程师在世界上最多，经济发展一直保持着世界上最高的增长率，并且正在以一种无人可挡的气势阔步迈向现代化。中国没有理由不在各领域成为第一，于是世界上第一本关于 TomoTherapy 的专著在中国出版发行就是非常自然的事情。

TomoTherapy 是能够对 X 射线进行高度调制的放射治疗系统，最初设计成螺旋断层治疗的工作方式，而现在进一步开发出拓扑治疗（Topotherapy）模式，也称为断层径照（TomoDirect），能够实施快速及高质量的三维（3D）适形治疗。它与其他放疗系统的一个主要区别就是：即便是形状非常复杂的靶区，TomoTherapy 也能够对其产生非常均匀的剂量，同时保护邻近的正常组织。因此中国著名的医院，比如中国人民解放军总医院、上海中山医院、北京协和医院等都选择了 TomoTherapy。相信在不久的将来，还会有更多的一流医院采用这项放疗技术。

本书的出版不仅扩大了 TomoTherapy 在中国的影响，更主要的是为对这项技术感兴趣的专业医生提供了全面的参考资料和经验总结，内容包含了计划设计、质控保证以及验证到临床应用。我非常欣喜地看到其中包括了全骨髓照射（TMI）治疗技术的详细介绍。我本人深信将来有一天，TMI 会成为绝大多数骨髓移植患者的预处理治疗方式。

本书不仅对使用 TomoTherapy 系统的医院工作人员具有参考价值，也对接受 TomoTherapy 治疗的患者有帮助。我对本书的所有编委和编辑们表示深深的敬意，因为他们充满了对患者的关爱，并且坚信 TomoTherapy 能够帮助他们更好地抗击肿瘤。

托马斯·洛克·麦肯 博士
TomoTherapy 主要发明人
TomoTherapy Inc 董事会主席

Foreword

I am overjoyed to have been asked to write the foreword to TomoTherapy. This is the first volume published anywhere completely devoted to TomoTherapy and it is fitting that it should be published in China. China is reestablishing itself as one of the most important countries in the world. China produces the most engineers in the world, has the highest growth rate of any country in the last decade, and is modernizing at a furious pace. There is no reason that China should settle for second best. It is very natural the first book of TomoTherapy appeared in China.

TomoTherapy is the delivery of highly intensity modulated radiation therapy. It was first developed to deliver helical TomoTherapy but now topotherapy, also called TomoDirect, can also be used to provide the most conformal and quick treatments. Like no other radiation therapy treatment, TomoTherapy can deliver a homogeneous dose of radiation to even complex – shaped tumors and spare as much as possible neighboring normal tissues. The most prestigious hospitals in China such as PLA General Hospital, Shanghai Zhongshan, Peking Union now all have TomoTherapy and it will not be too long before other leading cancer centers have adopted it.

This volume is much more than a marketing tool for TomoTherapy in China. It is a reference work for treatment planning, delivery quality assurance and CT verification complete with an extensive reference list. The book also has several excellent chapters on the clinical use of TomoTherapy. I was very delighted to see the treatment of total marrow irradiation which I believe will one day be the way that all patients are prepared for bone marrow transplants.

This book will benefit both types of customers; the cancer centers that acquire TomoTherapy machines and the patients who are treated by it. I am very grateful for the efforts and love of the authors and editor because they truly believe that TomoTherapy can help patients fight cancer better.

Thomas Rockwell Mackie, Ph. D.
Co – Inventor of TomoTherapy
Chairman of the Board of TomoTherapy Inc.

序 二

世界卫生组织的最新数据显示，中国是世界上恶性肿瘤的高发国家，每年新增患者占到全球总数的20%以上。我国现有恶性肿瘤患者超过700万人，不但严重影响了人民的健康水平，同时也给家庭和社会带来了沉重的负担。

放射治疗是恶性肿瘤治疗中仅次于外科手术的最主要的手段之一。根据2005年发表在欧洲放射肿瘤学会主办的《Radiotherapy & Oncology》杂志上的统计资料，恶性肿瘤患者中有55%可以治愈，其中手术占27%，放疗占22%，化疗占6%。在西方发达国家中，肿瘤患者中约60%~70%接受放射治疗。近十余年来，放射治疗技术飞速发展，三维适形放疗、调强放疗、图像引导放疗等新技术相继应用于临床，使得放射肿瘤学这一历史悠久的学科从传统的二维放疗过渡到三维精确放疗时代。

