



## 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

孟乾乾 张小芳 刘新国 戴中颖 李强 陈卫强

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

MENG Qianqian, ZHANG Xiaofang, LIU Xinguo, DAI Zhongying, LI Qiang, CHEN Weiqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019038>

#### 引用格式:

孟乾乾, 张小芳, 刘新国, 戴中颖, 李强, 陈卫强. 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[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(1):88–96. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019038

MENG Qianqian, ZHANG Xiaofang, LIU Xinguo, DAI Zhongying, LI Qiang, CHEN Weiqiang. Dose Variation Analysis and Position Correction Method for Carbon-ion Pencil Beams under Uniform Magnetic Fields[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(1):88–96. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019038

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 大分割碳离子放射治疗中相对生物学效应与剂量依赖关系的研究

Dependence of Relative Biological Effectiveness on Dose in Hypofractionated Carbon Ion Beam Radiotherapy

*原子核物理评论*. 2017, 34(4): 784–789 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.784>

#### 碳离子束辐照处理对牛至精油微胶囊的缓释特性及抗鸡球虫病活性的影响

Effect of Using Carbon-ion Beam Irradiation on Sustained-release Characteristic and Anti-coccidial Activity of Oregano Essential Oil Microcapsules

*原子核物理评论*. 2018, 35(2): 179–188 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.179>

#### 重离子治癌笔形束精确模型的研究进展

Research Progress on Accurate Pencil Beam Model for Heavy Ion Cancer Therapy

*原子核物理评论*. 2018, 35(1): 85–93 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.085>

#### 碳离子辐照对神经胶质瘤干细胞杀伤的研究

Study of Carbon-Ion Irradiation Killing Glioma Stem Cells

*原子核物理评论*. 2017, 34(2): 231–235 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.231>

#### 斯格明子在均匀磁场中的性质 (英文)

Skyrmion Properties in an Uniform Magnetic Field

*原子核物理评论*. 2017, 34(1): 8–12 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.01.008>

文章编号: 1007-4627(2020)01-0088-09

## 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

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>, 陈卫强<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:** 分析外加均匀磁场对于碳离子笔形束剂量分布的影响, 并考虑修正这种影响, 为磁共振成像引导碳离子放射治疗的临床应用提供指导。本文利用蒙特卡罗方法模拟计算了不同能量碳离子笔形束在不同强度磁场下的剂量分布情况, 发现垂直于碳离子束入射方向的均匀磁场对于碳离子笔形束射程缩短的影响很小, 磁场对碳离子束的主要影响是引起束流横向偏转, 特别是碳离子束布拉格峰位置的横向侧移。横向侧移程度与碳离子束的能量和磁场强度相关, 根据模拟结果, 得到了一个计算碳离子束布拉格峰在磁场中相对横向偏转的方程, 并提出一种校正外加磁场引起的碳离子束布拉格峰横移的角度修正方法。这些结果可用于指导磁共振图像引导碳离子放射治疗计划系统的研发。

**关键词:** 放射治疗; 碳离子; 蒙特卡罗方法; 磁场; 剂量分布

**中图分类号:** O571.53

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.37.2019038

### 1 引言

放射治疗, 简称放疗 (Radiation Therapy, RT), 是目前临床上治疗肿瘤的一种重要手段<sup>[1]</sup>。常规放疗主要采用高能 X/ $\gamma$  射线和高能电子束<sup>[2-3]</sup> 作为照射源, 使电离辐射最大程度聚焦于肿瘤靶区, 从而杀死肿瘤细胞。放疗经历了从三维适形放疗 (Three Dimension Radiation Therapy, 3DRT) 到调强放疗 (Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT), 再到图像引导放疗 (Image Guided Radiation Therapy, IGRT) 的发展历程。放疗技术发展的主题始终是在提高肿瘤靶区照射剂量的同时更好地保护周围正常组织器官<sup>[4]</sup>。

质子/碳离子放疗凭借独特的布拉格峰 (Bragg Peak, BP) 等物理学剂量特性, 从而能够在给予肿瘤靶区较高剂量的同时很好地保护靶区后方的危及器官<sup>[5]</sup>, 因此对于邻近危及器官的肿瘤, 质子/碳离子放疗比传统的光子放疗更有优势<sup>[6-7]</sup>。此外, 与质子束相比, 由于碳离子束是高传能线密度 (Linear Energy Transfer, LET) 射线, 从而有着更为独特的生物学优势<sup>[8]</sup>: (1) 在 Bragg 峰区具有高的相对生物学效应<sup>[9]</sup>; (2) Bragg 峰区较低的氧效应<sup>[10]</sup>; (3) 细胞辐射敏感性对细胞周期的依赖性很

小<sup>[11]</sup>; (4) 肿瘤细胞修复效应小<sup>[12]</sup>。但也正是因为质子/碳离子束尖锐的 BP, 使得质子/碳离子放疗对于患者解剖结构的变化更加敏感, 照射靶区几毫米的误差便可能导致剂量分布完全改变<sup>[13]</sup>, 因此在质子/碳离子放疗过程中实时监测患者解剖结构和肿瘤靶区的位置变化更为重要。

IGRT 技术是将医学成像技术整合到放疗设备上, 依据患者的实时解剖结构实施放疗, 从而实现高精度、高准确性的剂量输送<sup>[14]</sup>。磁共振成像 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) 具有较高的软组织对比度, 图像信息丰富, 且无电离辐射, 是一种理想的对肿瘤靶区实时成像的方式<sup>[15]</sup>。国外已有多家研究机构开展了 MRI 引导的光子放疗装置的研发, 有的装置已经应用到临床<sup>[16-19]</sup>。质子/碳离子均为带电粒子, 束流在磁场中会因洛伦兹力而发生偏转, 剂量分布改变也会更加明显, 因此研究磁场对于质子/碳离子束的剂量分布的影响, 对于今后 MRI 图像引导质子/碳离子放疗有着重要的意义。2017 年 Shao 等<sup>[20]</sup> 提出利用磁场来调制质子束流 BP 的横向位置, 从而实现在保证肿瘤部位照射剂量的同时减少对周围重要器官的辐射剂量, 这给了 MRI 引导质子/碳离子放疗新的研究方向。

收稿日期: 2019-06-06; 修改日期: 2019-07-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC0107500); 甘肃省科技重大专项计划项目 (1602FKDA005)

作者简介: 孟乾乾 (1996-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 从事重离子治疗技术基础研究; E-mail: mengqianq@impcas.ac.cn

† 通信作者: 陈卫强, E-mail: chenwq7315@impcas.ac.cn.

