



## 重离子加速器示范装置被动式束流配送系统次级中子特征的蒙特卡罗研究

黄盛聪 张晖 车宇航 刘新国 陈卫强 李强 戴中颖

### Monte Carlo Study on the Characteristics of Secondary Neutrons in Passive Beam Delivery System of Heavy Ion Medical Machine

HUANG Shengcong, ZHANG Hui, CHE Yuhang, LIU Xingguo, CHEN Weiqiang, LI Qiang, DAI Zhongying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021033>

引用格式:

黄盛聪, 张晖, 车宇航, 刘新国, 陈卫强, 李强, 戴中颖. 重离子加速器示范装置被动式束流配送系统次级中子特征的蒙特卡罗研究[J]. 原子核物理评论, 2022, 39(1):114–120. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021033

HUANG Shengcong, ZHANG Hui, CHE Yuhang, LIU Xingguo, CHEN Weiqiang, LI Qiang, DAI Zhongying. Monte Carlo Study on the Characteristics of Secondary Neutrons in Passive Beam Delivery System of Heavy Ion Medical Machine[J]. Nuclear Physics Review, 2022, 39(1):114–120. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021033

## 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>

#### 碳离子束射程快速验证方法的蒙特卡罗模拟研究

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

原子核物理评论. 2020, 37(4): 901–907 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019064>

#### 基于LNDM模型的碳离子束混合辐射场相同剂量平均LET下关键纳剂量学指标及RBE分析

Analysis on the Key Nanodosimetric Indexes and RBE in Mixed Carbon Ion-beam Irradiation Fields with the Same Dose-averaged LET Value on LNDM Model

原子核物理评论. 2021, 38(3): 332–338 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021013>

#### 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>

#### 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>

#### 重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector

原子核物理评论. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

文章编号: 1007-4627(2022)01-0114-07

# 重离子加速器示范装置被动式束流配送系统次级中子特征的蒙特卡罗研究

黄盛聪<sup>1,2,3,4</sup>, 张晖<sup>1,2,3,4</sup>, 车宇航<sup>1,2,3,4</sup>, 刘新国<sup>1,2,3,4</sup>, 陈卫强<sup>1,2,3,4</sup>, 李强<sup>1,2,3,4</sup>, 戴中颖<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医学重点实验室, 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:** 在碳离子放射治疗中, 碳离子束在剂量配送过程中会与束流输运线相互作用, 形成以中子辐射为主的外辐射场。由于中子是高LET射线, 具有较高的相对生物学效应, 减少碳离子放疗中产生的次级中子有助于降低放疗后正常组织并发症几率及二次肿瘤风险。利用蒙特卡罗方法对保守情况(能量为400 MeV/u, 多叶光栅完全闭合)下碳离子治疗被动式束流配送系统引发的外源性中子在等中心点周围不同位置的注量谱及剂量当量谱进行模拟计算, 评估了次级中子辐射的剂量当量贡献; 同时探究了多元限束装置即多叶光栅不同开口大小对次级中子剂量当量的影响。模拟结果显示: 高能中子( $\geq 15$  MeV)对所有模拟位置的中子剂量当量占比最高可达26%。实际治疗条件下, 当多叶光栅开口由闭合状态扩大至15 cm $\times$ 15 cm, 等中心点和横向远端位置的次级中子剂量当量强度下降约85%, 而束流方向远端位置下降约70%。这些结果可用于指导不同治疗条件下次级中子的研究, 为治疗条件下评估患者所受非治疗辐射提供依据。

**关键词:** 碳离子放射治疗; 被动式束流配送; 次级中子; 蒙特卡罗方法

**中图分类号:** R815.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.39.2021033

## 1 引言

近年来, 由于重离子束射线在放射物理学、放射生物学及临床治疗上独具优势, 重离子(如碳离子)放射治疗越来越受关注<sup>[1-2]</sup>。在重离子放疗中, 束流配送系统有两种方式: 被动式与主动式<sup>[3-7]</sup>。二者的主要区别在于束流的适形方式, 前者使用配置的硬件设备对束流进行束流调制和调节, 而后者通过加速器的主动控制引导笔形束进行适形。重离子被动式束流配送技术通常利用脊形过滤器在纵向上将尖锐的Bragg峰展宽成适合等能量断层的宽度, 结合射程移位器调节Bragg峰相对肿瘤靶区的位置, 横向上配合多叶准直系统进行照射野构型。被动式束流配送技术因其技术成熟可靠、耗时短、对靶区运动不敏感、抗干扰能力强等优点, 目前处于广泛应用中<sup>[8]</sup>。但在放疗过程中, 粒子束治疗用部件(多叶光栅、准直器、过滤器、探测器等)在束流调制调节过程中与束流相互作用, 不可避免会产生中子、电子和光子

