

# 质子放疗过程中射束与人眼体作用的 蒙特卡罗模拟计算

刘云鹏, 汤晓斌, 谢 芹, 陈飞达, 耿长冉, 陈 达

(南京航空航天大学 核科学与工程系, 南京 211106)

**摘要:** 选用 62 MeV 质子束, 构建了人眼体 MCNPX 模型, 模拟计算了质子束放疗过程中人眼体模型的剂量分布。模拟中考虑了两种情况: 1) 理想的治疗情况, 肿瘤区的剂量值为 50.03 Gy, 在有效的治疗水平上, 同时其他组织受量都在可接受的剂量范围内; 2) 最坏的治疗情况, 即模拟病人在放疗期间直视射束时的剂量分布, 结果大部分剂量都沉积在了角膜、晶状体和前房, 而肿瘤区的剂量为零。计算结果与有关文献报道的结果相吻合, 初步证实了 MCNPX 程序能很好的模拟质子放疗, 可用于病人放疗计划, 而最坏治疗情况中的模拟结果可用于临床医学事故的剂量重建。

**关键词:** 质子束; 剂量分布; MCNPX

中图分类号: TL72 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0602-06

## Monte-Carlo Simulation of Proton Radiotherapy for Human Eye

LIU Yun-peng, TANG Xiao-bin, XIE Qin, CHEN Fei-da, GENG Chang-ran, CHEN Da

(Department of Nuclear and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The 62 MeV proton beam was selected to develop a MCNPX model of the human eye to approximate dose delivered from proton therapy by. In the course of proton therapy, two treatment simulations were considered. The first simulation was an ideal treatment scenario. In this case, the dose of tumor was 50.03 Gy, which was at the level of effective treatment, while other organizations were in the range of acceptable dose. The second case was a worst case scenario to simulate a patient gazing directly into the treatment beam during therapy. The bulk of dose deposited in the cornea, lens, and anterior chamber region. However, the dose of tumor area was zero. The calculated results show an agreement accordance with the relative reference, which confirmed that the MCNPX code can simulate proton radiotherapy perfectly, and is a capable platform for patient planning. The data from the worst case can be used for dose reconstruction of the clinical accident.

**Key words:** pronton beam; dose distribution; MCNPX

收稿日期: 2010-06-30; 修回日期: 2010-09-06

基金项目: 南京航空航天大学基金科研业务费专项科研项目资助 (Y1065-063)

作者简介: 刘云鹏 (1985—), 男, 山东莘县人, 博士研究生, 核科学与技术专业

葡萄膜恶性黑色素瘤，是成年人中最常见的一种眼内恶性肿瘤，在国内的发病率仅次于视网膜母细胞瘤。该肿瘤较常见的疗法有摘除术、经瞳孔温热疗法、近距离放疗等，但这些疗法有肿瘤扩散的危险，或者有严重的副作用。质子放疗是放射治疗的一门新兴技术，其特点为穿透性能好、剂量分布好、局部剂量高、旁散射少、半影小等。与常规的X光放射治疗不同的是，质子放疗是利用质子束所特有的“布拉格峰”治疗肿瘤的新技术，即质子在路径末端迅速损失能量，产生很高的局部剂量沉积，形成一个峰——布拉格峰。质子治疗能够实现“立体定向定点爆破”，即在其穿越路径时仅释放出少数能量，只有在达到治疗深度时才会释出大量能量，这就使得质子在人体中不易扩散，可让质子束将能量集中照射在癌变组织上，从而较少伤及周围的正常组织<sup>[1]</sup>。