在国内, 阳露等<sup>[21]</sup>基于 TOPAS 蒙卡模拟软件, 模拟计算了磁场对质子束的偏转和剂量分布的影响, 发现横向磁场的存在对于质子束在深度方向影响较小, 磁场主要引起束流横向剂量侧移, 研究还发现磁场中质子束的电子回转效应 (Electron Return Effect, ERE) 并不明显。本文利用蒙特卡罗模拟软件 GATE, 定量分析不同能量碳离子束在不同磁场强度下的剂量学改变, 拟合得到一个计算碳离子束在均匀磁场中横向偏移的方程, 并提出一种修正 MRI 磁场引起碳离子束 BP 位置偏转的方法。

## 2 材料与方法

### 2.1 模拟工具

蒙特卡罗方法能够用于精确模拟粒子束的运输过程, GEANT4 是一款由欧洲核子研究组织基于 C++ 面向对象技术开发的蒙特卡罗软件包, 用于模拟粒子在物质中运输的物理过程, 现已经广泛地应用到高能物理的理论模拟计算中, 研究者发现在 GEANT4 中增加一些扩展包后, 可以将其应用到医学物理研究领域<sup>[22]</sup>。GATE 是由 OpenGATE 团队基于 GEANT4 设计的一款针对计算机断层成像的蒙特卡罗模拟平台, 其也能实现模拟粒子放疗的功能<sup>[23]</sup>。本文采用 GATE v8.2/GEANT4-10-05-patch-01 模拟平台, 模拟的物理过程调用了 GEANT4 中的强子物理模拟包: QGSP\_BERT\_HP\_EMY。

### 2.2 模型参数设置

在 150~400 MeV/u 能量范围内, 每间隔 50 MeV/u 选取一个能量进行蒙特卡罗模拟, 其覆盖了临床上常用的碳离子治疗深部肿瘤的能量范围, 并选取 5 个磁场环境 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 T 进行模拟。束流源采用内置的“TPS Pencil Beam source”, 这一内置束流源是用来模拟德国 GSI 碳离子治疗计划系统中的真实束流源<sup>[24]</sup>, 碳离子笔形束为二维高斯分布, X/Y 方向的半高宽均设置为 7.0 mm, 束流沿 Z 方向入射。水模体入射表面大小为 100 mm × 100 mm, 其中心轴与束流中心轴重合。碳离子笔形束垂直入射到水模体, 匀强磁场沿 +Y 方向均匀覆盖整个模拟空间。图 1 中白色箭头代表磁场方向, 红色箭头表示碳离子笔形束的入射方向。黄色长方体为水模体, 外面的白色正方体为模拟空间“world”, 其内设置为真空。为减少模拟计算时间, 水模体长度设置主要考虑碳离子束 BP 的深度。150, 200 MeV/u 碳离子束对应的水模体长度设置为 120 mm; 250 MeV/u 碳离子

束对应水模体长度 150 mm; 300 MeV/u 碳离子束对应水模体长度 200 mm; 350 MeV/u 碳离子束对应水模体长度 250 mm; 400 MeV/u 碳离子束对应水模体长度 300 mm。水模体内探测单元大小设置为 0.1 mm × 0.1 mm × 0.1 mm, 模拟粒子数为  $1 \times 10^7$ , 统计误差 < 0.3%, 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, 模拟时间随碳离子束能量的增加而增加。水模体内粒子的“cuts”设置为 0.1 mm, 水模体之外的粒子的“cuts”设置为 10 mm。

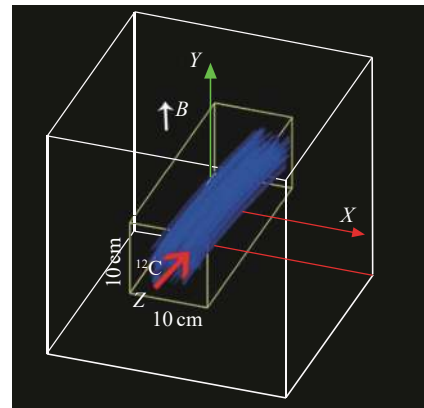


图 1 (在线彩图) GATE v8.2 中模拟模型的示意图

## 3 模拟研究结果

### 3.1 不同能量碳离子笔形束在正交磁场中的剂量分布情况

本文利用 GATE v8.2 模拟软件研究了 150, 200, 250, 300, 350, 400 MeV/u 的碳离子束分别在 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 T 均匀磁场中的剂量分布情况 (见表 1)。以下主要介绍 200, 300, 400 MeV/u 碳离子笔形束的模拟结果。

#### 3.1.1 200 MeV/u 碳离子笔形束在正交磁场中的剂量分布变化

200 MeV/u 的碳离子束在水模体中的射程为 85.9 mm。图 2 绘制了 200 MeV/u 的碳离子束在 XZ 平面上的剂量分布情况。在 XZ 平面上, 束流的 BP 位置对应一个二维坐标 (X, Z), 我们通过分析在有无磁场的情况下, 碳离子束 BP 位置的坐标改变来定量表示由磁场所引起的离子束 BP 的位置变化。X 坐标的变化量 ( $\Delta X$ ) 代表碳离子束 BP 的横向偏转程度, Z 坐标位置表示碳离子束 BP 的纵向深度, 即射程。从图 2 中可看到, 随着磁场强度的增加, 碳离子束的横向偏转越来越明显。而且, 200 MeV/u 的碳离子束 BP 位置的相对横向偏转程度

表 1 GATE v8.2 模拟的不同强度磁场下各能量碳离子束的射程 ( $R$ ) 和束流 BP 的相对横向偏转 ( $\Delta X$ ) 以及由参数方程 (1) 计算得到的相应结果 ( $\Delta X_{\max}$ )