等次级辐射, 使放疗患者接受不必要的非治疗辐射<sup>[9]</sup>。由于中子探测手段繁琐间接, 低剂量中子辐射探测精度要求高, 次级中子非治疗辐射的剂量贡献评估无法直观地表现出来, 其在放射治疗临床实践中重视程度不够。但有研究表明放疗中次级中子的能量分布相当宽: 对于高能光子( $>10$  MeV)放疗, 设备产生的次级中子最大能量为18~20 MeV(主要集中于1 MeV, 极少部分是大于10 MeV); 对于碳离子治疗, 产生次级中子的最高能量可达入射束流能量的两倍, 约1 000 MeV左右<sup>[10-11]</sup>。考虑到中子属于高LET辐射, 具有较高的相对生物学效应, 低剂量的次级中子仍然会产生较大的影响, 减少放疗中产生的次级中子有助于降低放疗后正常组织并发症几率及二次肿瘤风险, 其辐射特征及剂量贡献应在临床实践中引起重视; 因此, 评估碳离子放疗次级中子辐射特征有着非常重要的实际意义<sup>[12]</sup>。

现有质子碳离子治疗终端中子周围剂量当量测量时, 常使用宽能中子球谱仪(WENDI-II)或扩展邦纳球谱仪

收稿日期: 2021-04-13; 修改日期: 2021-05-06

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC0115700, 2018YFC0115702); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2017454)

作者简介: 黄盛聪(1996-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 从事重离子束治疗技术基础研究; E-mail: huangshengcong@impcas.ac.cn

† 通信作者: 戴中颖, E-mail: daizhongying@impcas.ac.cn.

(EBSS)<sup>[13-16]</sup>。前者仅提供剂量当量而不提供中子能谱，无法获取次级中子详细信息；后者测量时，根据中子能区的不同需要更换慢化体，使用方法较为繁琐，无法进行多位置大规模的测量。因此使用蒙特卡罗方法获取治疗终端不同位置的中子注量能谱是一种较为简便易行的方法。Xu等<sup>[17]</sup>使用FLUKA对碳离子束轰击组织等效材料产生的次级中子场进行模拟，统计了空间内不同立体角的中子剂量以及组织中碎片反应产生的中子剂量。研究发现碳离子轰击组织等效材料的次级中子剂量与实验测量数据一致，组织中碎片反应产生的中子剂量占比不到碳离子总沉积剂量的1%。该研究主要考虑组织等效材料产生的内源性中子影响，在模拟中简化了束流线，未能揭示被动式束流配送系统带来的外源性中子影响。

目前对放疗过程中产生的次级中子进行测量和模拟的研究大多集中在光子和质子放疗过程，对于碳离子治疗过程中产生的次级中子研究还比较少<sup>[10, 18-19]</sup>。本文基于医用重离子加速器示范装置(HIMM)的被动式束流配送系统，通过蒙特卡罗方法模拟计算，探究保守条件下(最大束流能量400 MeV/u，多叶光栅完全闭合)等中心周围来自被动式束流配送系统的外源性次级中子注量谱及其中子剂量当量谱。此外，还研究了不同束流线设置(多叶光栅开口大小)对于外源性中子剂量当量的影响。目的在于研究外源性中子特点，为不同治疗条件下患者接受非治疗辐射评估提供依据。

## 2 材料与方 法

### 2.1 模拟参数设置

中国科学院近代物理研究所与兰州科近泰基股份有限公司合作自主研发了中国首台医用重离子加速器示范装置(型号：HIMM-01-GS-WW-01)<sup>[20]</sup>，其共有4个治疗终端，分别采用主动式与被动式两种束流配送方式；

4个治疗终端分别从水平、垂直、水平+垂直、45°倾斜的不同方向进行治疗；在治疗终端等中心处的剂量率为0.001~1 Gy/s；在人体组织中的最大治疗深度为27 cm，可进行全体位照射治疗<sup>[21]</sup>。

本文模拟的HIMM 2号室被动式束流配送系统如图1所示<sup>[6]</sup>。束流通过扫描磁铁扫描在横向上扩展为15 cm×15 cm的方形照射野；穿过真空窗(a)后，受到初级准直器(b)的阻挡进而被初级准直。经过脊形过滤器(d)，单能Bragg峰在纵向上得到展宽，形成展宽的Bragg峰(SOBP)。束流经过射程移位器(e)调制射程后，利用多叶光栅(g)进行横向适形，最终高剂量区的三维分布与靶区的形状保持一致。补偿器(h)的使用让靶区后沿的剂量分布更加陡峭，有利于危及器官的保护。束流的强度由剂量探测器(c)测量并控制，束流的形状和位置由束流位置探测器(f)进行测量。模拟的中子注量谱由直径为12 cm的球体探测器(i)进行收集，中子注量探测器位于等中心点以及距离等中心点 $r=25, 50, 100, 150$ 和200 cm处，角度为与束流方向呈 $\theta=0^\circ, 45^\circ$ 和 $90^\circ$ ，共有16个中子注量探测器<sup>[22]</sup>。