MCNPX 是美国 Los Alamos 国家实验室开发的一种通用的蒙特卡罗粒子输运程序，该程序开发始于 1994 年，它是 MCNP4B 和 LAHET 2.8 这两种程序的延续和发展。经过大量的测试，使用以及不断改进，MCNPX 已成为一种非常有用且可靠的工具，可以用于辐射输运计算。MCNPX 能够模拟 40 余种粒子，其中包括中子、正负电子、光子、质子等<sup>[2-4]</sup>。本文使用 MCNPX 2.5.0 构建了一个人眼体模型，并模拟计算了质子放疗过程中质子束与人眼体模型的剂量分布，模拟过程中考虑了质子与介质的相互作用和次级相互作用，包括多重库仑能量散射弹性散射，非弹性散射，和非弹性核反应等。

## 1 MCNPX 对质子能量沉积的模拟

在运行 MCNPX 程序前，首先要基准该程序，确定其至少能够定性模拟质子束；然后，用该程序模拟质子束，确定其结果很好地符合实际的测量结果，以进一步说明 MCNPX 能精确地模拟质子束。

为确认 MCNPX 程序能够定性模拟质子束，本工作设计 1 个已知的质子模拟。首先，构造一直径为 1.5 cm，能量为 100 MeV 的质子束，用于照射 1 个圆柱形水体模；然后，将 3 个较小的圆柱体置于质子束的路径上（水体模内），模拟计算其与质子束的相互作用。第 1 个

圆柱体定义为 1 个零重要性的区域，即任何进入该区域的粒子认为其死亡，MCNPX 程序也就不再跟踪模拟此类粒子。第 2 个圆柱体由元素铁组成。第 3 个圆柱体定义为 1 个空白空间，即真空。本文预期进入零重要性区域的粒子死亡，并且在该区域下游可以观察到“阴影”；在铁圆柱体中，因质子阻止本领强，粒子径迹长度短，预期有较强的相互作用；最后，在空白区域中，预期不会有相互作用，在该区域下游粒子有较长的粒子径迹。

为说明此次基准的结果，需要用到 MCNPX 程序特有的计数卡：TMESH（网格计数）卡，即把模型切割为多个小方块，并对每个小方格内的能量沉积、通量等进行计数。本次模拟采用了热网格计数，即能量沉积计数，并绘制了结果，如图 1 所示，其中，颜色越深表示沉积能量越高。

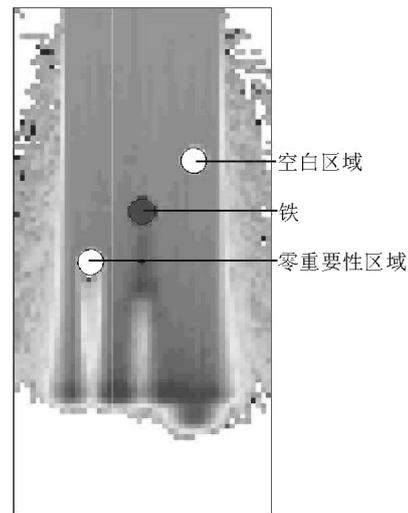


图 1 100 MeV 质子束的热网格计数图

Fig. 1 Heating mesh tally plot for 100 MeV proton beam

从图 1 可看出，模拟结果到达了预期的效果：零重要性区域内没有发生粒子相互作用，在其下游，质子与介质的相互作用急剧变化，下游的“阴影”说明了这一点。如预期那样，铁圆柱体内有比较高的温度，在它的下游，质子的径迹长度比其他地方都要短。在空白区域也取得了预期的效果，该区域内没有相互作用，可明显的看到下游质子有比较长径迹。该测试证实，MCNPX 程序至少可定性模拟质子束。

本文选用 INFN-LNS (意大利国家核物理研究院) 的 62 MeV 质子束作为此次模拟的源模型。INFN-LNS 与意大利卡塔尼亚大学合作, 建立了 62 MeV 质子束, 主要用于眼部疾病治疗, 包括葡萄膜黑色素瘤、脉络膜血管瘤、结膜黑色素瘤、眼睑肿瘤和胚胎肉瘤等。在每次治疗之前, 质子束都需经过水体模校准, 水体