中国人民解放军总医院以“差距观”落实科学发展观，以建设国际一流的研究型医院的目标牵引发展，明确提出要把医院建设成保健基地及高危疑难病症的诊治基地，高层次人才的培训基地，高新技术的研发基地。在技术创新的方向上，该院始终坚持以临床需求为牵引、以医学前沿为牵引、以使命任务为牵引，并使创新成为一种习惯和风尚。

中国人民解放军总医院提倡肿瘤的多学科综合治疗，为肿瘤患者提供最佳的个性化治疗方案。为此，于2007年9月在国内率先引进了国际上最先进的放射治疗设备——断层放疗（TomoTherapy）系统，为推动肿瘤治疗新技术在我国的开展，缩小与发达国家间的差距迈出了重要的一步。

为了总结国内外近年来断层放疗系统临床应用的经验，同时介绍和展望即将研发出的新功能，编者组织相关学者撰写了本书。中国人民解放军总医院对此表示全力支持，并希望以此推动断层放疗这项新技术的开展和普及，提高中国肿瘤治疗的水平，以造福于更多的肿瘤患者。

李书章

序 三

近年来，肿瘤放射治疗获得了快速发展，这得益于先进的影像技术的介入，三维立体剂量分布计算软件的发展和完善以及治疗设备的不断更新和应用。正是由于治疗设备的更新和发展，使得先进的治疗理念得以实现，使放射治疗进入了一个全新的精确放疗时代。

目前，放疗领域内诸多先进设备，如配有多叶光栅的，可做调强放疗或图像引导放疗的加速器，立体定向放疗设备，如 γ -刀，X-刀等均已在临床上普遍应用。TomoTherapy 的问世成为群星普照中的一个“新星”，以其独特的治疗技术及优异的剂量分布吸引了放疗界广大学者的注意，成为争相应用的新宠。

中国人民解放军总医院是中国内地第一家引进 TomoTherapy 的医疗机构。在相当长的一段时间内也是唯一拥有和使用 TomoTherapy 的医院。在引进 TomoTherapy 以后，301 医院收治了不少疑难复杂的肿瘤患者，取得了很好的疗效。

中国人民解放军总医院在总结经验的基础上结合国外的先进经验编写了《肿瘤断层放射治疗》一书，对 TomoTherapy 的结构、治疗机理、剂量学分布的特点及各种肿瘤放射治疗的应用及疗效作了全面的介绍。它是国内其他选用 TomoTherapy 治疗机的单位和放疗技术人员的实用参考书，对正确应用 TomoTherapy 治疗机具有较大的参考价值。

最后，借此机会谨向本书的编写者表示衷心的感谢，感谢他们为我国放射治疗事业的发展作出的贡献。

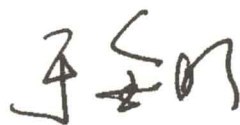
余子豪

序 四

自 1895 年伦琴发现放射线就开始应用于肿瘤临床治疗，经过近百年的放射治疗历史，到现在从普通治疗已发展到高精度生物物理治疗，并不断完善各种技术和方法。这已大大改善和提高了肿瘤治疗疗效及患者生活质量，这都是科学技术进步和有志科学家无私奉献的结果。

螺旋断层放疗（TomoTherapy）就是目前众多放射治疗肿瘤创新技术中的一个代表。这是一个全新概念的放疗技术，它将一台 6MV 直线加速器安装在螺旋 CT 的滑环机架上，应用逆向 CT 成像原理进行高能 X 线强调自适应肿瘤治疗，解决了全身各种肿瘤及复杂难治性病例的治疗，疗效显著，毒副作用反应小，已被国内外同学科领域的专家所公认，中国的放射肿瘤学者也有共识。

自 2007 年中国内地引进此项技术已治疗了不同肿瘤患者 1000 余例，获得了很好的临床效果。近年来国内又有了很大的发展。为此编者们组织了相关学者著书，初步总结、扼要介绍了这几年来螺旋断层放疗临床应用的国内外经验，并展望未来新功能的开发研究。抛砖引玉以供放射肿瘤专业肿瘤学科和其他学科的医师、物理师等相关人员参考与交流。此书还可作为青年医师和医学继续教育的培训教材，在不断完善、改进、提高专项技术的基础上，使好的技术得以推广，使更多的肿瘤患者获益。预祝本书得以成功出版，并推动放射肿瘤学的发展。



