

文章编号: 1007-4627(2016)01-0105-07

HIRFL装置主动式点扫描束流配送系统的Monte Carlo模拟优化

闫渊林^{1,2,3}, 刘新国^{1,2}, 付廷岩¹, 戴中颖^{1,2}, 马圆圆^{1,2,3}, 黄齐艳^{1,2},
贺鹏博^{1,2,3}, 申国盛^{1,2}, 李强^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为获得适用于HIRFL装置主动式点扫描束流配送系统配送的碳离子束, 利用Monte Carlo (MC) 工具SHIELD-HIT12A研究了配送距离和微型脊形过滤器结构周期对治疗室等中心处束斑半高宽(FWHM)和剂量平坦度的影响。模拟研究发现: 束流配送距离越短, 束斑FWHM越小, 但剂量平坦度越差; 微型脊形过滤器结构周期是影响剂量平坦度的关键因素, 周期越小, 剂量平坦度越好。通过模拟研究得出: 在HIRFL装置重离子治疗终端将真空窗设置在距等中心距离小于125 cm时, 采用结构周期为2 mm微型脊形过滤器可以满足主动式点扫描照射对束斑FWHM和剂量平坦度的要求。

关键词: 束流配送; 点扫描; 半高宽; 剂量平坦度; 微型脊形过滤器

中图分类号: R815.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.01.105

1 引言

近年来, 重离子(如碳离子)放射治疗越来越倍受关注, 这主要是因为重离子束具有两方面的优势, 即物理学上的倒转深度剂量分布及生物学上的高相对生物学效应(RBE)。在重离子放疗中, 束流配送系统有两种方式: 被动式和主动式。被动式束流配送, 如日本国立放射线医学综合研究所(NIRS)的重离子医用加速器(HIMAC)^[1], 采用摇摆磁铁结合散射体将加速器提供的笔形束进行横向扩展形成大的均匀照射野, 利用脊形过滤器将束流纵向展宽形成与肿瘤在深度方向上厚度一致的展宽Bragg峰(Spread-out Bragg Peak, SOBP), 利用多叶光栅或患者射野特异准直器对均匀照射野进行构形, 采用射程移位器对束流射程进行调节, 进一步利用患者特异的补偿器对肿瘤靶区后沿进行适形。主动式束流配送, 以德国重离子研究中心(GSI)^[2]采用同步加速器主动变能及栅扫描系统为代表, 横向上利用扫描磁铁引导加速器提供的笔形束对肿瘤靶区某一等能量断层进行逐点照射, 纵向上通过调节束流

能量控制束流入射深度, 从而实现三维适形照射。由此可见, 二者的主要区别在于束流的构形方式, 前者使用附加的硬件装置对束流进行构形, 而后者通过对加速器的主动控制引导笔形束进行束流的构形。与被动式束流配送方式相比, 主动式束流配送系统不需要大量的束流调制设备, 减少了对束流的污染。此外, 主动式束流配送系统可以很方便地实现多射野照射条件下的粒子调强放射治疗, 即IMPT技术。因此, 主动式束流配送技术是当前重离子放疗技术的发展方向。

中国科学院近代物理研究所(IMP)依托兰州重离子研究装置(HIRFL)利用浅表肿瘤重离子治疗终端的被动式束流配送系统于2006年11月进行了我国首次重离子放疗临床试验, 2009年3月采用被动式束流配送方式利用基于HIRFL的冷却储存环(CSR)提供的高能碳离子束开始进行了深部肿瘤重离子治疗临床试验。截止到2013年底, 共有103例浅表肿瘤患者和110例深部肿瘤患者分别在HIRFL浅表肿瘤治疗终端和CSR深部肿瘤治疗终端接受碳离子束放射治疗^[3]。CSR深部肿瘤治疗终端可以实现重离子被动式和主动式两种方式的束

收稿日期: 2015-03-28; 修改日期: 2015-05-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国科学院大科学装置联合基金资助项目(U1232207); 国家自然科学基金资助项目(11205217, 11475231); 甘肃省杰出青年基金资助项目(1111RJDA010)