模中嵌入 Markus 电离室, 用来测量质子束在水体模中的剂量分布。

为了使用 MCNPX 程序模拟该质子束在水体模中的剂量分布, 并与实测结果做对比, 本文将水体模细分为渐进的水层, 对每个水层中进行了沉积能的计数。MCNPX 模拟结果与实测结果的对比结果如图 2 所示。

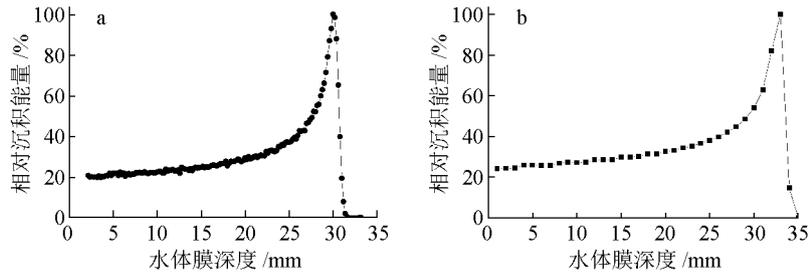


图 2 水体模的测量结果 (a) 和 MCNPX 的模拟结果 (b)

Fig. 2 Measured activity in water phantom (a) and MCNPX simulation results (b)

从图 2 可看出, 两组数据之间存在微小的差异, 这主要是由于 MCNPX 程序的低能量截断模拟, 即 MCNPX 不会跟踪能量低于 1 MeV 的质子。但两组数据基本上是吻合的, 说明 MCNPX 程序能够很好的模拟质子束。

近的研究表明, 玻璃体液、前房房水与 ICRU46 号报告描述的淋巴液有相似的特性<sup>[5-6]</sup>, 因此本文中玻璃体和前房采用淋巴液的元素组成成分。脉络膜和巩膜实质上是疏松结缔组织, 等效为软组织。视神经近似地使用老鼠的神经组织的元素组成成分<sup>[7]</sup>。

## 2 眼模型建立

影响视力的关键性器官都紧靠在一起, 所以构建模型的重点在于构建这些器官。晶状体是一个辐射敏感性器官, 受到高剂量照射后, 视力会丧失。同样, 角膜受过量照射也会使它的结构变得模糊而影响视力。由于葡萄膜黑色素瘤多生长在脉络膜和巩膜, 也需要构造成模型, 而且本文模拟的就是生长在脉络膜和巩膜的葡萄膜黑色素瘤。位于眼睛中轴线后部的视神经也是本工作要研究区域, 同样需要构造成模型。

本文眼模型的尺寸取于文献[3]。眼模型由一些同轴球体和圆柱体构建而成, 视神经等效为一圆柱体, 而脉络膜、巩膜和视网膜被细分成多个计数栅元。图 3 所示为构建的一左眼的 MCNPX 模型, 其中 7R 表示肿瘤区栅元。

模型的材料组成取于文献[4]。文献[4]直接给出了晶状体的元素组成及其密度, 并且近似给出了眼睛的其他部分的元素组成和密度。最

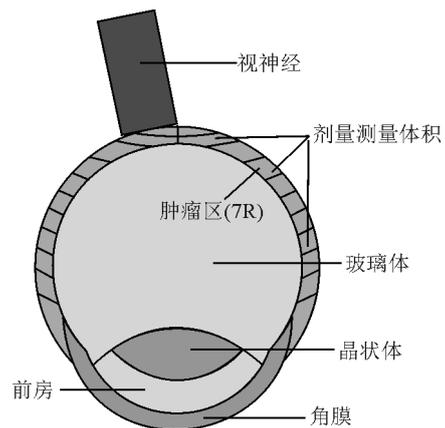


图 3 左眼模型

Fig. 3 Simulation of left eye

在模拟源的照射方式时, 考虑了两种情况。1) 理想的治疗情况, 即从眼睛的侧面用质子束照射肿瘤区, 给予肿瘤区致死剂量, 而要害器官在很大程度免受伤害。治疗束穿过等效为水