$E/(\text{MeV/u})$	$B/\text{T}$	$R/\text{mm}$	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta X_{\max}/\text{mm}$	$E/(\text{MeV/u})$	$B/\text{T}$	$R/\text{mm}$	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta X_{\max}/\text{mm}$
150	0.5	71.6	0.4	0.3	200	0.5	85.9	0.5	0.5
150	1.0	71.6	0.8	0.5	200	1.0	85.9	1.0	1.0
150	1.5	71.6	1.1	0.8	200	1.5	85.9	1.5	1.6
150	3.0	71.5	2.3	1.6	200	3.0	85.9	3.1	3.2
250	0.5	125.9	1.0	1.0	300	0.5	170.8	1.6	1.6
250	1.0	125.9	1.9	1.9	300	1.0	170.8	3.2	3.2
250	1.5	125.8	2.8	2.9	300	1.5	170.7	4.9	4.8
250	3.0	125.7	5.8	5.8	300	3.0	170.3	9.7	9.6
350	0.5	220.0	2.4	2.4	400	0.5	273.1	3.4	3.5
350	1.0	220.0	4.9	4.9	400	1.0	273.0	7.1	7.1
350	1.5	219.9	7.5	7.4	400	1.5	272.9	10.5	10.6
350	3.0	219.3	14.8	14.7	400	3.0	272.0	21.0	21.3

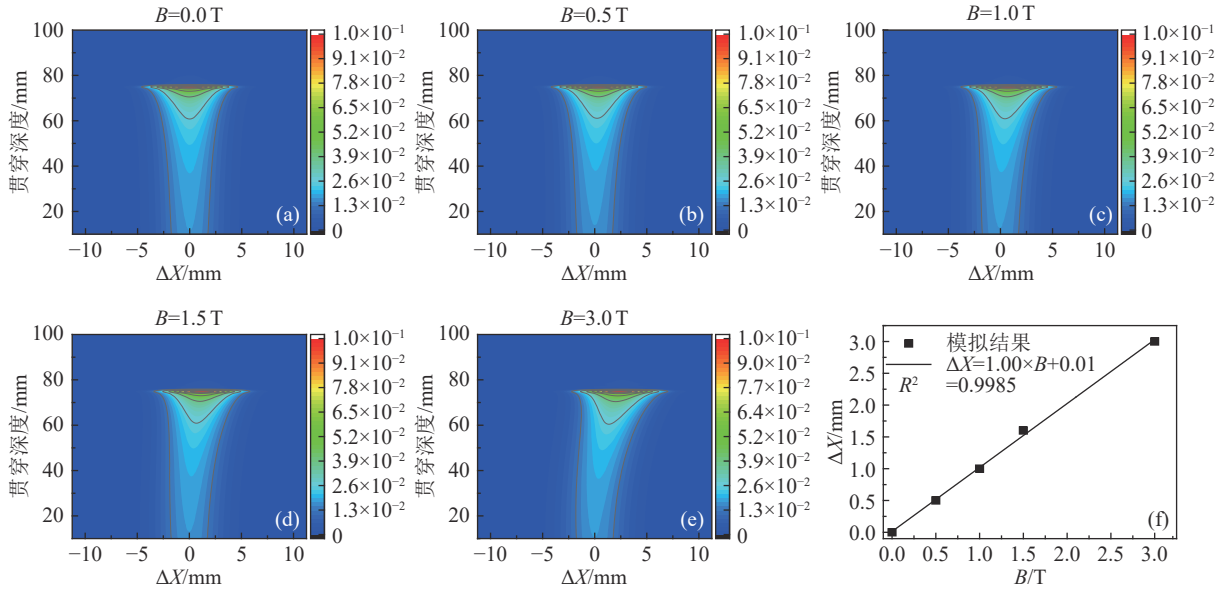


图 2 (在线彩图)200 MeV/u 碳离子束在不同强度磁场中横断面的剂量分布 (a)~(e) 及碳离子束 BP 位置的相对横向偏移程度 ( $\Delta X/\text{mm}$ ) 与磁场强度 ( $B/\text{T}$ ) 的关系 (f)

( $\Delta X/\text{mm}$ ) 与磁场强度 ( $B/\text{T}$ ) 成线性正相关 ( $R^2=0.9985$ ), 拟合结果如图 2(f) 所示。图 3(a) 绘制了 200 MeV/u 的碳离子束积分深度剂量曲线, 为了更清楚地显示束流射程的变化, 将碳离子束 BP 部分进行了局部放大, 从该图中能够看到, 随磁场强度的增加, 碳离子束的射程有缩短趋势, 但变化不明显。图 3(b) 绘制了 200 MeV/u 的碳离子束形束在各个磁场强度下 BP 位置的相对横向偏移情况, 可以看出, 0.5 T 磁场使得碳离子束 BP 的横向位置相对于 0 T 位置偏转 0.5 mm;  $B=1.0\text{T}$  时, BP 相对横向偏转 1.0 mm;  $B=1.5\text{T}$  时, BP 相对横向偏转 1.6 mm;  $B=3.0\text{T}$  时, BP 相对横向偏转 3.0 mm。

### 3.1.2 300 MeV/u 碳离子束形束在正交均匀磁场中的剂量分布变化

300 MeV/u 的碳离子束在水模体中的射程为 170.8 mm。从图 4 中可看到, 与 200 MeV/u 的碳离子束相比, 300 MeV/u 的碳离子束在磁场中的横向偏转情况更明显。这一能量的碳离子束 BP 位置的相对横向偏转程度 ( $\Delta X/\text{mm}$ ) 与磁场强度 ( $B/\text{T}$ ) 也成强线性相关 ( $R^2=0.9999$ ), 拟合结果如图 4(f) 所示。从图 5(a) 中的积分深度剂量曲线上也可见, 随着磁场强度增加, 碳离子束射程有缩短趋势, 但变化仍不明显。  $B=0\sim 1.5\text{T}$  时, 碳离子束射程变化  $\leq 0.1\text{ mm}$ ,  $B=3\text{T}$  时, 碳离子束射程缩短 0.5 mm。图 5(b) 绘制了 300 MeV/u