前 言

已有一百多年的历史放射治疗，作为恶性肿瘤治疗的主要手段之一，一直默默奉献服务于肿瘤患者。直至20世纪末和21世纪初，随着科学技术的发展，医学影像学、计算机技术、多叶准直器等与加速器技术密切结合，三维适形放疗、调强放疗、图像引导放疗等精确放疗技术相继应用于临床，使得放射肿瘤学这一悠久的学科更加灿烂，地位和作用也日益受到重视。这体现在几个方面：①对传统放疗可根治的恶性肿瘤，如鼻咽癌、前列腺癌、宫颈癌等，精确放疗不但提高了疗效，而且显著地降低了并发症的发生率。②对传统放疗疗效差的恶性肿瘤，如早期周围型非小细胞肺癌，精确放疗可达到根治性的疗效；③对传统放疗难以治疗的恶性肿瘤，如肝癌，精确放疗成为重要的治疗手段之一。

现代高新科学技术的代表：螺旋断层放疗（TomoTherapy）系统将调强、图像引导和自适应放疗兼容为一体，被国内外同行专家公认为放射治疗近50年来最激动人心的发展之一。中国人民解放军总医院大胆在国内率先引进该设备，临床应用超过2年多的时间，累计治疗患者1000多例，并发表相关学术论文20多篇。编者考虑这样先进的技术国际上已临床应用有近10年的时间，虽然发展更新较快，但国内外尚无一本全面论述该技术的相关著作。为此编著者结合自己的经验在有长期研究和应用的国外专家的参与下，在得到国内放疗专家的支持下，从基础理论和临床应用两方面撰写了本书，以向读者全面介绍TomoTherapy的技术特点，以供放射肿瘤学科和其他学科的医师、物理师等相关人员参考，本书也可考虑作为青年医师和医学继续教育的培训教材。

由于我们的水平有限，书中还存在疏漏和不足，敬请读者批评指正。

本书出版得到了很多热心同道的支持、相关部门的鼓励以及许多不计名利者的默默奉献，在此一并表示衷心感谢！

编著者

2010年初秋

目录 CONTENTS

上篇 TomoTherapy 的基础

第一章	历史回顾	003
第二章	结构和原理	026
第三章	治疗计划	049
第四章	质量保证	089
第五章	AAPM TG148 号报告	112
第六章	半导体 QA	135
第七章	TomoTherapy 治疗机的场地准备和安装特点	153

下篇 TomoTherapy 的应用

第八章	立体定向放疗	167
第九章	头皮癌	184
第十章	鼻咽癌	193
第十一章	食管癌	200
第十二章	肺癌	204
第十三章	肝癌 胰腺癌	218
第十四章	宫颈癌	244
第十五章	前列腺癌	251
第十六章	全中枢神经系统放疗	257
第十七章	全骨髓照射	261
第十八章	TomoTherapy 的未来发展	279



上篇



TomoTherapy 的基础



TomoTherapy 肿瘤断层放射治疗

第一章 历史回顾

一、背景简介

提到 TomoTherapy——螺旋断层放射放疗，正如发表在美国医学物理杂志上一篇文章（《TomoTherapy 最终将取代直线加速器成为实现适形调强放疗的最佳手段》1625 Med Phy 35（5）May2008）所指出的那样，“恐怕很少有什么能像 TomoTherapy 这样，是由医学物理学家构想出来，引进到临床领域，并且带来如此令人激动而又具有深远影响的事物。”

曾获得过北美放疗协会（ASTRO）最高荣誉——金质奖章的威尔逊医生（Dr Frank Wilson），评价 TomoTherapy 是放射治疗过去几十年来的最激动人心的发展之一。

已有超过 800 篇以上的国际临床和医学物理方面的文献和报道对 TomoTherapy 的先进性和良好的临床疗效予以肯定。

从 2002 年起，以 TomoTherapy 通过美国 FDA 标志该产品诞生以来，已有几百台设备在世界上几十个国家投入临床应用，已有数万名癌症患者（包括我们的患者）实实在在地得到治疗并取得了令人满意的临床效果。