的射程调节器，入射到眼睛，箭头表示质子束的入射方向。其中，“+”指模型中定义的坐标原点（图 4a）。2）最坏的治疗情况，即病人移动了目光，角膜和晶状体直接进入了质子束的路径（图 4b）。图中箭头表示质子束的入射方向底部同样有等效为水的射程调节器。

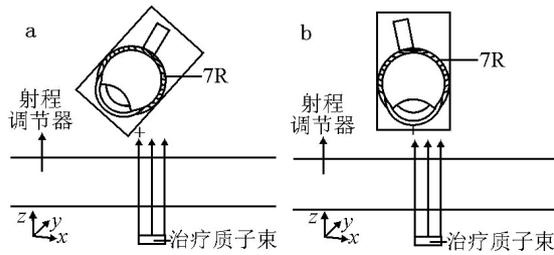


图 4 理想治疗情况的几何视图 (a) 及最坏治疗情况的几何视图 (b)

Fig. 4 Visual editor illustrations of typical treatment geometry (a) and worst case geometry (b)

### 3 结果与分析

MCNPX 程序包含了 10 个标准统计指标，用来确保模拟结果的准确性和可信度，其中最重要、最需仔细检查的一项统计指标是相对误差，它涉及到整体不确定性的统计平均值，尤其是统计平均值的标准偏差相对于整体均值的比率。本文中所有的质子束模拟都很好的通过了这 10 项统计指标，其中理想治疗情况和最坏治疗情况的模拟结果的相对误差均很低，分别为 0.38% 和 0.05%。

#### 3.1 理想的治疗情况

MCNPX 模拟结果列于表 1，其中 1L~10L 和 1R~10R 分别为睛模型左边和右边细分的 10 个计数栅元。从表 1 可看出，7R 区（肿瘤区）剂量达到最大（每次 12.51 Gy，共计 50.07 Gy），而其他部位所受剂量都比较小，并且眼睛左侧受到的剂量比右侧低 3 个数量级。视神经的受量为 5.29 Gy，而质子治疗中视神经的耐受剂量为 10 Gy<sup>[8]</sup>。角膜所受剂量为 1.21 Gy，远小于其耐受剂量 15 Gy<sup>[9]</sup>。对于晶状体，在放疗的模拟过程中，需要做特别的努力，保证其剂量在 1 个阈值之内，通常是小于 8 Gy<sup>[8]</sup>。在此次模拟中，晶状体 4 次的累积剂量仅有 0.07 Gy，远小于 0.30 Gy。

表 1 理想治疗情况中的剂量分布  
Table 1 Dose distribution for typical treatment scenario

计数栅元	单次照射剂量/Gy	总剂量/Gy
角膜	0.30	1.21
前房	0.06	0.26
晶状体	0.07	0.30
玻璃体	5.01	20.05
视神经	1.32	5.29
1R	11.00	44.76
2R	9.98	39.95
3R	10.85	43.47
4R	9.24	36.97
5R	9.22	36.87
6R	10.51	42.05
7R	12.51	50.07
8R	12.24	48.96
9R	5.71	22.87
10R	1.29	5.17
1L	0.01	0.06
2L	0.02	0.07
3L	0.02	0.09
4L	0.09	0.37
5L	0.39	1.57
6L	0.59	2.38
7L	0.20	0.83
8L	0.01	0.04
9L	0	0.00
10L	0.024	0.01

根据相关文献，对于 7R 区的葡萄膜黑色素瘤，通常分 4 次给予的总照射剂量值为 50 Gy，而本次的模拟结果为 50.07 Gy，两者相差无几，误差仅有 0.14%。在保证肿瘤区为致死剂量的前提下，眼部其他正常组织的受量分别远在其耐受剂量范围之内。本文在此次模拟中用到了 MCNPX 特有的 TMESH（网格计数）卡，即把眼模型切割为多个小方块，并对每个小方格内的能量沉积进行计数，可以得到眼模型各个截面的剂量分布。图 5、6 所示为理想治疗情况下某些截面的 TMESH 计数的绘图结果，其中颜色越深表示沉积能量越高，数字为曲面号。