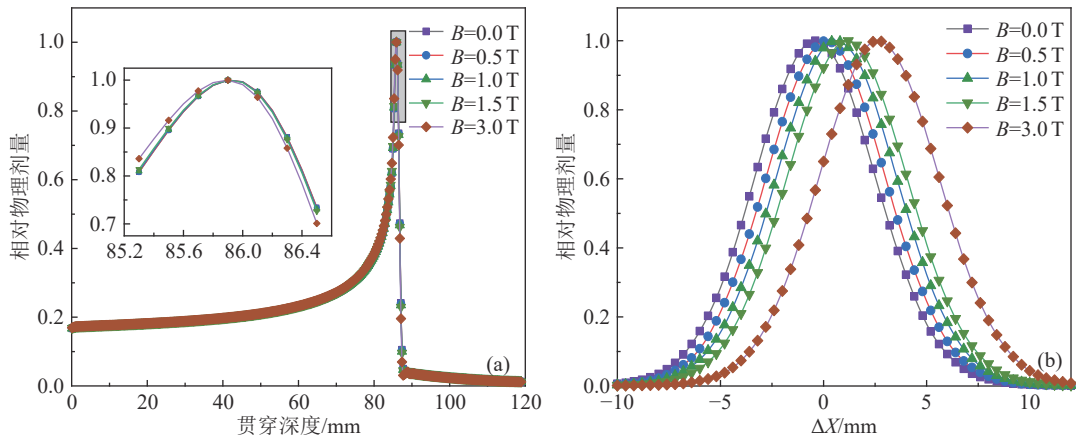


图 3 (在线彩图) 200 MeV/u 碳离子束积分深度剂量曲线 (a) 及碳离子束 BP 位置的相对横向剂量分布 (b)

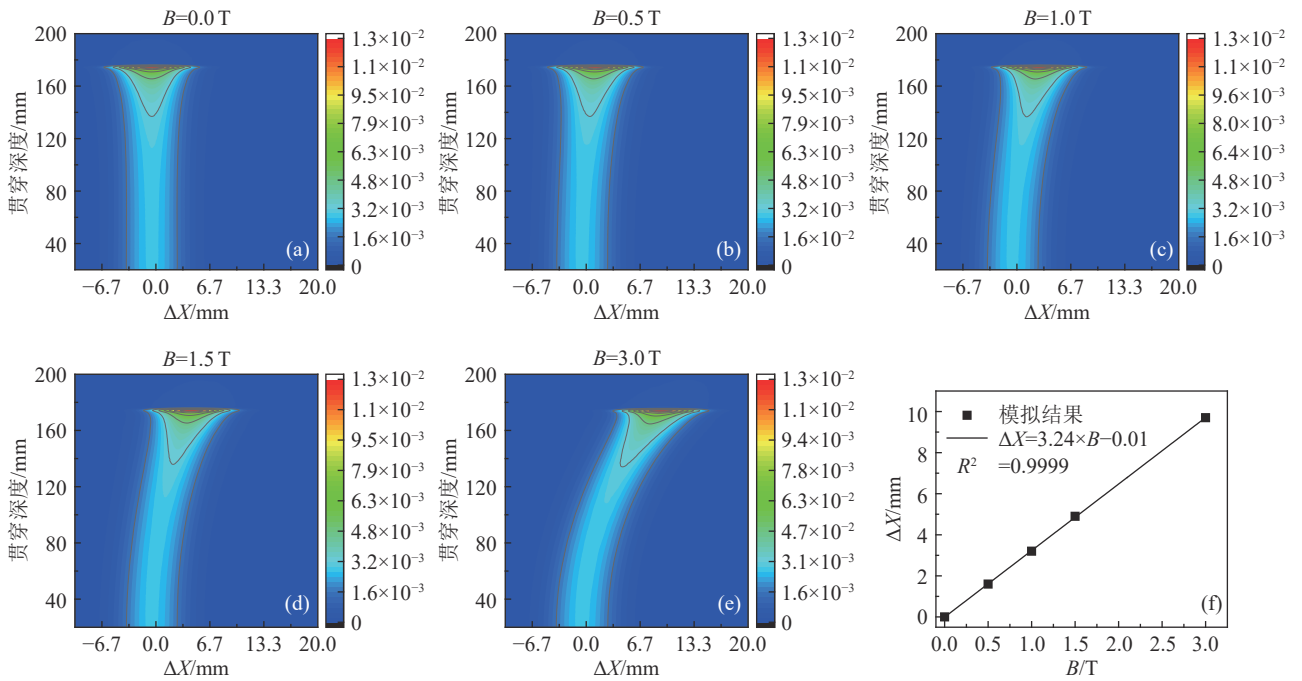


图 4 (在线彩图) 同图 2, 但能量为 300 MeV/u 碳离子

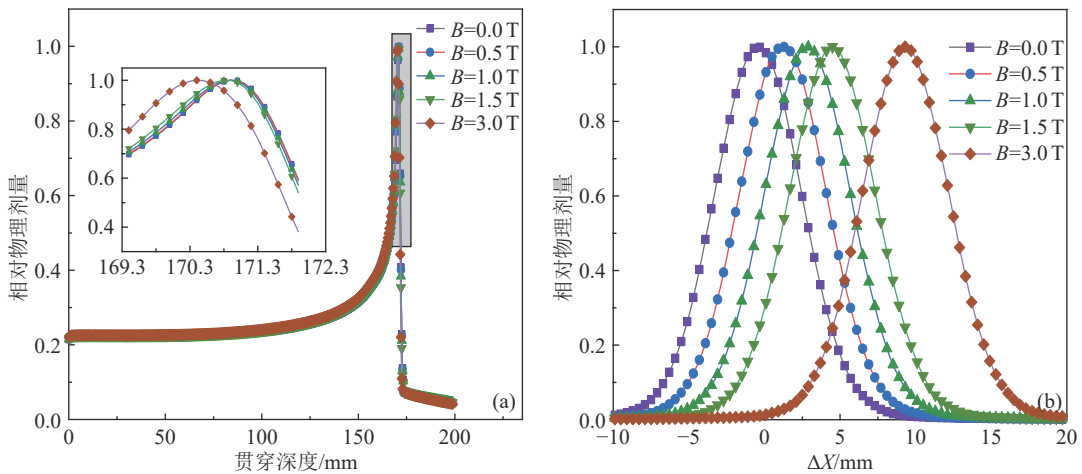


图 5 (在线彩图) 同图 3, 但能量为 300 MeV/u 碳离子

的碳离子笔形束在各个磁场强度下BP位置的相对横向偏移情况, 图中显示, 0.5 T 磁场使得碳离子束BP位置相对横向偏转 1.6 mm;  $B=1.0$  T 时, BP 相对横向偏转 3.0 mm;  $B=1.5$  T 时, BP 相对横向偏转 4.9 mm;  $B=3.0$  T 时, BP 相对横向偏转 9.7 mm。