饮水思源，尽管很多科技人员包括医生、物理师和工程技术人员对这项技术的发展都做出过重要贡献，但我们还是要特别铭记这项成果的发明人之一，一个地地道道的医学物理师：托马斯·洛克·麦肯（Thomas Rockwell Mackie）教授。正是他的聪明才智和不懈努力成就了这样一个伟大成果。

麦肯教授从 1986 年做临床物理师起，就致力于医学物理领域的科研和创新工作。在发明 TomoTherapy 之前，他还创建了 Geometrics 公司，首次将卷积/叠加算法植入了三维治疗计划系统，开发出来历经了 20 多年，至今仍广为流行和应用的三维治疗计划系统 Pinnacle^[3]。

在被问到为什么那样执著于放疗科学与技术的创新和发明时，麦肯教授的一句大道至简的话让众多听者为之动容：“因为我和保罗（Paul Reckwerdt，TomoTherapy 的另一位发明人）都有挚爱的亲人被癌症夺去了生命。想到他们，想为和他们一样遭遇不幸的癌症患者做点什么，这是支持我们在这一领域坚持不懈的最大动力。”

麦肯教授对中国十分友好和向往，亲自指导过多名来自中国的博士研究生。这其中就有来自北京大学，后来成为 TomoTherapy 研究开发部门首席科学家的卢卫世博

士。麦肯教授 2007 年 9 月第一次来到中国，参观长城时，在长城上抑制不住激动的心情，给他在美国已经入睡了的夫人和四个孩子打了一通电话，与妻儿一起分享其惊叹的感受和喜悦的心情（图 1-1）。

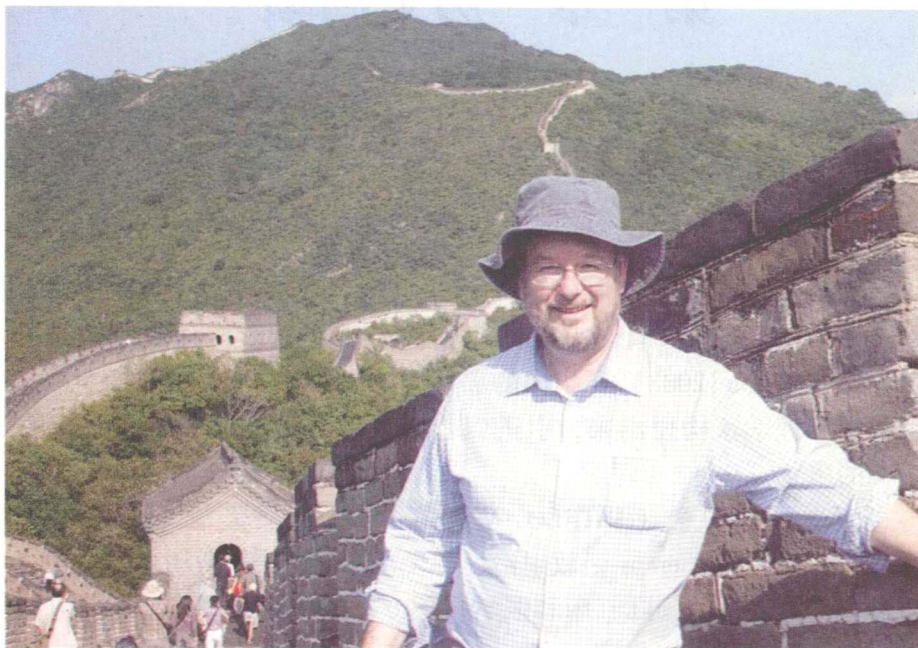


图 1-1 麦肯教授第一次登上长城，为长城的雄伟和壮观而深深叹服

在听到修长城的目的是为了抵御和抗击外敌的侵略，麦肯教授在长城上感叹道：希望 TomoTherapy 也像中国的长城那样，能够强有力地抵御癌症对人类的侵扰。的确，这项新技术的诞生就如同为癌症治疗筑造了新的坚固长城。TomoTherapy 的出现推进了现代放疗的发展，为肿瘤的精确治疗奠定了基础。

