



## 碳离子束射程快速验证方法的蒙特卡罗模拟研究

车宇航 孟乾乾 张小芳 刘新国 戴中颖 李强

### Monte Carlo Study on the Method of Rapid Range Verification of Carbon Ion Beam

CHE Yuhang, MENG Qianian, ZHANG Xiaofang, LIU Xinguo, DAI Zhongying, LI Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019064>

#### 引用格式:

车宇航, 孟乾乾, 张小芳, 刘新国, 戴中颖, 李强. 碳离子束射程快速验证方法的蒙特卡罗模拟研究[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(4):901–907. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019064

CHE Yuhang, MENG Qianian, ZHANG Xiaofang, LIU Xinguo, DAI Zhongying, LI Qiang. Monte Carlo Study on the Method of Rapid Range Verification of Carbon Ion Beam[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(4):901–907. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019064

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Simulation on the Novel M-THGEM Detector

原子核物理评论. 2019, 36(1): 85–90 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.085>

#### 均匀磁场下碳离子笔形束的剂量变化分析及位置修正方法

Dose Variation Analysis and Position Correction Method for Carbon-ion Pencil Beams under Uniform Magnetic Fields

原子核物理评论. 2020, 37(1): 88–96 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019038>

#### 碳离子在不同材料叶片的多叶光栅上产生的次级粒子研究

Study on the Secondary Particles Produced in Different Material Leaves of Multi-leaf Collimator under Carbon Ion Irradiation

原子核物理评论. 2020, 37(2): 217–224 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019050>

#### 重离子治疗装置同步加速器高频控制系统研制

Development of RF Control System for Heavy Ion Medical Machine

原子核物理评论. 2019, 36(1): 55–61 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.055>

#### 几种不同材料降能器对200 MeV质子放疗特性的蒙特卡罗模拟

Monte Carlo Study on the Performance of 200 MeV Proton Therapy Energy Degraders Made of Different Materials

原子核物理评论. 2018, 35(1): 78–84 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.078>

#### 基于MCNPX的重离子治癌相关问题研究

MCNPX-based Study on the Issues Related to Heavy Ion Cancer Therapy

原子核物理评论. 2017, 34(2): 236–241 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.236>

文章编号: 1007-4627(2020)04-0901-07

# 碳离子束射程快速验证方法的蒙特卡罗模拟研究

车宇航<sup>1,2,3,4</sup>, 孟乾乾<sup>1,2,3,4</sup>, 张小芳<sup>1,2,3,4</sup>, 刘新国<sup>1,2,3,4</sup>, 戴中颖<sup>1,2,3,4</sup>, 李强<sup>1,2,3,4,†</sup>

- (1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院重离子束辐射生物学重点实验室, 兰州 730000;
3. 甘肃省重离子束辐射医学应用基础重点实验室, 兰州 730000;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 可通过楔形装置把离子束(质子和重离子)纵向上的深度剂量分布转换成横向上的剂量分布, 进行离子束射程的快速测量及验证。本工作通过基于 GEANT4 内核的 GATE 蒙特卡罗模拟平台, 模拟计算了不同能量碳离子束在用于制作楔形装置的铜、铝、铁和有机玻璃等材料中的深度剂量分布, 得到不同能量碳离子束在不同材料中 Bragg 峰位所处深度与能量之间的关系; 模拟计算了不同能量碳离子束穿越单楔板、双楔板和大小组合楔板等楔形装置后横向上的剂量分布, 得到了横向剂量峰值出现位置与碳离子束射程之间的关系。本文蒙特卡罗模拟研究为进一步开发重离子治疗当中的射程快速验证方法与设备奠定了坚实的基础。

**关键词:** 重离子治疗; 蒙特卡罗模拟; 楔形装置; 射程验证; 横向剂量分布

**中图分类号:** R815.6

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.37.2019064

## 1 前言

用于人类癌症和其他疾病的放射治疗方式有两种: 一种在患者体外的外照射, 另一种在患者体内植入放射源<sup>[1]</sup>。放射治疗的主要目的是尽可能提高计划靶区(PTV)<sup>[2]</sup>照射剂量, 同时降低照射区内正常组织的照射剂量。质子/重离子束在患者体外进行照射, 可最大程度地将能量沉积于患者肿瘤靶区, 使得对肿瘤的局部控制率增强, 同时使正常组织的并发症风险降低<sup>[3]</sup>。因此, 对于邻近危及器官的肿瘤, 质子/重离子治疗比传统光子放射治疗更有优势<sup>[4-5]</sup>。

在放射治疗中, 质量保证(QA)是确保患者放疗成功的重要环节, 也是医学物理学师工作的重要一环<sup>[6]</sup>。在质子/重离子放射治疗当中, 通过楔形板装置可以将离子束纵向上的深度剂量分布(Bragg 曲线)转换成横向上的剂量分布, 便于采用不同探测手段(比如胶片、闪烁体等)进行测量, 达到快速进行离子束射程 QA 验证的目的, 在质子研究中有基于该原理的类似工作<sup>[7]</sup>。中国科学院近代物理研究所基于兰州重离子研究装置(HIRFL)成功开发了重离子治疗技术, 并在甘肃武威建立了第一台国产医用重离子加速器示范装置, 该示范装置已经取得国家第三类医疗器械注册证, 已经开始临