### 3.1.3 400 MeV/u 碳离子笔形束在正交均匀磁场中的剂量分布变化

400 MeV/u 的碳离子束在水模体中的射程为 273.1 mm。从图 6 中可看到, 400 MeV/u 的碳离子束在磁场中的横向偏移进一步增加。碳离子束BP位置的相对横向偏转程度 ( $\Delta X/\text{mm}$ ) 与磁场强度 ( $B/\text{T}$ ) 仍为强线性相关 ( $R^2=0.9999$ ), 拟合结果如图 6(f) 所示。从图 7(a) 中的积分深度剂量曲线上可看到, 随磁场强度的增加, 碳离

子束的射程逐渐缩短, 但变化  $\leq 1.1$  mm。  $B=0.5$  T 时, 碳离子束射程缩短  $\leq 0.1$  mm;  $B=1.0$  T 时, 射程缩短 0.1 mm;  $B=1.5$  T 时, 射程缩短 0.2 mm;  $B=3.0$  T 时, 碳离子束射程缩短 1.1 mm。图 7(b) 绘制了 400 MeV/u 碳离子笔形束在各个磁场强度下BP位置的相对横向偏移情况, 可以看出, 0.5 T 磁场使得碳离子束BP位置相对横向偏转 3.4 mm;  $B=1.0$  T 时, BP 相对横向偏转 7.2 mm;  $B=1.5$  T 时, BP 相对横向偏转 10.5 mm;  $B=3.0$  T 时, BP 相对横向偏转 21.0 mm。

### 3.2 模拟结果分析汇总

根据 3.1.1~3.1.3 的模拟结果, 正交磁场的存在对碳离子束的主要影响是引起束流横向偏转, 除 3.0 T 磁场可引起 400 MeV/u 碳离子束射程缩短 1.1 mm 外, 3.0 T