作者简介: 闫渊林(1989-), 女, 山西文水人, 博士研究生, 生物物理学专业, 从事重离子治疗技术基础研究;

E-mail: yanyuanlin@impcas.ac.cn

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

流配送^[4-5]。目前, CSR 深部肿瘤治疗终端主动式点扫描配送方法还未用于肿瘤的临床治疗试验研究, 尚存在一些问题有待解决, 其中治疗室等中心处的笔形束束斑半高宽 (FWHM) 偏大是其主要问题。为了解决这一问题, 在等中心处获得适合于点扫描的较小 FWHM 的笔形束, 本文利用 Monte Carlo (MC) 模拟工具 SHIELD-HIT12A, 以 CSR 深部肿瘤治疗终端为基础, 模拟研究了配送距离和微型脊形过滤器结构周期对治疗室等中心处的束斑 FWHM 的影响。另外, 因为微型脊形过滤器产生的剂量波纹效应与微型脊形过滤器距等中心的距离有关^[6], 本文也模拟研究了不同配送距离和不同微型脊形过滤器结构周期对治疗室等中心位置处剂量平坦度的影响。

2 材料与方法

2.1 SHIELD-HIT12A 模拟工具

SHIELD-HIT (Heavy Ion Therapy) 程序^[7-8]是在 SHIELD MC 模拟程序基础上扩展而来, 是被专门设计用来精确模拟离子束肿瘤治疗中质子和重离子束在生物组织材料中输运过程的 MC 计算工具。SHIELD 可模拟能量在 1 MeV/u 到 1 TeV/u 的任意原子核、核子、反核子、介子、 k 中介子的输运过程, 但不适用于粒子放射治疗的模拟。与 SHIELD 相比, SHIELD-HIT 对核反应模型、电离能损失计算和多重库仑散射计算等做了修改^[9-11], 将可模拟能量范围限制在 25 keV/u 到 2 GeV/u 之间。程序名“SHIELD-HIT”的数字后缀为版本号。从 SHIELD-HIT08 版本开始, 程序名引入后缀“A”, 表示其为 SHIELD-HIT 的一个分支, 目的是改善物理模型、计算速度及可用性。

在核反应模型方面, SHIELD-HIT12A 采用 Barashenkov 公式计算总反应截面, 采用多级动力学模型 (MSDM) 计算核碎裂部分电荷变化反应截面。在电离能损计算方面, 带电粒子阻止本领通过低能区的 Lindhard-Scharff 公式和中高能区的 Bethe-Bloch 公

式计算获得, 其中对 Bethe-Bloch 公式只做有效电荷修正, 没有加入壳层修正项。Lindhard-Scharf 和 Bethe-Bloch 公式的适用能量区间的界限通过满足阻止本领曲线为光滑曲线的要求而定。另外, SHIELD-HIT12A 还支持以 ICRU 阻止本领表的形式导入特定材料的阻止本领。在多重库仑散射计算中, SHIELD-HIT12A 提供 Moliere 和 Guassian 模型两种选择。同样, 能量歧离方面通过选项卡可以选择 Vavilov 模型或 Guassian 模型。与其他 MC 模拟工具如 Fluka^[12], Geant4^[13] 等相比, SHIELD-HIT12A 具有不修改原程序就直接模拟会聚束流和发散束流功能, 而且还可以直接读取、处理点扫描控制文件及脊形过滤器结构数据文件等功能。