床治疗。同时, 中国科学院近代物理研究所也正在研发用于重离子治疗当中束流性能的快速 QA 验证方法与设备, 这对提高重离子治疗 QA 验证的效率具有非常重要的意义。本文将利用蒙特卡罗模拟方法对不同能量碳(<sup>12</sup>C)离子束穿越不同类型楔形装置后的横向剂量分布进行计算, 以期得到快速进行碳离子束射程(Bragg 峰位)验证所需的基础数据, 为碳离子束射程快速验证方法的建立和设备设计打下基础。

## 2 材料与方法

### 2.1 模拟工具

GEANT4 是基于面向对象技术的蒙特卡罗模拟工具包, 被应用于不同科学领域, 包括高能物理、医学物理和空间物理。现今 GEANT4 已经被应用于微剂量模拟<sup>[8]</sup>, 为医学物理提供了更高的准确度与更多的可能性。GATE(GEANT4 Application for Tomographic Emission)是一个蒙特卡罗仿真平台。该平台致力于 X 射线计算机断层扫描和放射治疗试验的建模、单光子发射计算机断层成像(SPET)和正电子发射成像(PET)的获取<sup>[9]</sup>。本文采用 GATE v8.2/GEANT4-10-05-patch-01 模拟平台, 物理过程调用 GEANT4 下的 QGSP\_BERT\_HP\_

收稿日期: 2019-12-17; 修改日期: 2020-01-19

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFC0115700); 国家自然科学基金资助项目(11875299, 61631001, U1532264)

作者简介: 车宇航(1994-), 女, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 从事重离子束治疗技术基础研究; E-mail: cheyuhang@impcas.ac.cn

† 通信作者: 李强, E-mail: liqiang@impcas.ac.cn。

EMY 强子物理模拟包。

## 2.2 楔形装置材料的选择

通常将离子束纵向深度剂量分布转换成横向剂量分布的楔形装置的材料为铜 (Cu)、铝 (Al)、铁 (Fe) 和有机玻璃 (PMMA) 等。本文将基于 GATE 模拟平台, 模拟计算能量范围为 100~400 MeV/u、能量间隔为 50 MeV/u 的碳离子束在上述不同材料中的 Bragg 曲线, 得到不同能量碳离子束在不同材料中 Bragg 峰位所处深度与能量之间的关系, 为楔形装置材料的选择提供依据。

GATE 模拟的设置如下: 碳离子束面源尺寸为 20 cm×20 cm, 模拟离子数是  $1 \times 10^7$ , 平行照射到尺寸为 20 cm×20 cm×20 cm 的模体, 模体材料分别为 Cu、Al、Fe 和 PMMA, 统计模体中纵向上的深度剂量分布, 模体内探测单元大小设置为 1 mm×1 mm×1 mm, 使用服务器工作站上的 CPU(Intel® Xeon® CPU E5-2690 V3 @2.60 GHz×48, OS: Scientific Linux release 7.6) 进行模拟计算, 模体内粒子的“cuts”设置为 1 mm, 模体之外的粒子的“cuts”设置为 10 cm。

## 2.3 不同楔形装置的模拟

楔形装置有单楔板、双楔板(对楔板及背楔板)和大小组合楔板等。本文模拟不同能量碳离子束分别穿越不同类型楔形装置后横向上的剂量分布, 计算横向剂量

分布峰值出现位置与碳离子束射程的关系, 为进行碳离子束 Bragg 峰位快速的验证提供基础数据。

GATE 模拟的设置如下: 单楔板情况下, 模拟能量范围为 100~400 MeV/u, 能量间隔为 50 MeV/u, 面源尺寸为 20 cm×20 cm 的碳离子束, 尺寸为 6 cm×20 cm×20 cm 的铜单楔板; 双楔板有两种情况, 分别为对楔板和背楔板, 如图 1(a) 和 (b) 所示, 模拟能量范围为 150~400 MeV/u, 能量间隔为 50 MeV/u, 面源尺寸为 30 cm×30 cm 的碳离子束, 穿越镜像对称的材料为铝、尺寸为 15 cm×16 cm×32 cm(X 轴方向短边长度 0.4 cm) 的双楔板; 大小组合楔板情况下, 共有四个材料为铝的单楔板, 分别两两镜像对称放置, 大楔板尺寸为 14 cm×20 cm×3.5 cm(X 轴方向短边长度 1 cm), 坐标分别为 (5.25, 0, -40) cm 和 (-5.25, 0, -40) cm; 小楔板尺寸为 1 cm×20 cm×3.5 cm(X 轴方向短边长度 0.01 cm), 坐标分别为 (8.75, 0, -40) cm 和 (-8.75, 0, -40) cm。将 X 轴负方向的两个楔板作为分模体一, X 轴正方向的两个楔板作为分模体二, 分模体一与分模体二合并为大小组合楔板如图 1(c) 所示。模拟能量范围为 50~400 MeV/u, 能量间隔为 50 MeV/u, 面源尺寸为 20 cm×20 cm 的碳离子束, 分别穿越分模体一和分模体二。碳离子束分别穿越不同类型楔形装置后, 照射到水模体表面, 统计水模体表面的横向剂量分布。