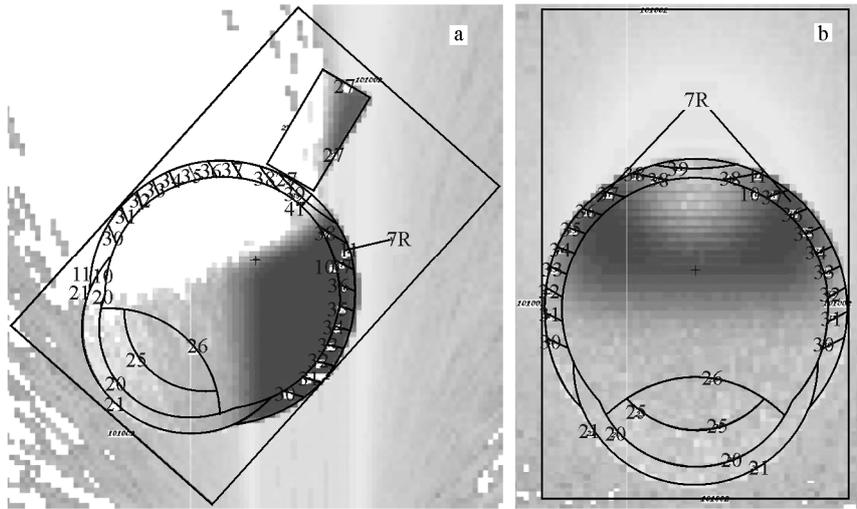


图 5  $y=0$  cm (a) 和  $x=0$  cm (b) 处截面的剂量分布  
 Fig. 5 Dose distribution for cross-section when  $y=0$  cm (a) and  $x=0$  cm (b)  
 理想治疗情况

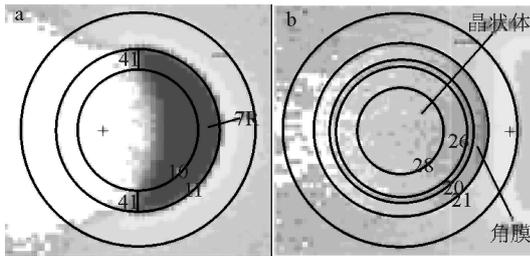


图 6  $z=4.65$  cm (a) 和  $z=2.35$  cm (b) 处截面的剂量分布  
 Fig. 6 Dose distribution for cross-section at  $z=4.65$  cm (a) and  $z=2.35$  cm (b)

### 3.2 最坏的治疗情况

最坏治疗情况剂量分布模拟结果列于表 2。

从表 2 可看出, 质子束大部分能量都沉积在了角膜、前房、晶状体和玻璃体, 而肿瘤区剂量值为零。角膜的受量为 33.94 Gy, 远超过了剂量阈值, 在这样高剂量照射下, 会引发角膜炎、角膜溃疡, 最后还可能导致角膜穿孔。晶状体的受量将近 42.05 Gy, 远超过了其耐受剂量。在这种治疗情况下, 晶状体变得模糊, 病人的视力会严重丧失。