为简化模拟，真空膜窗、射程移位器、补偿器、剂量探测器及束流位置探测器在本次研究中均不考虑。为了消除内源性中子对结果的干扰，采用自由束条件，不放置水模。模拟计算中各组件材料成分及其与等中心点的距离如表1所列。

表 1 模拟组件所用材料及其摆放

组件名称	材料质量分数/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	距离等中心的距离/cm
初级准直器	Cu-100	8.96	357
脊形过滤器	Al-100	2.7	236
多叶准直器	Cu-5, W-95	18.23	72

被动式束流配送系统可以针对不同的横向射野大小适当改变初级准直器的开口大小，以便最大化降低束流

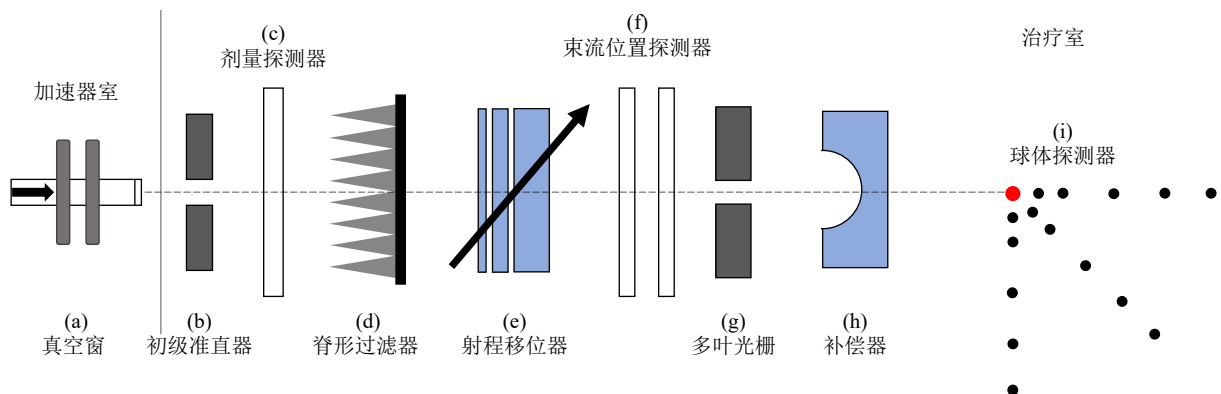


图 1 (在线彩图)HIMM 2号室被动式束流配送系统示意图

在后端的损失率。因为多叶光栅的次级中子产生率最大，将初级准直器的开口设置为最大即  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 。记录使用的直方图的组距宽度呈对数增加，每 1 个量级的组数为 40，能量范围为  $10^{-6} \sim 1\ 000\text{ MeV}$ 。为得到最大中子产额，大多数模拟中多叶光栅设置为完全闭合。探究多叶光栅开口大小对中子剂量当量的影响时，多叶光栅方形开口的边长以  $3\text{ cm}$  为间隔，从闭合一直增大到  $15\text{ cm}$ 。使用这种方法，我们计算了 6 种开口大小情况下，3 处探测器位置的中子剂量。模拟粒子数为  $1 \times 10^7$ ，使用服务器工作站上的 CPU(Intel® Xeon® CPU E5-2690 V3 @2.60 GHz×48，OS: Scientific Linux release7.6) 进行模拟计算。

## 2.2 模拟工具

本文采用的蒙特卡罗软件为 GATE v8.2/GEANT4-10-05。GEANT4(Geometry And Tracking)是由欧洲核子研究中心(CERN)开发的一套蒙特卡罗工具包，使用基于 C++ 面向对象技术，其用途是模拟粒子在物质中运输的物理过程。由于其灵活性，GEANT4 也被广泛应用于高能物理、核物理、空间和天体物理、辐射防护与探测，同时增加一些扩展包后，也可以将其应用到医学物理领域 [23]。GATE 是由 OpenGATE 团队基于 GEANT4 内核设计的一款模拟平台，主要用途是对计算机断层成像进行蒙特卡罗模拟，也能实现模拟粒子放疗的功能。本文使用的物理过程是 GEANT4 中的强子物理模拟包：QGSP\_BERT\_HP\_EMY。