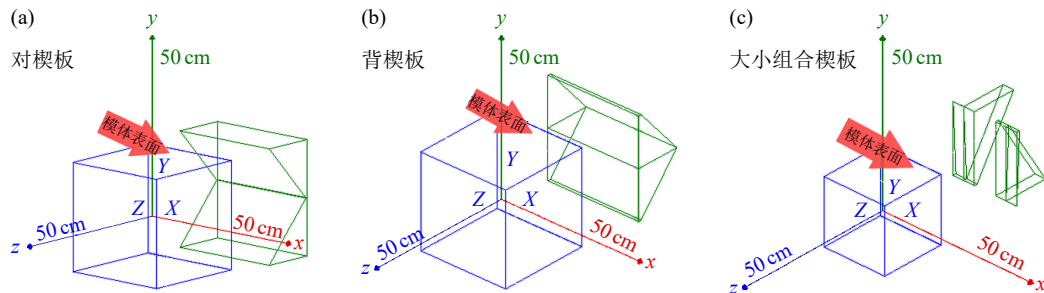


图 1 (在线彩图) 蒙特卡罗模拟中建立模型的示意图

## 3 结果与讨论

### 3.1 碳离子束在不同材料中 Bragg 峰位所处的深度

由本文蒙特卡罗模拟计算得到能量在 100~400 MeV/u 的碳离子束在 Cu、Al、Fe 和 PMMA 等材料中 Bragg 峰位所处的深度结果如表 1 所列。从表中结果可以看到, 400 MeV/u 的碳离子束在 PMMA 中 Bragg 峰位较深(大于 20 cm), 制作楔形板时需要短边的尺寸较长。我国目前铁、铜、铝矿产资源紧缺<sup>[10]</sup>, 资源再利用的方式提高铜、铁和铝的产量<sup>[11]</sup>, 综合考虑, 本文对单楔板的模拟选择铜材料, 对双楔板和组合楔板的模拟选择铝

材料。

### 3.2 碳离子束穿越不同楔形装置后的横向剂量分布

在单楔板情况下, 能量范围为 100~400 MeV/u、能量间隔为 50 MeV/u 的碳离子束穿越铜单楔板后, 照射到水模体表面的横向(即图 1 中的 Y 轴方向)剂量分布如图 2 所示, 图中横坐标 Y 为横向尺寸, 纵坐标  $D/D_m$  为剂量/最大剂量。由图可知, 水模体表面横向剂量分布峰值出现位置与 Y 轴负方向 10 cm 处(即模体边缘位置)的距离分别是 4, 15, 34, 58, 85, 113, 144 mm。

双楔板分为背楔板和背楔板两种情况, 能量范围为 150~400 MeV/u、能量间隔为 50 MeV/u 的碳离子束,

表 1 不同能量碳离子束在不同材料中 Bragg 峰位所处的深度 (cm)

材料	深度/cm						
	400MeV/u	350MeV/u	300MeV/u	250MeV/u	200MeV/u	150MeV/u	100MeV/u
Cu	4.6	3.7	2.9	2.1	1.5	0.9	0.4
Al	13.0	10.5	8.2	6.0	4.1	2.5	1.2
Fe	5.0	4.1	3.2	2.3	1.6	1.0	0.5
PMMA	23.7	19.1	15.0	10.9	7.5	4.5	2.2

— 100 MeV/u  $D/D_m$     - - - 150 MeV/u  $D/D_m$     ····· 200 MeV/u  $D/D_m$   
 - · - · 250 MeV/u  $D/D_m$     - · - · 300 MeV/u  $D/D_m$     ····· 350 MeV/u  $D/D_m$   
 ····· 400 MeV/u  $D/D_m$

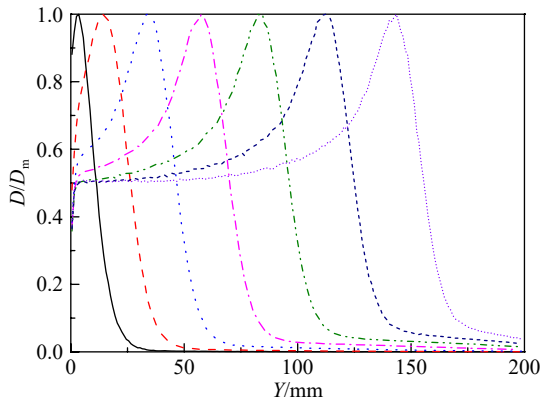


图 2 (在线彩图) 不同能量碳离子束穿越单楔板后的横向剂量分布

分别穿越对楔板和背楔板后，照射到水模体表面 (即图 1(a) 和 (b) 中红色箭头处的平面，位于 X-Y 轴方向并与双楔板距离最近)，表面横向 (即图 1 中的 Y 轴方向) 剂量分布如图 3 和图 4 所示。对楔板情况下，水模体表面横向剂量分布出现两个峰值，两个剂量峰值出现位置与 Y 轴负方向 15cm 处 (即模体边缘位置) 的距离分别是