螺旋断层放疗系统（TomoTherapy）（图 1-2），集 IMRT 和 IGRT 于一体、以螺旋 CT 旋转方式治疗癌症，这就是 TomoTherapy 技术的核心特征。TomoTherapy 同时还构建了放疗技术发展的新平台：自适应放疗（ART）或剂量引导放疗（DGRT）。

通过图 1-2 的透视图可以看到：CT 的滑环机架上安装了小型加速器，在该加速器的对面，就是原来的 CT 气体探测器系统。加速器产生的 X 射线既能被用来做 CT 成像验证患者的摆位，又能经多叶准直器调制后治疗肿瘤患者。下面来简单概括一下螺旋断层放疗系统的几项最重要而又突出的技术特点。

1. IMRT 的金标准

调强的目的就是为了让剂量分布按照肿瘤的形状来包绕（适形度），而且靶区的剂量尽量均匀（均匀度）。TomoTherapy 就是专门为实现调强放疗而设计的，其所能达到的调强水平，无论从其计划的复杂程度而言，还是从其能实现调强的范围

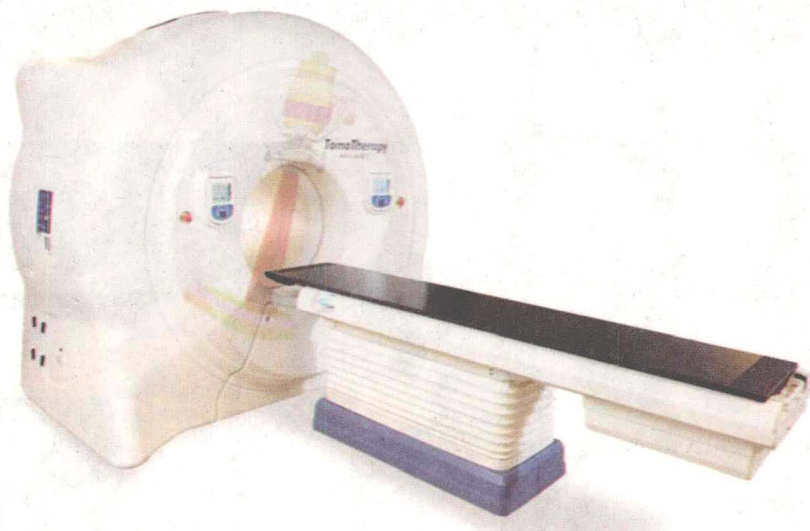


图 1-2 螺旋断层放疗系统，集 CT 和加速器于一体，成为唯一能够治疗癌症的 CT

(40cm × 160cm) 而言，都堪称调强放疗的金标准。很多医生和物理师在使用过 TomoTherapy 后，对其最深的印象和体会都是在做复杂病例的计划上，这些是常规加速器系统难以匹及的。

从物理学的角度上是不难理解的，因为 TomoTherapy 实现调强的过程就是 CT 成像的逆向反演，理论上可以实现 40cm × 160cm 范围内的任何剂量分布要求。由于断层放疗可以在全身范围内实现优异剂量分布，使其成为在放射治疗领域的临床应用范围和治疗的病种是目前最全面和最广泛的，图 3 就是 TomoTherapy 在临床应用中的典型病例。

2. 一体化 IGRT 特征

TomoTherapy 的理念就是要在 CT 上实现调强放疗的功能，TomoTherapy 的计划剂量分布一般比三维适形来的更加陡峭和精确。每天摆位产生的误差对治疗计划的实施可能会产生相当大的影响。对于复杂病例，每次治疗前的摆位验证，就成为 TomoTherapy 计划能否完美实现的一个必要条件。

从一开始的并排 CT 设计，到后来的加速器和 CT 融合为一体，TomoTherapy 每次治疗前做三维影像的观念，始终就根植于产品设计的全过程，并成为 TomoTherapy 与生俱来的 IGRT 基本特征。这完全不同于常规加速器的 IGRT 发展是在实现 IMRT 功能之后，才意识到必须要有三维影像才能确保 IMRT 的精确性。

此外 TomoTherapy 能够做到每天治疗前的 MVCT 扫描，重要原因是其扫描剂量非常低（~1cGy），而且图像足够清楚。如果没有这个能力，IGRT 也可能就成为虚设。