## 2.3 次级中子剂量当量计算

不同能量单能中子的相对生物学效应有着很大不同，为了评估不同空间位置的中子剂量当量，需要将该位置的中子注量谱转化为剂量当量进行统一比较，剂量当量的计算公式为

$$H^*(10) = \sum_{i=1}^{\max} \Phi_i \cdot h_i, \quad (1)$$

其中： $H^*(10)$  为某点处中子剂量当量； $i$  为对应计数直条(bin)； $\Phi_i$  为第  $i$  个计数直条(bin) 记录的中子注量； $h_i$  为第  $i$  个计数直条组距中点能量所对应的中子注量-剂量转化系数。在 ICRP 第 74 号出版物中，发表了  $10^{-9} \sim 201\text{ MeV}$  能量范围内的中子注量-剂量当量转化系数，但是其范围无法覆盖碳离子放疗过程中产生的次级中子最大中子能量 [24]。Ferrari 等 [25] 于 1998 年发表了从  $2.5 \times 10^{-8} \sim 10^7\text{ MeV}$  能量范围的中子注量-剂量系数等相关实验模拟数据。应用上述文献数据进行插值得到全能量范围内的中子注量-剂量转换系数，如图 2 所示。

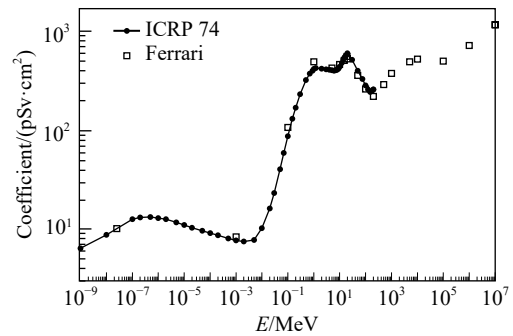


图 2 ICRP74 号报告与 Ferrari 文献中的中子注量-剂量当量转换系数

## 3 结果

### 3.1 单一束流线设置不同位置注量谱分析

首先我们考察了多叶光栅完全闭合的情况下，距离等中心点不同位置及角度的中子能谱。图 3 是经射程调制后展宽 Bragg 峰宽度为  $6\text{ cm}$  的  $400\text{ MeV/u}$  碳离子束被完全闭合的多叶光栅阻挡后，在距离等中心点不同角度和距离的注量谱分布结果。图中纵坐标为单位碳离子产生的中子注量；横坐标为中子能量，由于次级中子能量横跨 9 个数量级，探测时使用对数组距直方图记录，绘制时使用半对数坐标系。这种方式确保能谱曲线下每个矩形的底长保持不变，其相对注量和贡献正比于矩形的高 [16]。

从图 3 可以看出，碳离子放疗产生的次级中子注量谱主要有两个显著的峰区，第一个峰区由复合核退激出射的蒸发中子组成，能量范围为  $10\text{ keV}$  到  $15\text{ MeV}$ 。第二个峰区由核内级联产生的高能中子组成，其能量范围从  $15\text{ MeV}$  到碳离子束流能量的两倍，最大可达约  $1\ 000\text{ MeV}$ 。

根据不同峰的面积与总面积之比，计算不同种类中子的贡献率，如表 2 所列。统计结果表明，尽管碳离子束放射治疗过程中在等中心点周围的次级中子主要成分是低能蒸发中子，但也存在部分高能中子，其占比最大达到 22.45%。

### 3.2 单一束流线设置不同位置剂量当量谱分析

使用图 2 中的中子注量-剂量转换系数对不同位置的中子注量谱进行转换，得到中子剂量当量谱如图 4 所示，并计算不同种类中子贡献率如表 3 所列。由图表可知，高能中子的注量-剂量当量转换系数较大而部分蒸发中子(小于  $0.1\text{ MeV}$ ) 的转换系数较小，导致高能中子对于总中子剂量当量的贡献有所提升，其最高可达约 25.96%。