(136 mm, 166 mm)、(118 mm, 184 mm)、(95 mm, 205 mm)、(72 mm, 230 mm)、(46 mm, 254 mm) 和 (18 mm, 283 mm) 处，双峰值之间的距离分别为 30, 66, 110, 158, 208 和 265 mm；背楔板情况下，水模体表面横向剂量分布同样出现两个峰值，两个剂量峰值出现位置与 Y 轴负方向 15cm 处 (即模体边缘) 的距离分别是 (4 mm, 297 mm)、(19 mm, 280 mm)、(41 mm, 260 mm)、(64 mm, 236 mm)、(91 mm, 209 mm) 和 (119 mm, 180 mm) 处，双峰值之间的距离分别为 293, 261, 219, 172, 118 和 61 mm。

单楔板情况下，水模体表面横向剂量分布峰值出现位置与最低边之间的距离、以及对楔板和背楔板情况下横向剂量分布峰值间距与不同能量的关系如图 5 所示。由图可知，铜单楔板情况下，横向剂量分布峰值出现位置与最低边的间距 ( $Y_m - Y_{min}$ ) 与碳离子能量之间单调递增；对楔板情况下，横向剂量分布双峰值间距 ( $Y_{m1} - Y_{m2}$ ) 与碳离子能量之间也单调递增；背楔板情况下，横向剂量分布双峰值间距 ( $Y_{m1} - Y_{m2}$ ) 与碳离子能量之间单调递减。考虑单楔板易出现误差，故采用双楔板将纵向剂量分布转换为横向剂量分布，统计双峰值间距，可