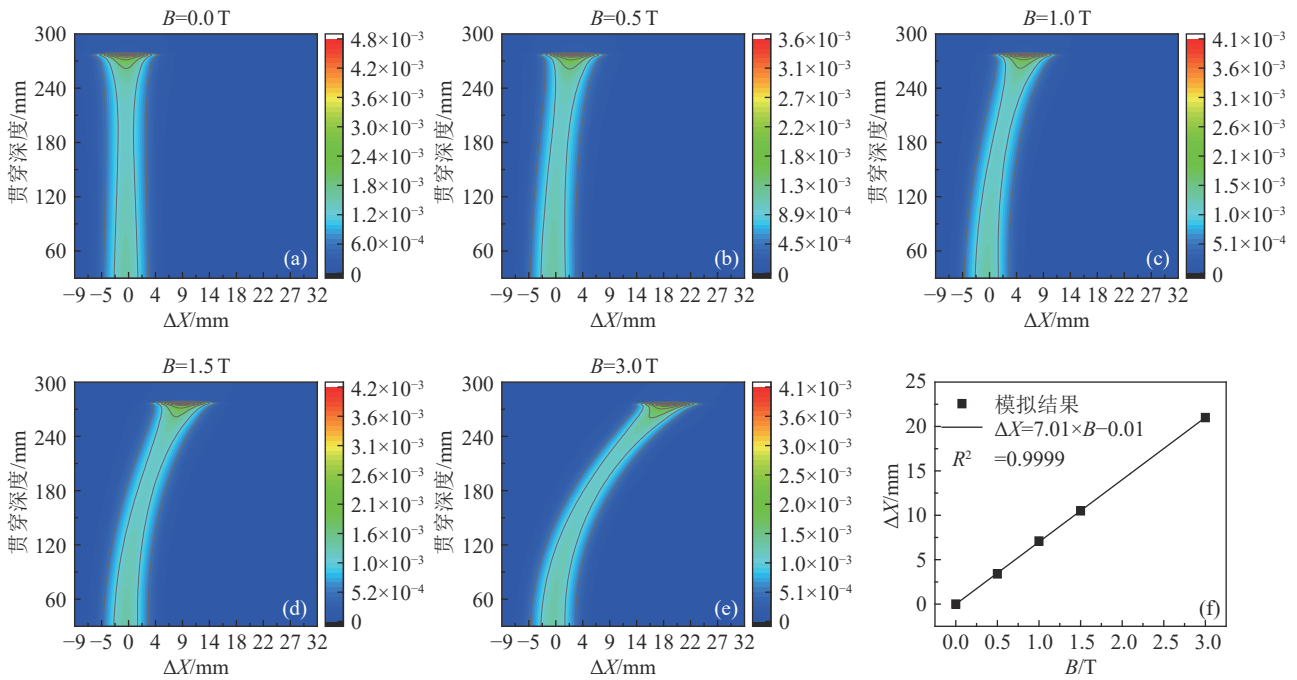


图 6 (在线彩图) 同图 2, 但能量为 400 MeV/u 碳离子

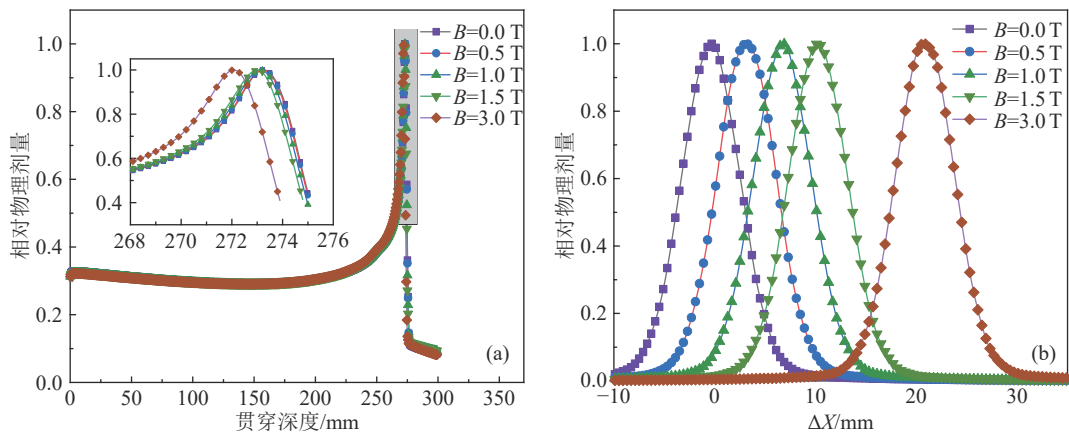


图 7 (在线彩图) 同图 3, 但能量为 400 MeV/u 碳离子

以内的磁场对临床常用的碳离子能量的射程缩短均在 1.0mm 以内。通过对 150, 200, 250, 300, 350, 400 MeV/u 的碳离子束分别在 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 T 磁场中的剂量分布进行蒙特卡模拟, 我们得到各个能量碳离子束形束在不同磁场中的射程 ( $R/\text{mm}$ ) 和 BP 相对横向偏移 ( $\Delta X/\text{mm}$ ) 的结果, 如表 1 所列, 这与阳露 [25] 用 TOPAS 软件模拟的碳离子束在磁场中的射程缩短和横向偏移情况相一致。我们参考 Birgani 等 [26] 建立的磁场中质子束 BP 位置的横向偏移与束流能量和磁场强度的函数关系, 对模拟结果进行参数拟合, 得到了计算碳离子束形束 BP 位置的相对横向偏移程度与碳离子束能量及磁场强度相关的参数方程 (1):

$$\Delta x_{\max}(B, E) = a_1 E^{-5.14} B^2 + a_2 E^{2.76} B + a_3 E^{4.33}, \quad (1)$$

其中  $a_1 = 3.50 \times 10^9$ ,  $a_2 = 4.68 \times 10^{-7}$ ,  $a_3 = -2.52 \times 10^{-13}$ 。E 的单位是 MeV/u, B 的单位是 T, 计算得到的束流 BP 相对横向偏移  $\Delta x_{\max}$  的单位是 mm。通过该方程可以计算特定能量的碳离子束在某一磁场强度下水模体中 BP 位置的相对横向偏移程度。因上述方程的参数仅保留三位有效数字, 所以在计算低能量碳离子束在磁场中的小幅偏转时, 计算结果有一定误差, 这点在应用时需要考虑。以蒙特卡罗模拟结果为标准, 由上述参数方程计算得到的碳离子束 BP 位置的横向偏移的误差最大值为 0.7 mm, 对应于 3.0 T 磁场中的 150 MeV/u 碳离子束; 其余情况位置误差均  $\leq 0.3$  mm, 如表 1 所列。

#### 4 正交磁场对碳离子束 BP 横向偏转的一种角度修正方法

假设碳离子束在正交磁场中的射程基本不发生变化 (1 mm 以内)。将碳离子束入射水模体表面的位置设为 A 点, 无磁场时, 碳离子束 BP 位置设为 C 点, 有磁场时, 碳离子束 BP 位置设为 B 点。连接 A, B 与 A, C 两点, AB 与 AC 两线夹角为  $\phi$ , 如图 8 所示。无磁场时, 碳离子束沿 AC 方向前进, BP 落在 C 点; 有磁场时, 假设碳离子束沿图 8 中红色虚线前进, BP 落在 B 点, 那么 AB 连线可近似看作修正前磁场中碳束流轨迹的切线。我们设想在入射碳离子束时, 给碳离子束一个反向偏转角, 只要角度适当, 理想情况下, 修正后的碳离子束会沿图 8 中绿色实线前进, BP 重新落在 C 点 (忽略束流射程的变化)。从图 8 中可以看到, 此时 AC 线成为修正后碳束流轨迹的切线, 而且我们可以发现, 碳离子束修正前轨迹的切线 AB 与修正后轨迹的切线 AC 间的夹角  $\phi$ , 即为我们所要求的碳离子束入射修正角度。

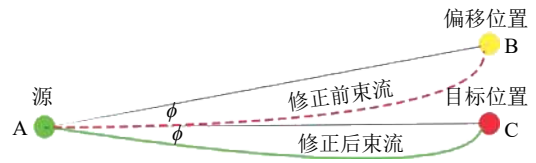


图 8 (在线彩图) 磁场中碳离子束偏转的角度修正模式图

计算  $\phi$  的方法由 GATE 模拟软件可以得到 A, B, C 三点的坐标, 利用三角函数关系, 易知  $\phi$  角即为直角三角形 ACB 的正切值, 利用反三角函数公式即可求得  $\phi$  值:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\Delta X}{Z}, \quad (2)$$

$\Delta X$  为束流 XZ 平面上 B, C 两点 X 坐标之差, Z 为 C 点的 Z 坐标值。

我们利用上述修正角度的计算方法, 分别计算了 150, 200, 250, 300, 350, 400 MeV/u 的碳离子束分别在 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 T 磁场中的修正角度。发现在同一磁场强度下, 碳离子束的入射修正角度 ( $\phi$ ) 随束流射程的变化 (本文指束流 BP 的深度,  $R/\text{mm}$ ) 成线性相关, 如图 9 所示。我们把用式 (2) 计算得到的束流修正角度  $\phi$  代入 GATE 软件内的束流源文件中, 再次进行蒙特卡模拟, 得到了修正后不同能量碳离子束在各个磁场强度下的射程和 BP 位置的相对横向位置偏差, 见表 2。以 400 MeV/u 的碳离子束角度修正为例, 绘制了修正后碳束流 XZ 平面的剂量分布和 BP 位置的横向剂量分布, 如图 10 所示。模拟结果显示, 我们提出的角度修正方法能够很好地修正磁场中碳离子束 BP 位置的变化, 对于 400 MeV/u 的碳离子束, 与无磁场时相比, 修正后碳离子束的射程缩短  $\leq 0.2$  mm, BP 位置的横向偏转  $\leq 0.2$  mm。

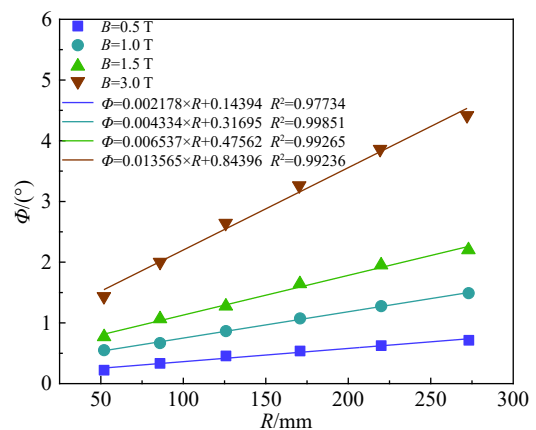


图 9 (在线彩图) 不同磁场强度中碳离子束入射修正角度与束流射程的关系

表 2 角度修正后不同强度磁场下各能量碳离子束的射程 ( $R$ ) 和 BP 的相对横向位置 ( $\Delta X$ )