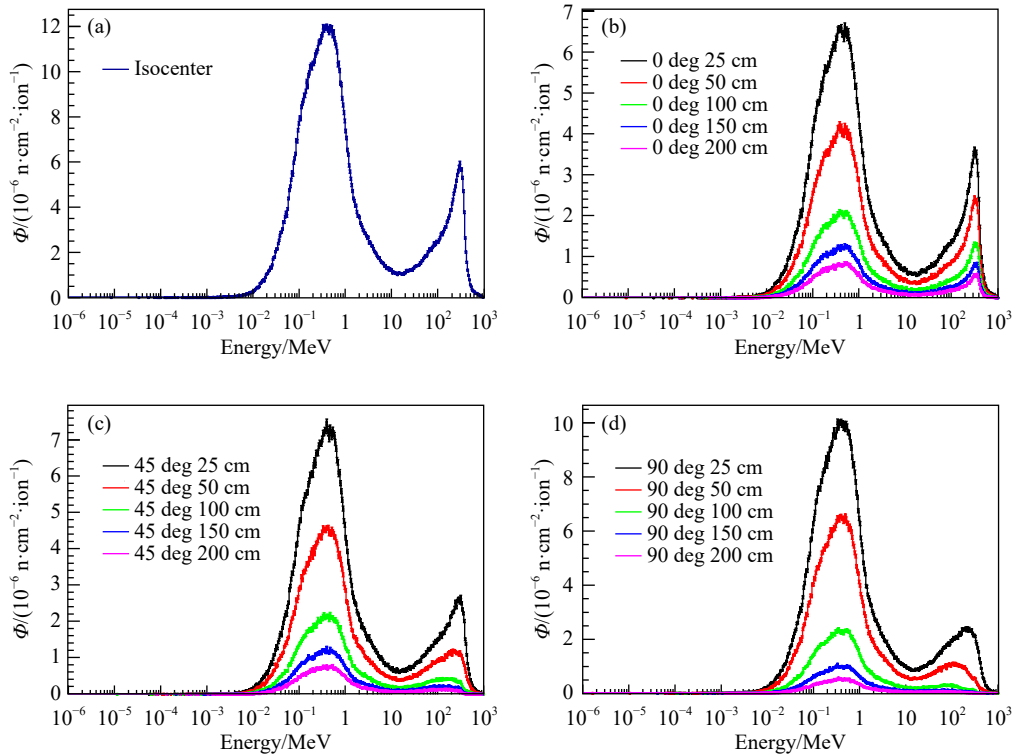


图 3 (在线彩图)不同测量点单位离子产生的中子注量谱, 纵轴为线性坐标系, 横轴为对数坐标系, 使用对数组距直方图 (a) 等中心点处中子注量谱; (b) 束流方向上不同位置处中子注量谱; (c) 与束流方向呈 45 度角不同位置处中子注量谱; (d) 与束流方向垂直不同位置处中子注量谱。

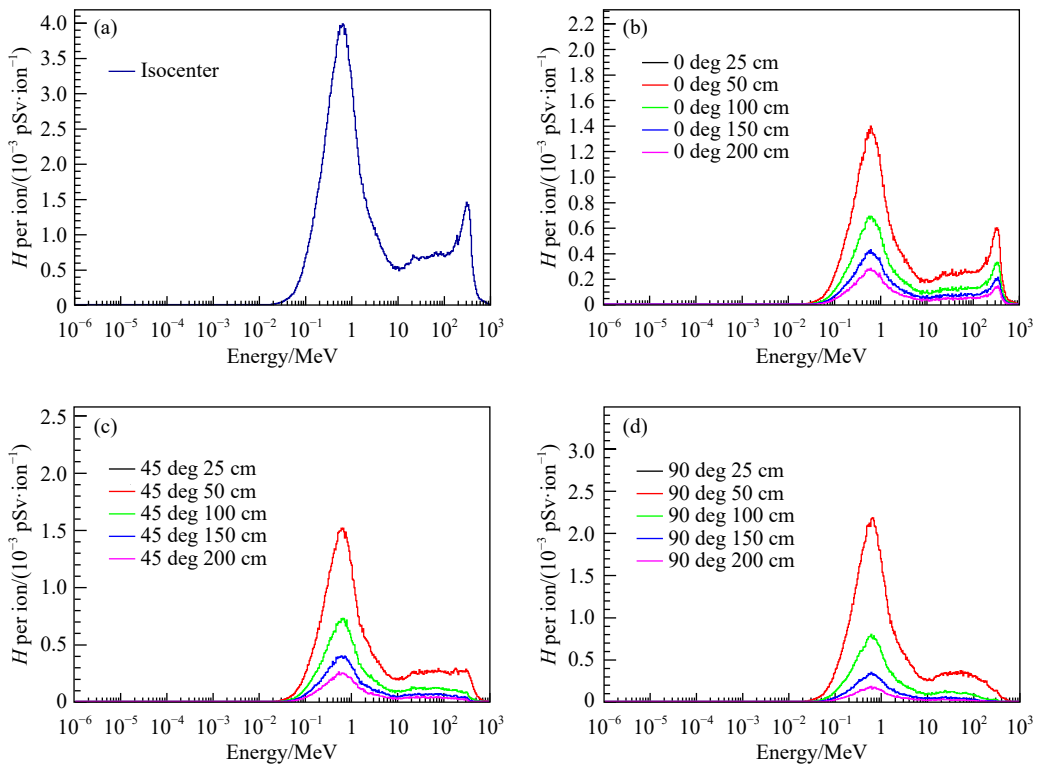


图 4 (在线彩图)不同测量点单位离子产生的中子剂量当量谱, 纵轴为线性坐标系, 横轴为对数坐标系, 使用对数组距直方图 (a) 等中心点处中子剂量当量谱; (b) 束流方向上不同位置处中子剂量当量谱; (c) 与束流方向呈 45 度角不同位置处中子剂量当量谱; (d) 与束流方向垂直不同位置处中子剂量当量谱。