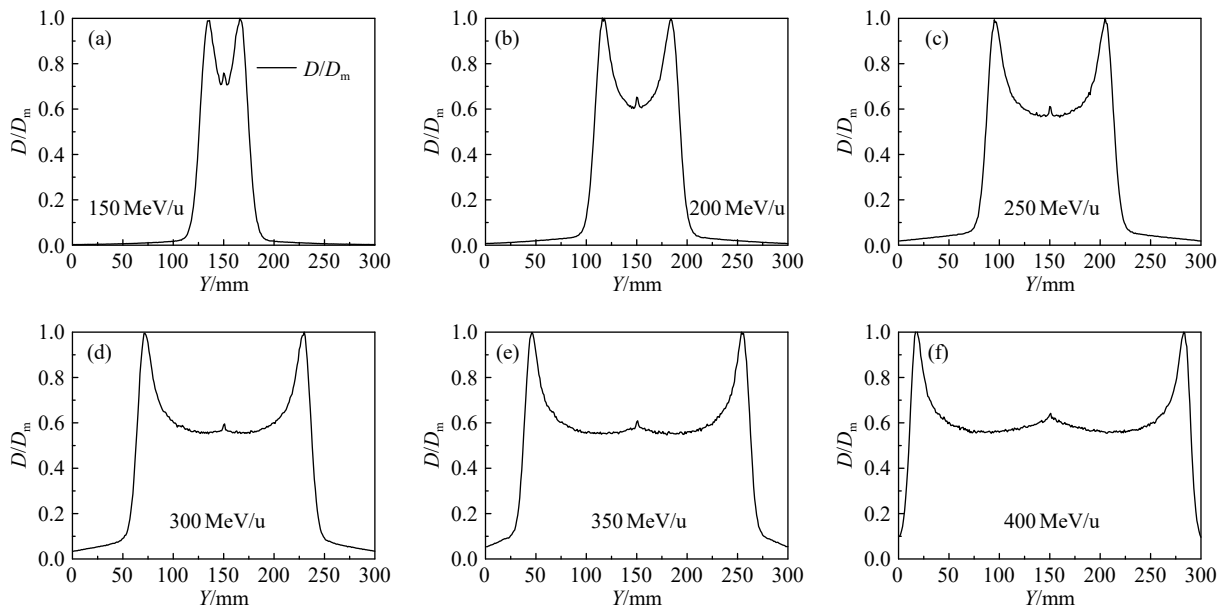


图 3 不同能量碳离子束穿越对楔板后的横向剂量分布

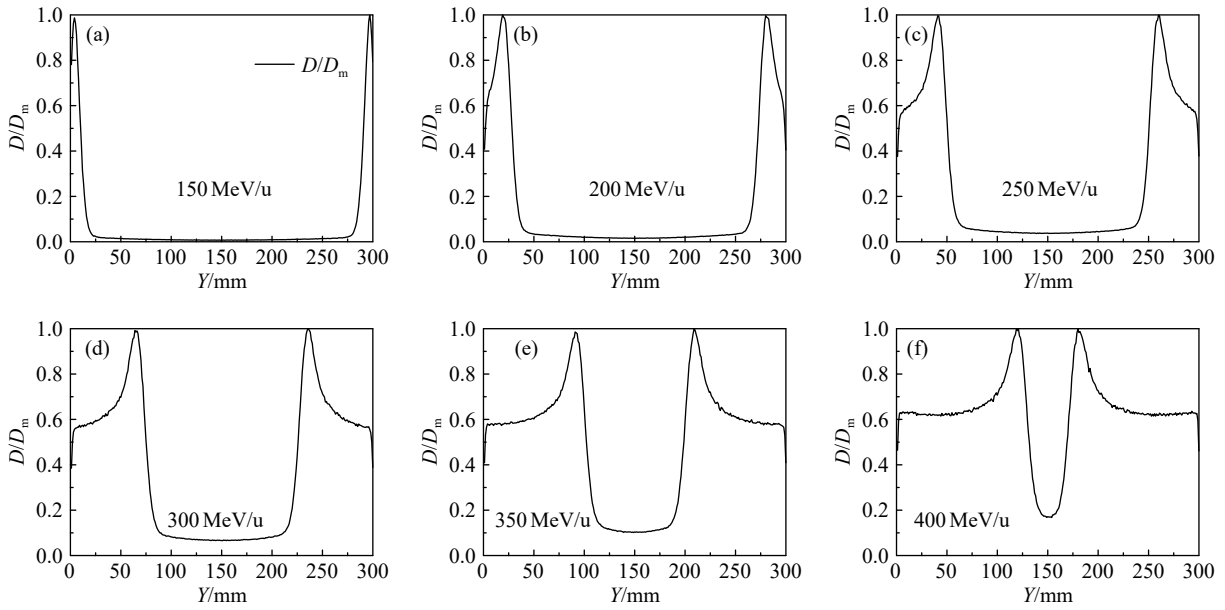


图 4 不同能量碳离子束穿越背楔板后的横向剂量分布

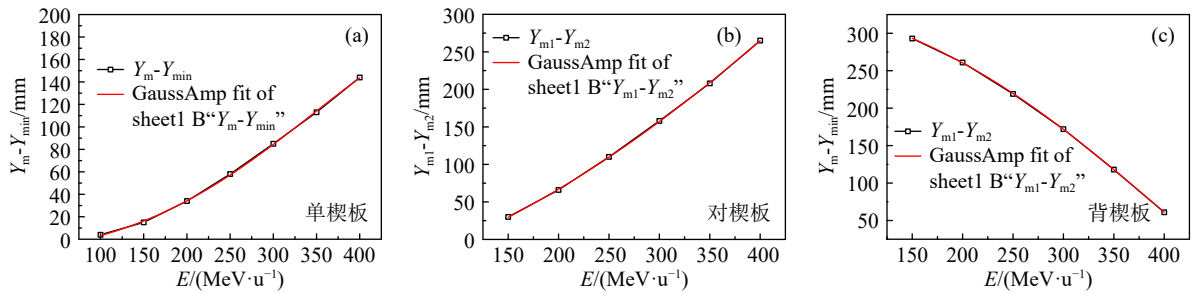


图 5 (在线彩图) 不同能量碳离子束穿越单楔板、对楔板、背楔板后横向剂量峰值间距与能量的关系

提高束流射程验证的准确度，减小误差。

将不同能量碳离子束在铝中 Bragg 峰位所处的深度分别与对楔板、背楔板情况下横向剂量分布双峰值间距进行线性拟合，结果如图 6 所示，线性回归决定系数  $R^2$  (又称拟合优度) 分别为 0.99989 和 0.99937，误差分别为 0.011% 和 0.063%。因此，在对楔板、背楔板情况下，不同能量碳离子穿越楔形装置后横向剂量分布双峰值间距与对应能量碳离子束在铝中 Bragg 峰位所处深度

成线性关系。

在大小组合楔板情况下，能量范围为 50~400 MeV/u，能量间隔为 50 MeV/u 的碳离子束，分别穿越分模体一和分模体二后，照射到水模体表面 (即图 1(c) 中红色箭头处的平面，位于 X-Y 轴方向并与大小组合楔板距离最近)。分模体一情况下，水模体表面横向剂量分布峰值出现位置与 Y 轴负方向 10 cm 处 (即模体边缘) 的距离分别是 149, 2, 12, 37.5, 68, 102, 139 和 179.5 mm；分