2.2 HIRFL 装置的主动式束流配送系统及 SHIELD-HIT12A 的模拟条件

HIRFL 装置 CSR 深部肿瘤治疗终端的束流配送系统由一对水平及垂直方向上 (x 和 y) 的扫描磁铁、束流管道真空窗、主次两个在线剂量监测气体电离室、分条电离室及微型脊形过滤器等组成, 如图 1 所示。 x 和 y 方向上的扫描磁铁分别距治疗室等中心 838 和 766 cm。为兼顾被动式束流配送系统, CSR 治疗终端中 50 μm 厚 Kapton 膜束流管道真空窗设置在距治疗室等中心 318 cm 处。主次在线剂量监测电离室性能一致, 由入射出射窗、中心阳极和两侧阴极构成, 分别设置在距等中心 273.5 cm 及 263.5 cm 处。剂量监测电离室的中心阳极和两侧阴极分别采用 1.5 μm 镀金 Mylar 膜, 入射出射窗为 7 μm 单面镀铝 Kapton 膜, 采用了直径 0.1 mm 的不锈钢丝织成间距 5 cm 的网格支撑入射出射窗。作为束流位置探测器的分条电离室由入射出射窗、中心阴极及两侧 x, y 向位置极组成, 置于离等中心 253.5 cm 处, 其中入射出射窗与在线剂量监测电离室大小一致, 中心阴极为双面镀铝 20 μm Kapton 膜, 位置测量阳极为双面镀 98 条宽 1.7 mm、间距 0.3 mm、厚 35 μm 金条的 0.27 mm 厚硬质 PCB 板。由于单能碳

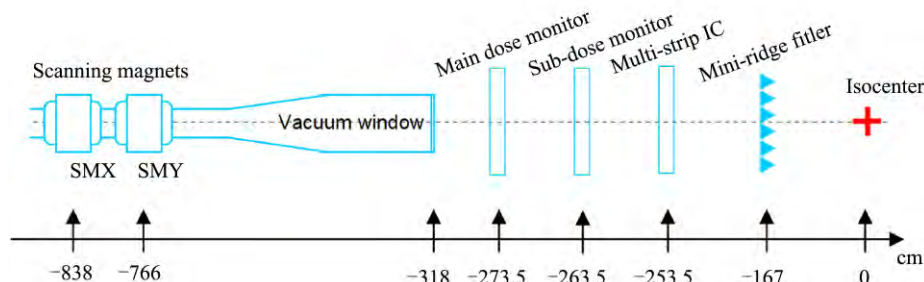


图 1 (在线彩图) HIRFL 装置 CSR 深部肿瘤治疗终端的主动式点扫描束流配送系统示意图

离子束的 Bragg 峰非常尖锐, 为了减少适形照射时对肿瘤靶区的分层数, 需利用微型脊形过滤器 (mini ridge filter) 将单能束流尖锐的 Bragg 峰略微展宽。微型脊形过滤器是由许多小峰组成, 主要原理是利用离子束穿过微型脊形过滤峰不同位置导致不同的降能, 使得单能碳离子束的能谱展宽, 从而形成 Bragg 峰区高斯型分布的展宽。在 CSR 治疗终端微型脊形过滤器被设置在距离等中心 167 cm 处, 由轻质金属材料铝加工而成, 峰峰间距 (即结构周期) 5 mm, 峰峰结构的基底厚度为 0.46 mm。

由于在线束流探测器内部结构复杂, 并且 SHIELD-HIT12A 不具备模拟网状几何结构体的功能, 因此为简便起见, 在 SHIELD-HIT12A 输入文件中对 CSR 治疗终端主动式点扫描束流配送系统采用的探测器做了一系

列简化。为研究何种情况下在 CSR 治疗终端等中心处能获得适合点扫描束流配送较小的笔形束束斑, 本工作首先模拟计算了现有束流配送系统设置情况下束斑随能量变化情况。除此之外, 本工作还将真空窗、主次剂量监测电离室、分条电离室、微型脊形过滤器作为整体设置在 5 个不同的位置处进行了模拟计算, 设置参数见表 1。由于微型脊形过滤器的结构特点, 当其距离等中心距离较近时容易产生条纹状横向剂量分布, 导致横向剂量分布不均匀。这是由于离子束运输到等中心处时未达到横向散射平衡导致的, 减少这种现象可以通过采用结构周期更小的微型脊形过滤器, 因此本工作在表 1 所列的束流配送设置基础上, 还分别模拟了微型脊形过滤器结构周期为 2 和 3 mm 的情况, 以期寻找理想的束流配送条件。