表 2 各位置不同中子峰对注量总和贡献率表

位置	低能蒸发中子峰 贡献率/%	高能级联中子峰 贡献率/%
iso	80.57	19.43
0deg_25 cm	79.65	20.35
0deg_50 cm	79.06	20.94
0deg_100 cm	78.37	21.63
0deg_150 cm	77.84	22.16
0deg_200 cm	77.55	22.45
45deg_25 cm	81.82	18.18
45deg_50 cm	83.71	16.29
45deg_100 cm	86.20	13.80
45deg_150 cm	87.06	12.94
45deg_200 cm	87.50	12.50
90deg_25 cm	84.54	15.46
90deg_50 cm	88.34	11.66
90deg_100 cm	90.96	9.04
90deg_150 cm	91.54	8.46
90deg_200 cm	91.47	8.53

表 3 各位置不同中子峰对剂量当量总和贡献率表

位置	低能蒸发中子峰 贡献率/%	高能级联中子峰 贡献率/%
iso	76.87	23.13
0deg_25 cm	76.02	23.98
0deg_50 cm	75.41	24.59
0deg_100 cm	74.76	25.24
0deg_150 cm	74.28	25.72
0deg_200 cm	74.04	25.96
45deg_25 cm	77.98	22.02
45deg_50 cm	79.68	20.32
45deg_100 cm	82.06	17.94
45deg_150 cm	82.85	17.15
45deg_200 cm	83.31	16.69
90deg_25 cm	80.54	19.46
90deg_50 cm	84.21	15.79
90deg_100 cm	86.88	13.12
90deg_150 cm	87.48	12.52
90deg_200 cm	87.29	12.71

### 3.3 多叶光栅开口大小与次级中子剂量当量的关系

为了探究多叶光栅开口大小与中子剂量当量的影响, 分别模拟了多叶光栅的开口尺寸以 3 cm 为间隔从 0 cm×0 cm 逐渐扩大到 15 cm×15 cm 的 6 种情况下的中子剂量当量, 数据处理时以多叶光栅完全闭合时的中子剂量当量作归一化。图 5 显示了经过归一化处理后, 等中心点

(iso)、0°角(束流方向)距离等中心点 150 cm 处(0 deg\_150 cm)以及 90°角(束流横向方向)距离等中心点 150 cm 处(90 deg\_150 cm)这三处位置相对剂量当量强度随多叶光栅开口增大的情况。

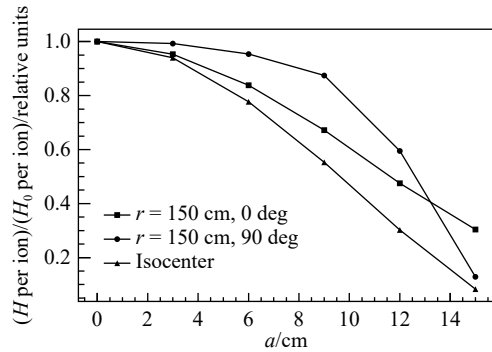


图 5 iso, 0 deg\_150 cm, 90 deg\_150 cm 相对剂量当量强度随多叶光栅开口增大情况

图 5 中的数据 displays: 随多叶光栅开口大小由完全闭合增大到 15 cm×15 cm, iso 与 90 deg\_150 cm(横向远端)处位置相对剂量当量强度降低约 85%, 0 deg\_150 cm(束流方向远端)处位置的相对剂量当量强度降低约 70%。

## 4 讨论

本文运用蒙特卡罗方法模拟计算了被动式束流配送系统引发的外源性中子在等中心点周围的注量谱和剂量当量谱, 并探究了患者环境固定位置剂量当量强度与多叶光栅开口大小的关系。实验结果表明, 高能中子对总中子剂量当量的贡献占一定比例, 且次级中子剂量当量随多叶光栅开口增大而降低。

模拟计算的中子注量谱所示(图 3), 与文献中质子治疗过程中测量的次级中子注量谱相比, 两者分布大致相同[16]。差异有以下两点: (1) 文献中次级中子实测注量谱存在峰位为  $10^{-7}$  左右的热中子峰, 而模拟结果不存在该峰。实测条件下该热中子峰是由于治疗室内屏蔽墙导致中子反射造成的, 而在模拟中简化了治疗室的屏蔽墙, 因此模拟中子谱中没有出现峰位为  $10^{-7}$  左右的热中子峰; (2) 文献中次级中子注量谱的能量覆盖范围和各成分比例与模拟结果略有差异, 这与模拟参数设置中束流粒子种类、束流线组件材料尺寸参数及其治疗条件不同有关。模拟结果中, 同一距离不同角度的次级中子注量谱进行比较, 蒸发中子峰形状基本不变, 说明蒸发中子空间分布受角度影响很小; 而级联中子峰随角度的增大逐渐平坦, 说明高能级联中子空间分布受角度影响较大, 且主要分布在小角度区域。蒸发中子各向同性分布, 级联中子前冲分布, 这与文献中高能碳离子束轰