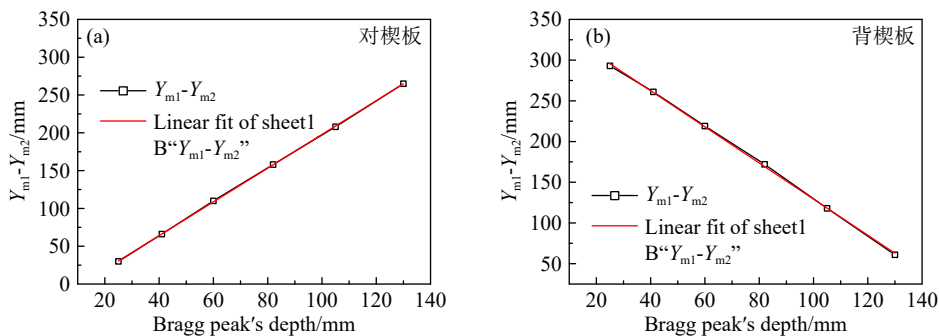


图 6 (在线彩图) 不同能量碳离子束穿越对楔板、背楔板后的横向剂量分布双峰值间距与碳离子束 Bragg 峰位所处深度的关系

模体二情况下，水模体表面碳离子横向剂量分布峰值出现位置与 Y 轴负方向 10.5 cm 处(即模体边缘)的距离分别是 52.5, 199, 187.5, 163.5, 131, 100, 60 和 20.5 mm。分模体一和分模体二合并后形成大小组合楔板，不同能

量碳离子束穿越大小组合楔板后，照射到水模体表面，表面横向(即图 1 中的 Y 轴方向)剂量分布如图 7 所示，横向剂量分布双峰值间距分别为 51.5, 197, 175, 126, 67.5, 2, 78.5 和 159.5 mm。

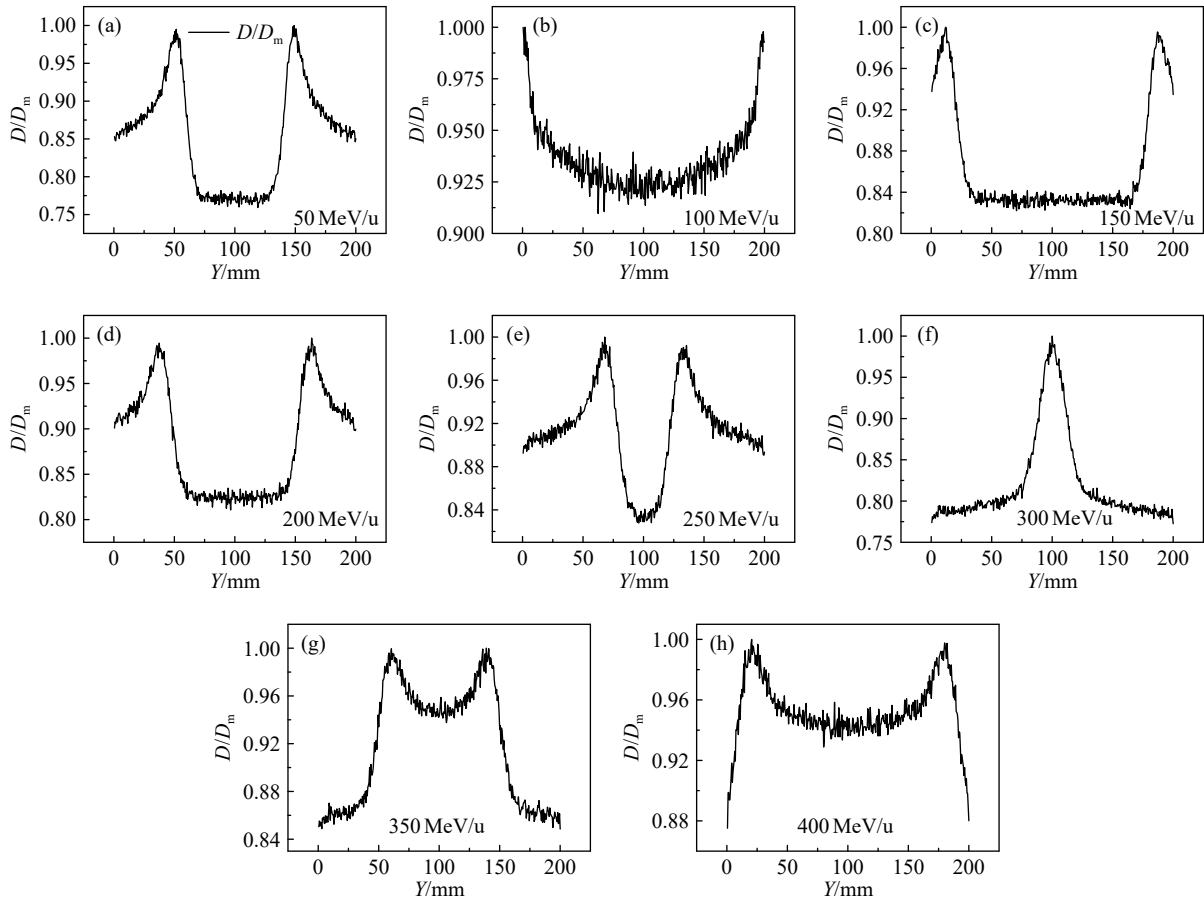


图 7 不同能量碳离子束穿越大小组合楔板后的横向剂量分布

根据以上大小组合楔板的模拟结果，能量在 50 和 100 MeV/u 的碳离子束与能量在 150, 200, 250, 300, 350 和 400 MeV/u 的碳离子束的情况不同。能量较小时，两个小楔板起主要作用，保证低能量碳离子束通过大小组合楔板后出现明显的横向剂量分布峰值的位置；两个大楔板可以保证能量范围为 150~400 MeV/u，能量间隔为 50 MeV/u 的碳离子束通过楔形装置后有横向剂量分布峰值间距，后续模拟结果分析以两个大楔板为分析对象。