3. 自适应（ART）或剂量引导放疗（DGRT）

TomoTherapy Hi · Art 系统的英文名称中的 Hi · Art 就是：Highly Integrated Adap-

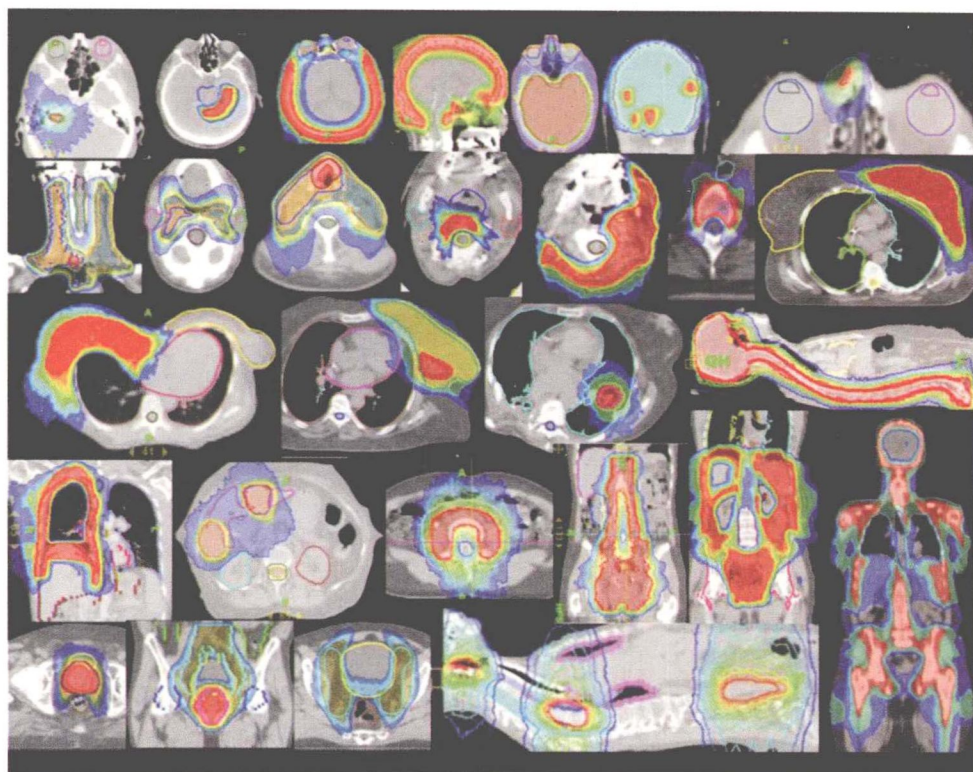


图 1-3 TomoTherapy 能治疗广泛的病种。一次摆位就可以完成从小到 1cm 的中枢神经系统肿瘤，大到全骨髓调强放疗 TMI

tive Radiation Treatment 的缩写，即高度集成化的自适应放疗系统。

“自适应放疗（ART）”是洛克·麦肯教授于 1993 年首次提出的一个有关现代精确放疗的新概念。传统放射治疗通常是每天 1 次，一周 5 次，总共三十几次为一个疗程。患者的治疗计划一般只在第一次治疗前做一次验证，之后在整个疗程当中，一般只做摆位（位置）验证，不再做当天实际剂量验证或计划修改。自适应放疗是指在治疗过程中，部分或全程（每次）监控和验证患者的计划执行状况，并和原来计划进行比对。

由于肿瘤患者的体重、病灶大小和危及器官在治疗过程中可能会有较大改变，自适应放疗能够根据改变的程度做“在线”或“离线”式的计划修改。从而达到始终按照原来计划的临床和物理要求，精确治疗肿瘤患者的目标。“自适应放疗”在传统精确放疗的基础上，将放射治疗的水平又提升到一个新的高度。

放疗系统要能够实施自适应放疗，至少应该具备下面两个前提条件：首先，系统能够在患者治疗前，容易获取患者的三维真实 CT 图像。即该图像的 CT 值和患者组织的电子密度必须成线性关系，以便精确地剂量计算。其次，系统必须具备相应地实施自适应计划的计算工具，以便能够实施计划的验证和修改。由于 TomoTherapy