表 1 束流配送系统设备与等中心距离

单位: cm

束流配送系统的设置	真空窗	主监测电离室	次监测电离室	分条电离室	微型脊形过滤器
CSR 治疗终端现有设置	318	273.5	263.5	253.5	167
配送设置 A	210	203.5	193.5	183.5	167
配送设置 B	150	143.5	133.5	123.5	107
配送设置 C	125	118.5	108.5	98.5	85
配送设置 D	115	108.5	98.5	88.5	75
配送设置 E	105	98.5	88.5	78.5	65

需指出的是, 在模拟束流配送系统设置对等中心处束斑 FWHM 影响时, 对 SHIELD-HIT12A 采用等中心处聚焦笔形束源; 在模拟对束流均匀性影响时采用 8 cm × 8 cm 均匀束平面源, 而并不是采用由若干个笔形束形成的均匀束流。在 SHIELD-HIT12A 中, 将束流尺寸的 x 方向分量和 y 方向分量均设为 0、将束流散度的 x 方向分量和 y 方向分量均设为高斯型 1 mrad 来模拟在扫描磁铁处束流 FWHM 约 1 cm 的聚焦于等中心处的笔形束流源。在模拟均匀平行束流源时, 束流尺寸的 x 方向分量和 y 方向分量均设为 -4 cm, 束流散度的 x 方向分量和 y 方向分量均设为 0 mrad。为保证模拟的采样均匀以减小统计误差、计算时间在合理范围, 笔形束的模拟粒子数设为 5×10^6 , 剂量探测统计设置在等中心处, x , y 和 z 轴方向统计范围分别是 6, 6 和 0.1 cm, x , y 和 z 轴方向统计分辨率均是 0.01 cm; 均匀束流的模拟粒子数设为 3×10^7 , 剂量探测统计设置在等中心处, x , y 和 z 轴方向的统计范围分别是 12, 12 和 0.1 cm, x , y 和 z 轴方向的统计分辨率均是 0.1 cm。

2.3 数据处理

通常情况下, 模拟计算或实验测量等中心处笔形束束斑大小所获得的剂量分布结果可利用二维高斯函数进

行拟合, 如公式(1):

$$D(x, y, x_0, y_0) = \frac{a}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right], \quad (1)$$

其中: x_0, y_0 束流中心; σ_x, σ_y 为高斯分布参数; a 为横向积分剂量。

由于在 SHIELD-HIT12A 设置的初始笔形束流为对称的正高斯分布, 笔形束中心为探测器原点, 因此式(1)可简化为

$$D(x, y) = \frac{a}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

其中: $\sigma = \sigma_x = \sigma_y$ 。利用 MATLAB 对 2.2 节获得束斑剂量分布结果进行拟合, 再利用式(3)获得束斑 FWHM:

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2} \times \sigma = 2.355 \times \sigma. \quad (3)$$

射野内的剂量均匀性是在放疗中一个重要的指标, 本研究中采用放疗领域常用的剂量平坦度来衡量, 其定义如下:

$$\text{Flatness} = \left(\frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

其中： D_{max} 是射野内的最大剂量值； D_{min} 是最小剂量值。

3 结果与讨论

3.1 HIRFL装置主动式点扫描式束流配送系统下等中心处的束斑FWHM

为评估不同能量碳离子束在HIRFL装置CSR深部肿瘤治疗终端的主动式点扫描束流配送系统下等中心处束斑FWHM的变化情况，在SHIELD-HIT12A中分别设置了初始能量为100, 200, 300和400 MeV/u的碳离子束进行了模拟计算，结果如图2所示，4种不同能量碳离子束在等中心处的束斑FWHM分别为26.2, 13.9, 9.7, 7.5 mm。可以看到在相同初始状态下，碳离子能