击铜靶次级中子周围剂量分布规律模拟结果相符合<sup>[21, 26]</sup>。对中子注量谱和中子剂量当量谱进行分析发现, 在等中心点周围的次级中子成分主要是低能蒸发中子, 高能中子的贡献也不可忽视, 其对总剂量当量贡献率最高可达 25.96%, 建议在碳离子放射治疗剂量评估中保守估计高能中子的贡献。

通常认为多元限束装置阻挡束流所生成的次级中子是放疗中次级中子的主要来源<sup>[6, 27]</sup>, 因此本文针对多叶光栅所致非治疗辐射模拟研究的其中一个预期是: 随着多叶光栅开口增大, 束流在该器件中的损失率下降, 等中心点及周围区域的中子剂量当量强度也降低。图 5 实验数据变化趋势符合预期, 这也表明采用多叶光栅完全闭合的条件获得的中子注量及剂量当量是保守估计。

出于消除患者特异性对于模拟结果干扰的考虑, 本模拟研究没有考虑内源性中子, 聚焦于碳离子治疗系统被动式束流配送硬件系统本身产生的次级中子, 更能反映束流线设置对于次级中子辐射的影响。本研究的另一个优势是使用半对数能降直方图表示得到的次级中子注量谱, 直观地表达了全能量范围内不同成分中子的贡献占比。同时应当指出本文的研究所采用的研究方法(闭合多叶光栅以及空气中的中子注量研究)是一种保守而简单的方法, 用以估计碳离子被动式束流配送系统自身产生的中子辐射。

## 5 结论

本文利用 GATE 蒙特卡罗软件模拟计算被动式束流配送系统引发的外源性次级中子在等中心点周围位置的中子注量谱与中子剂量当量谱, 并对多叶光栅不同开口大小情况下的部分位置中子剂量当量进行对比。结果显示: (1) 保守情况下, 能量大于或等于 15 MeV 的中子对总中子剂量当量的贡献至少为 12.71%, 最高可达 25.96%; (2) 使用完全闭合的多叶光栅可以得到中子剂量当量的保守估计。

由于在碳离子治疗过程中高能次级中子的贡献不可忽视且其具有较高的相对生物学效应, 在碳离子治疗中心的辐射防护管理中需要加强对治疗中高能次级中子的监控。本文模拟计算剂量的方法还可应用于对不同治疗条件(如束流能量、调制宽度等)下等中心各个位置剂量当量进行模拟计算, 建立查找表, 为下一步精确评估患者所受中子剂量提供依据。以上关于碳离子治疗过程次级中子的研究对于降低患者接受碳离子治疗时产生后期效应的风险, 特别是对于预期寿命较长的儿童和青年患者有非常重要的指导意义。