$E/(\text{MeV/u})$	$B/\text{T}$	$R/\text{mm}$	$\Delta X/\text{mm}$	$E/(\text{MeV/u})$	$B/\text{T}$	$R/\text{mm}$	$\Delta X/\text{mm}$
150	0.5	52.0	0.0	200	0.5	85.9	0.0
150	1.0	52.0	0.0	200	1.0	85.9	0.0
150	1.5	52.0	0.0	200	1.5	85.9	-0.1
150	3.0	52.0	0.0	200	3.0	85.9	0.1
250	0.5	125.9	0.0	300	0.5	170.8	0.1
250	1.0	125.9	0.1	300	1.0	170.8	-0.1
250	1.5	125.9	0.2	300	1.5	170.8	-0.1
250	3.0	125.9	0.1	300	3.0	170.8	0.1
350	0.5	220.1	0.0	400	0.5	273.1	0.2
350	1.0	220.1	0.0	400	1.0	273.1	-0.1
350	1.5	220.1	-0.1	400	1.5	273.1	0.1
350	3.0	220.0	0.0	400	3.0	272.9	0.1

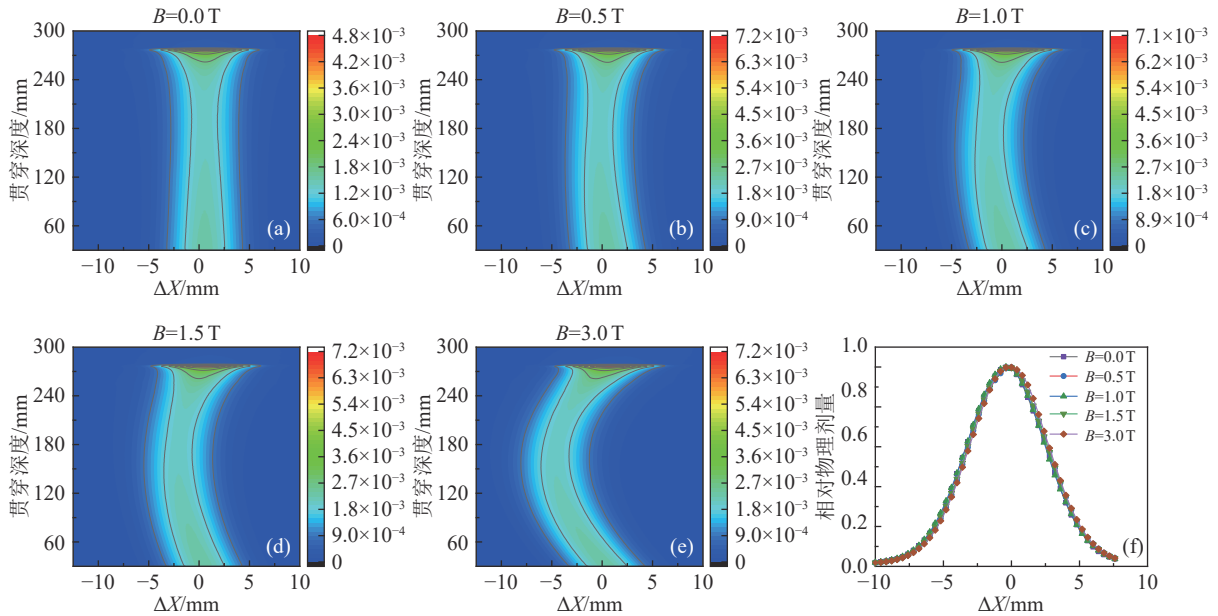


图 10 (在线彩图) 同图 2, 但为角度修正后的 400 MeV/u 碳离子

### 5 讨论

利用 GATE 软件中内置的笔形束源文件, 模拟了 150~400 MeV/u 碳离子束在临床常用 MRI 磁场强度范围内 (0.5~3.0 T) 的剂量分布情况。模拟结果表明, 正交磁场对碳离子束积分深度剂量曲线影响较小, 碳离子束的射程缩短最大为 1.1 mm。正交磁场对于碳离子束的影响主要是引起束流的横向侧移, 在临床剂量学中要特别关注碳离子束 BP 位置的变化。BP 横向侧移的程度与碳离子束的能量和磁场强度相关。束流能量越高, 射程也就越长, 从而在磁场中受到洛伦兹力的影响也就越明显。400 MeV/u 的碳束流在 3.0 T 磁场强度下, 可引起碳离子束 BP 位置的相对横向偏转达 21.0 mm。这

些结果与阳露等 [21] 用 TOPAS 软件模拟磁场中质子束的侧向偏转和射程变化一致。但碳离子的荷质比是质子的 1/2, 洛伦兹力的回旋半径更大, 因此束流射程相同, 磁场引起的横向偏移更小; 而且与质子束相比, 碳离子束在正交磁场存在时的束流射程缩短更小。

我们根据 GATE 软件的模拟结果, 参考 Birgani 等 [24] 建立的计算质子束横向偏转与束流能量和磁场强度的函数关系, 建立了一个计算碳离子束 BP 位置在磁场中横向偏转的方程。此外, 我们根据 GATE 模拟软件得到的磁场中碳离子束 BP 的偏转情况, 提出了一种通过改变碳离子束的入射角度来修正正交磁场中碳离子束 BP 位置的偏转, 并给出了计算修正角度的方法。这种角度修正可以通过碳离子束主动式扫描系统中的扫描



磁铁装置来实现<sup>[27]</sup>, 这一方法有望应用到MRI图像引导的碳离子放射治疗计划系统中。

## 6 结论

采用GATE v8.2/GEANT4-10-05-patch-01蒙特卡罗软件模拟了150~400 MeV/u碳离子笔形束在不同磁场强度下于水中的剂量分布情况, 发现正交匀强磁场对碳离子束的射程影响很小, 400 MeV/u的碳离子束在3.0 T磁场中的最大射程缩短仅为1.1 mm。正交磁场对碳离子束的影响主要是引起束流的横向偏移, 400 MeV/u的碳离子束在3.0 T磁场中的布拉格峰位置的相对横向偏转可达21.0 mm。对于同一能量的碳离子束, 束流布拉格峰位置的横向侧移随着磁场强度的增加而增大, 横向位置侧移程度与磁场强度近似成线性关系。正交磁场对于碳离子束布拉格峰的横向偏转可通过改变束流入射角度进行修正, 修正后磁场中碳离子束布拉格峰位置与无磁场时最大偏差小于1 mm。通过本文的研究, 我们认为MRI图像引导碳离子放疗相对于MRI图像引导质子放疗, 或许会更容易实现, 且束流位置定位精度更高。本文得到的结果在将来可用于指导MRI图像引导碳离子放疗研究。