分模体一、分模体二情况下，水模体表面横向剂量分布峰值出现位置与模体边缘的间距以及二者合并后大小组合楔板情况下，横向剂量分布峰值间距与不同能量的关系如图 8 所示。分模体一情况下，水模体表面横向剂量分布峰值出现位置与模体边缘的间距与碳离子束能量之间的关系呈单调递增；分模体二情况下，水模体表

面横向剂量分布峰值出现位置与模体边缘的间距与碳离子能量之间的关系呈单调递减。将分模体一和分模体二合并成大小组合楔板，横向剂量分布双峰值间距与碳离子束能量近似成 V 字型关系。

将不同能量碳离子束在铝中 Bragg 峰位所处的深度分别与分模体一、分模体二情况下水模体表面横向剂量分布峰值出现位置与模体边缘的间距进行线性拟合，二者合并形成大小组合楔板情况下，碳离子束在铝中 Bragg 峰位所处的深度与与碳离子束穿越大小组合楔板后的横向剂量分布双峰值间距进行统计如图 9 所示，分模体一和二的情况下， $R^2$  分别为 0.99995 和 0.99933，误差分别为 0.005% 和 0.067%。因此，水模体表面横向剂量分布峰值出现位置与模体边缘的间距与碳离子束在铝中 Bragg 峰位所处的深度成线性关系。二者合并后近似成 V 字型关系。

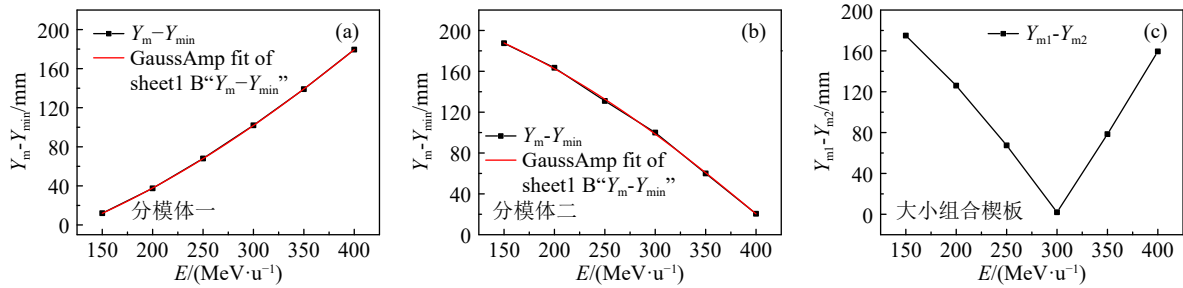


图 8 (在线彩图) 不同能量碳离子束穿越分模体一、分模体二、大小组合楔板后横向剂量峰值间距与能量的关系

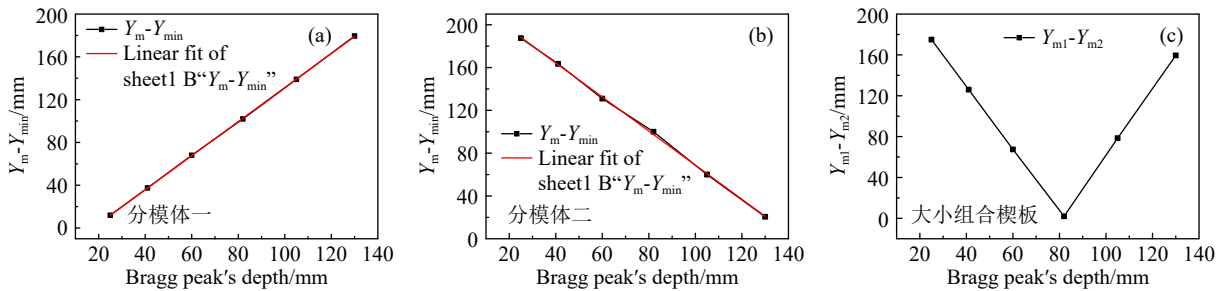


图 9 (在线彩图) 不同能量碳离子束穿越分模体一、分模体二、大小组合楔板后横向剂量峰值间距与碳离子束 Bragg 峰位所处深度的关系

### 3.3 讨论

通过本文的模拟计算可以看到, 利用双楔装置统计模体表面横向剂量分布出现两个峰值之间的距离, 与碳离子束 Bragg 峰位所处深度进行拟合后成线性关系; 大小组合楔形装置中模体表面横向剂量分布出现两个峰值之间的距离与碳离子束 Bragg 峰位所处深度也成线性关系。由于横向剂量分布双峰值间距和碳离子束 Bragg 峰位所处深度都与碳离子束能量成高斯非线性关系, 相同能量下双峰值间距与 Bragg 峰位所处深度成线性关系, 故可采用以上楔形装置将碳离子束纵向的深度剂量分布转化成横向剂量分布, 然后采用探测器对横向剂量分布进行测量, 通过本文模拟得到横向剂量峰位与能量之间的关系, 快速对碳离子束的射程进行验证, 提高重离子治疗当中束流射程 QA 验证的效率。当然, 这些关系还需要通过实验测量做进一步的确认。