## 参考文献:

- [1] LI Qiang, WEI Zengquan. *Nuclear Physics Review*, 1999, 16(4): 262. (in Chinese)  
(李强, 卫增泉. *原子核物理评论*, 1999, 16(4): 262.)
- [2] LOEFFLER J S, DURANTE M. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2013, 10(7): 411.
- [3] LI Qiang, WEI Zengquan. *Nuclear Physics Review*, 1997, 14(4): 243. (in Chinese)  
(李强, 卫增泉. *原子核物理评论*, 1997, 14(4): 243.)
- [4] LI Qiang, WEI Zengquan, LI Wenjian, et al. *Nuclear Physics Review*, 2001, 18(2): 109. (in Chinese)  
(李强, 卫增泉, 李文建, 等. *原子核物理评论*, 2001, 18(2): 109.)
- [5] HE Pengbo, LI Qiang. *Nuclear Physics Review*, 2013, 30(2): 174. (in Chinese)  
(贺鹏博, 李强. *原子核物理评论*, 2013, 30(2): 174.)
- [6] ZHANG Xiaofang, MENG Qianqian, DAI Zhongying, et al. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(2): 217. (in Chinese)  
(张小芳, 孟乾乾, 戴中颖, 等. *原子核物理评论*, 2020, 37(2): 217.)
- [7] TSUJII H, KAMADA T, SHIRAI T, et al. *Carbon-ion Radiotherapy[M]*. Japan: Springer Japan, 2014: 53.
- [8] PTCOG. Particle Therapy Facilities in Clinical Operation[EB/OL]. [2021-04-02].  
<https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation>.
- [9] AGOSTEO S, BIRATTARI C, CARAVAGGIO M, et al. *Radiotherapy and Oncology*, 1998, 48(3): 293.
- [10] HOWELL R M, KRY S F, BURGETT E, et al. *Medical Physics*, 2012, 36: 4027.
- [11] NISY E I, GEORG F, IRENA G, et al. PTCOG Report1, 2010, 1: 39.
- [12] KRY S F, BEDNARZ B, HOWELL R M, et al. *Medical Physics*, 2017, 44: e391.
- [13] YONAI S, MATSUFUJI N, KANAI T, et al. *Medical Physics*, 2008, 35: 4782.
- [14] ZHENG Y, LIU Y, ZEIDAN O, et al. *Medical Physics*, 2012, 39: 3484.
- [15] XU J K, SU Y W, LI W Y, et al. *Chinese Physics C*, 2017, 41(6): 068201.
- [16] HOWELL R M, BURGETT E A. *Medical Physics*, 2014, 41: 092104.
- [17] XU J K, SU Y W, LI W Y, et al. *Chinese Physics C*, 2016, 40(1): 018201.
- [18] POLF J C, NEWHAUSER W D, TITT U. *Radiation Protection Dosimetry*, 2005, 115(1-4): 154.
- [19] ZHENG Y, FONTENOT J, TADDEI P, et al. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, 53(1): 187.
- [20] XIAO Guoqing, LI Qiang, ZHANG Xiaoqi, et al. *Innovation in China*, 2020, 16(1): 9. (in Chinese)  
(肖国青, 李强, 张小奇, 等. *创新中国*, 2020, 16(1): 9.)
- [21] LI Wuyuan. Design and Development of Radiation Protection System for HIMM[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Modern Physics, CAS), 2017. (in Chinese)  
(李武元. HIMM辐射防护系统设计与研制[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2017.)
- [22] ZHENG Y, NEWHAUSER W, FONTENOT J, et al. *Physics in Medicine and Biology*, 2007, 52(15): 4481.

- [23] CARRIER J, ARCHAMBAULT L, BEAULIEU L, et al. *Medical Physics*, 2004, 31: 484. [26] KUROSAWA T, NAKAO N, NAKAMURA T, et al. *Nuclear Science and Engineering*, 1999, 132(1): 30.
- [24] SOWBY F D. *Annals of the ICRP*, 1981, 6(1): 200. [27] YONAI S, MATSUFUJI N. *Medical Physics*, 2009, 36: 4830.
- [25] FERRARI A, PELLICIONI M. *Radiation Protection Dosimetry*, 1998, 76(4): 215.

## Monte Carlo Study on the Characteristics of Secondary Neutrons in Passive Beam Delivery System of Heavy Ion Medical Machine

HUANG Shengcong<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2,3,4</sup>, CHE Yuhang<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Xingguo<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Weiqiang<sup>1,2,3,4</sup>,  
LI Qiang<sup>1,2,3,4</sup>, DAI Zhongying<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:** In carbon-ion radiotherapy, a variety of secondary particles are produced when carbon-ion beams pass through beam-line components during the dose delivery process and form an external radiation field. The predominant part of external radiation is from neutrons. As high LET radiation, low-dose neutron exposures have high relative biological effectiveness. Reducing the secondary neutrons can help to curb the risks of normal tissue complications and secondary cancers. The fluence and dose equivalent spectrums of exogenous neutrons induced by the passive beam delivery system of carbon ion therapy at different locations around the isocenter were simulated using the Monte Carlo method to evaluate the dose equivalent contribution of neutron radiation; The influence of the different collimating aperture sizes on the secondary neutron dose equivalent was also investigated. The simulation results show that high-energy neutrons had a certain contribution to the total neutron dose equivalent of the simulated locations, which account for up to 26%. Under real treatment conditions, as the collimating aperture size increased from closed to 15 cm×15 cm, the neutron dose equivalent decreased by approximately 85% at the isocenter and laterally distal locations, and about 70% at the distal locations in the beam direction. These results can be used to guide the study of secondary neutrons under different treatment conditions, and provide a basis for assessing non-therapeutic radiation received by patients under treatment conditions.

**Key words:** carbon ion radiotherapy; passive beam delivery; secondary neutrons; Monte Carlo method

Received date: 13 Apr. 2021; Revised date: 06 May 2021

Foundation item: National Key Research and Development Program of China(2018YFC0115700, 2018YFC0115702); Youth Innovation Promotion Association, CAS(2017454)

† Corresponding author: DAI Zhongying, E-mail: [daizhongying@impcas.ac.cn](mailto:daizhongying@impcas.ac.cn).