### 参考文献:

- [1] XU Junkuai, DANG Bingrong, CHEN Ximen, et al. *Nuclear Physics Review*, 2009, 26(2): 163. (in Chinese)  
(徐俊奎, 党秉荣, 陈熙萌, 等. *原子核物理评论*, 2009, 26(2): 163.)
- [2] CHU W T, LUDEWIGT B A, RENNER T R. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(8): 2055.
- [3] BRAHME A. *Acta Oncologica*, 1987, 26(6): 403.
- [4] KHAN FHAIZ M. *Physics of the Radiation Therapy*[M]. 4<sup>th</sup> ed. Alphen aan den Rijn: Wolters Kluwer Health, 2010.
- [5] SCHULZERTNER D, OLIVER JÄKEL, SCHLEGEL W. *Seminars in Radiation Oncology*, 2006, 16(4): 249.
- [6] BARTEN D L J, TOL J P, DAHELE M, et al. *Medical Physics*, 2015, 42(11): 6589.
- [7] JAKOBI A, KRISTIN STÜTZER, BANDURSKA-LUQUE A, et al. *Acta Oncologica (Stockholm, Sweden)*, 2015, 54(9): 1.
- [8] DANG B R, LI W J, MA Q F, et al. *Nuclear Physics Review*, 2005, 22(1): 44. (in Chinese)  
(党秉荣, 李文建, 马秋峰, 等. *原子核物理评论*, 2005, 22(1): 44.)
- [9] AUFDERHEIDE E, RINK H, HIEBER L, et al. *International Journal of Radiation Biology*, 1987, 51(5): 779.
- [10] LIU Xinguo. Study on the Treatment Planning System and Its Related Issues within the Framework of the HIRFL Passive Beam Delivery System[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics), 2010: 9. (in Chinese)  
(刘新国. 基于HIRFL被动式束流配送系统的重离子治疗计划系统及相关问题研究[D]. 兰州: 中国科学院研究生院(近代物理研究所), 2010: 9.)
- [11] FOKAS E, KRAFT G, AN H, et al. *Biochim Biophys Acta*, 2009, 1796(2): 216.
- [12] THILO ELSASSER, SCHOLZ M. *Radiation Research*, 2007, 167(3): 319.
- [13] LOMAX A J. *Physics in Medicine & Biology*, 2015, 53(4): 1043.
- [14] JAFFRAY, DAVID A. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2012, 9(12): 688.
- [15] SHAO Yuhui, FU Jie. *Chinese Computed Medical Imaging*, 2016, 22(5): 491. (in Chinese)  
(邵雨卉, 付杰. *中国医学计算机成像杂志*, 2016, 22(5): 491.)
- [16] KEALL P J, BARTON M, CROZIER S. *Semin Radiat Oncol*, 2014, 24(3): 203.
- [17] FALLONE, GINO B. *Seminars in Radiation Oncology*, 2014, 24(3): 200.
- [18] LAGENDIJK J J, RAAYMAKERS B W, VAN V M. *Seminars in Radiation Oncology*, 2014, 24(3): 207.
- [19] MUTIC S, DEMPSEY J F. *Seminars in Radiation Oncology*, 2014, 24(3): 196.
- [20] SHAO W, TANG X, BAI Y, et al. *Medical Physics*, 2017, 44(10): 5325.
- [21] YANG Lu, LIU Hongdong, CHEN Zhi, et al. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2017, 34(3): 217. (in Chinese)  
(阳露, 刘红冬, 陈志, 等. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(3): 217.)
- [22] CARRIER J F, ARCHAMBAULT L, BEAULIEU L, et al. *Medical Physics*, 2004, 31(3): 484.
- [23] JAN S, BENOIT D, BECHEVA E, et al. *Physics in Medicine and Biology*, 2011, 56(4): 881.
- [24] HABERER T, BECHER W, SCHARDT D, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1993, 330(1-2): 296.
- [25] YANG Lu. Investigation of the Impact of Magnetic Field on Multi-Particle Radiation Dose in MRIgRT Using Monte Carlo Software TOPAS[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 29. (in Chinese)  
(阳露. 利用蒙特卡罗软件TOPAS研究MRIgRT中磁场对多粒子辐射剂量的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 29.)
- [26] BIRGANI M J T, CHEGENI N, ZABIHZADEH M, et al. *Electronic Physician*, 2017, 9(12): 5932.
- [27] SCHELLHAMMER S M, HOFFMANN A L. *Physics in Medicine & Biology*, 2017, 62(4): 1548.

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

MENG Qianqian<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>, CHEN Weiqiang<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 influence of uniform magnetic fields on the dose distribution of carbon-ion pencil beams is analyzed, and the influencing effect is corrected to provide guidance for the clinical application of MRI-guided carbon ion radiotherapy. In this study, the Monte Carlo method was used to simulate the dose distribution of carbon-ion pencil beams with different energies under different magnetic fields. We found that the transverse uniform magnetic fields had little effect on the range shortening of the carbon-ion pencil beams, but had obvious impact on the lateral shift, especially at the Bragg peak of the carbon-ion beams. The lateral shift was related to the carbon-ion beam energy and magnetic field strength. According to the simulation results, we obtained an equation for calculating the lateral shift of carbon-ion beams under the magnetic fields, and proposed an angle correction method to reposition the Bragg peak of carbon-ion beams. These results will be used to MRI-guided carbon ion radiotherapy in the future.

**Key words:** radiotherapy; carbon-ion pencil beam; Monte Carlo method; magnetic field; dose distribution

---

**Received date:** 06 Jun. 2019; **Revised date:** 15 Jul. 2019

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China(2017YFC0107500); Major Science and Technology Project of Gansu Province(1602FKDA005)

† **Corresponding author:** CHEN Weiqiang, E-mail: [chenwq7315@impcas.ac.cn](mailto:chenwq7315@impcas.ac.cn).