TMESH 计数的运行结果示于图 7、8。

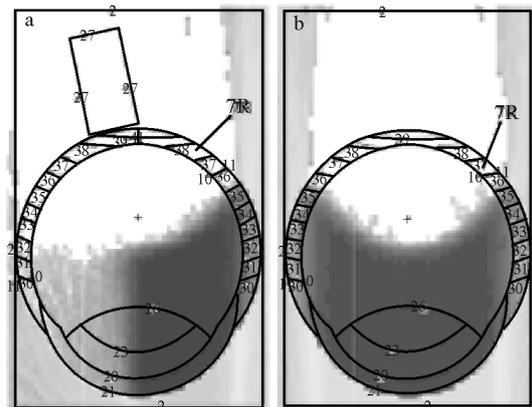


图 7  $y=0$  cm (a) 和  $x=0$  cm (b) 处截面剂量分布  
 Fig. 7 Dose distribution for cross-section when  $y=0$  cm (a) and  $x=0$  cm (b)  
 最坏治疗情况

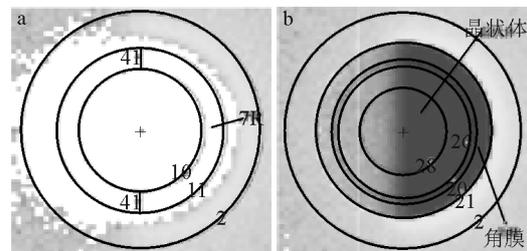


图 8  $z=4.2$  cm (a) 和  $z=2.7$  cm (b) 处截面的剂量分布  
 Fig. 8 Dose distribution for cross-section at  $z=4.2$  cm (a) and  $z=2.7$  cm (b)

表2 最坏治疗情况的剂量分布

Table 2 Dose distribution for worst case scenario

计数栅元	单次照射剂量/Gy	总剂量/Gy
角膜	8.48	33.94
前房	10.52	42.08
晶状体	10.51	42.05
玻璃体	4.94	19.75
视神经	0	0.00
1R	0.87	3.50
2R	0.73	2.94
3R	0.99	3.97
4R	1.97	7.89
5R	2.27	9.11
6R	0.11	0.43
7R	0	0.00
8R	0	0.00
9R	0	0.00
10R	0	0.00
1L	0.08	0.33
2L	0.06	0.24
3L	0.05	0.22
4L	0.08	0.32
5L	0.08	0.33
6L	0.005	0.02
7L	0	0.00
8L	0	0.00
9L	0	0.00
10L	0	0.00

#### 4 结论

1) MCNPX 程序能够很好的模拟质子放疗, 可用于病人放疗计划; 2) 根据实际数据, 模拟的治疗质子束能在人眼体模型中形成理想

的剂量分布, 眼睛各部分的剂量值都很好符合剂量要求; 3) 最坏治疗情况中的模拟结果可用于临床医学事故的剂量重建。

#### 参考文献:

- [1] 唐劲天. 肿瘤质子放射治疗学[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2004.
- [2] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 2版. 北京: 原子能出版社, 2006.
- [3] ATCHISON D, SMITH G. Optics of the human eye[M]. Edinburgh: Reed Educational and Professional Publishing, 2003.
- [4] DENISE B P. MCNPX<sup>TM</sup> user's manual version 2.5.0, LA-CP-05-0369[R]. Los Alamos, USA: Los Alamos National Laboratory, 2005.
- [5] MACKNIGHT A, McLAUGHLIN C, PEART D, et al. Formation of the aqueous humor[J]. Clin Exp Pharmacol Physiol, 2000, 27: 100-107.
- [6] BRZEZINSKI P, GODLEWSKI A. Assessment of potassium and sodium ion concentrations in the vitreous humour of swine isolated eyeballs after organism death[J]. Roczn Akad Med Białymst, 2004, 49: 161-163.
- [7] STYS P, LOPACHIN R. Elemental composition and water content of rat optic nerve myelinated axons during in vitro post-anoxia reoxygenation[J]. Neuroscience, 1996, 73: 1 081-1 090.
- [8] JONES B, ERRINGTON R. Proton beam radiotherapy[J]. Br J Radiol, 2000, 73: 802-805.
- [9] SIMONOVA G, NOVOTNY J, LISCAK R, et al. Leksell gamma knife treatment of uveal melanoma[J]. J Neurosurg, 2002, 97: 635-639.