在本文模拟计算的基础之上, 接下来我们会结合不同探测手段构建一套快速进行碳离子束射程 QA 验证的测量装置, 并通过实验测量, 为重离子治疗当中束流射程 QA 验证提供有效的方法和技术手段。

## 4 结论

本文采用 GATE 蒙特卡罗模拟软件, 模拟计算了不同能量碳离子束穿越铜单楔板、铝对楔板、铝背楔板和铝大小组合楔板等楔形装置后横向上的剂量分布。单楔板情况下, 横向剂量峰值出现位置与模体边缘位置的

间距与能量成单调递增; 对楔板情况下, 横向剂量分布双峰值间距与能量成单调递增; 背楔板情况下, 二者成单调递减; 大小组合楔板情况下, 二者成 V 字型关系。不同楔形装置下横向剂量分布双峰值间距与碳离子束 Bragg 峰位所处深度呈线性关系。因此, 可采用不同设置的楔形装置将碳离子束的纵向深度剂量分布转换成横向上的剂量分布, 对碳离子束射程进行快速测量与验证。本文蒙特卡罗模拟研究为后续重离子治疗中束流射程快速 QA 验证设备的构建提供了坚实的基础。

### 参考文献:

- [1] CHU W T, LUDEWIGT B A, RENNER T R. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(8): 2055.
- [2] TANDERUP K, POTTER R, LINDEGAARD J C, et al. *Radiotherapy & Oncology*, 2010, 97(3): 495.
- [3] LOEFFLER J S, DURANTE M. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2013, 10(7): 411.
- [4] BARTEN D L J, TOL J P, DAHELE M, et al. *Medical Physics*, 2015, 42(11): 6589.
- [5] JAKOBI A, KRISTIN S, BANDURSKA-LUQUE A, et al. *Acta Oncologica (Stockholm, Sweden)*, 2015, 54(9): 1.
- [6] LUO J, YAU S, WHITE S, et al. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 2012, 35(2): 237.
- [7] DENG W, LIU W, ROBERTSON DG, et al. *Medical Physics*, 2018, 45(7): 2947.
- [8] CARRIER J F, ARCHAMBAULT L, BEAULIEU L, et al. *Medical Physics*, 2004, 31(3): 484.
- [9] JAN S, BENOIT D, BECHEVA E, et al. *Physics in Medicine and Biology*, 2011, 56(4): 881.

- [10] HUANG Z X, SONG J J. Economic Research Reference, 2013(58): 38. [11] DU H Z, XIANG M. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2000(3): 15.

## Monte Carlo Study on the Method of Rapid Range Verification of Carbon Ion Beam

CHE Yuhang<sup>1,2,3,4</sup>, MENG Qianian<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Xiaofang<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Xinguo<sup>1,2,3,4</sup>,  
DAI Zhongying<sup>1,2,3,4</sup>, LI Qiang<sup>1,2,3,4,†</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Heavy Ion Radiation Biology and Medicine of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Key Laboratory of Basic Research on Heavy Ion Radiation Application in Medicine,  
Gansu Province, Lanzhou 730000, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The depth dose distribution of an ion beam (protons and heavy ions) in the longitudinal direction can be converted into a lateral dose profile via wedge devices for rapid measurement and verification on the range of the ion beam. In this work, the GEANT4 kernel-based GATE Monte Carlo simulation platform was used to calculate the depth dose distributions of various energy carbon-ion beams in materials of copper (Cu), aluminum (Al), iron (Fe) and polymethyl methacrylate (PMMA), which are usually applied to make wedge devices. The relationships between the beam energy and corresponding penetration depth of the Bragg peak position for the carbon ion beams in the various materials were obtained. The lateral dose profiles of carbon ion beams with different energies passing through a single wedge plate, a double wedge plate, and a large and small combined wedge plate were simulated and calculated under different configurations. Therefore, the relationships between the position of the peak of lateral dose and the beam range for the various energy carbon ion beams were acquired. Thus, our Monte Carlo simulations provided a substantial basis for further development of rapid range verification methods and devices in heavy ion therapy.

**Key words:** heavy ion radiotherapy; Monte Carlo simulation; wedge device; range verification; lateral dose profile

---

**Received date:** 17 Dec. 2019; **Revised date:** 19 Jan. 2020

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China(2018YFC0115700); National Natural Science Foundation of China(11875299, 61631001, U1532264)

† **Corresponding author:** LI Qiang, E-mail: [liqiang@impcas.ac.cn](mailto:liqiang@impcas.ac.cn).