量越高束斑越小，这是因为离子束能量越高束流经过的材料及空气对其的散射本领越小导致的。在主动式束流配送系统中，若束斑FWHM过大将导致射野横向半影增大，不利于靶区适形，若束斑FWHM过小虽能提高照射的适形程度，但是需要减小扫描点间距，导致每个束斑照射离子数减少不利于照射的精确控制。根据GSI的主动式栅扫描放疗的经验，束斑FWHM应控制在在4~15 mm之间^[14]。从上面的模拟结果不难看到，只要将治疗用的最低能量100 MeV/u和最高能量400 MeV/u碳离子束的FWHM控制在此范围之内，即可使得HIRFL装置CSR治疗终端满足主动式点扫描照射治疗试验研究，因此，本文以下部分将只考虑这两种能量碳离子束的模拟。

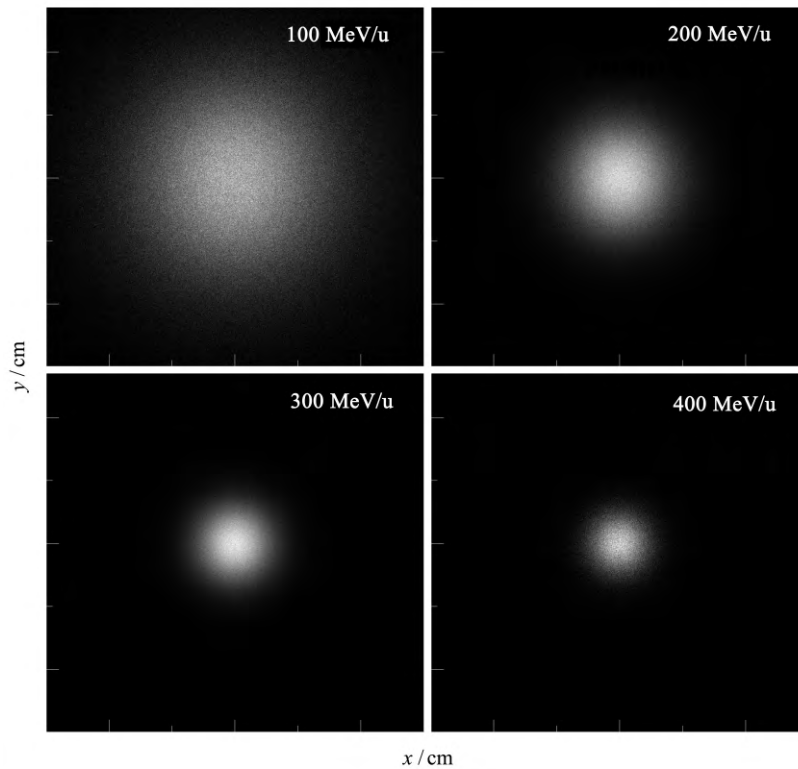


图 2 CSR治疗终端主动式束流配送系统下等中心处不同能量碳离子束的最小束斑模拟结果

3.2 束流配送系统设置对等中心处束斑FWHM的影响

现有的CSR治疗终端束流配送系统显然很难满足主动式束流配送系统的要求，因而有必要对CSR治疗终端的束流配送系统进行优化，为此本文以现有束流配送设备为基础在SHIELD-HIT12A中新建立了5种束流配送设置，如表1所列。图3是不同束流配送距离、结构周期不同的Bragg峰区微小展宽8 mm的微型脊形过滤器对治疗室等中心处束流FWHM影响的模拟结果。

结果显示，束流配送距离越短，微型脊形过滤器结构周期越小，等中心处束斑的FWHM越小。在束流配送设置如表1所列的C, D, E情况以及3种结构周期的微型脊形过滤器条件下，100 MeV/u的碳离子束在等中心处束斑的FWHM均在15 mm以下，400 MeV/u的碳离子束在等中心处可得到的束斑FWHM在4 mm以下。显然，在上述束流配送条件下，介于100和400 MeV/u能量之间的束斑FWHM也将介于4~15 mm之间。因此，在配送设置C, D和E情况下，即真空窗设置在离等中

心小于 125 cm 条件下, 等中心处的碳离子束斑 FWHM 满足进行主动式点扫描照射治疗的要求。

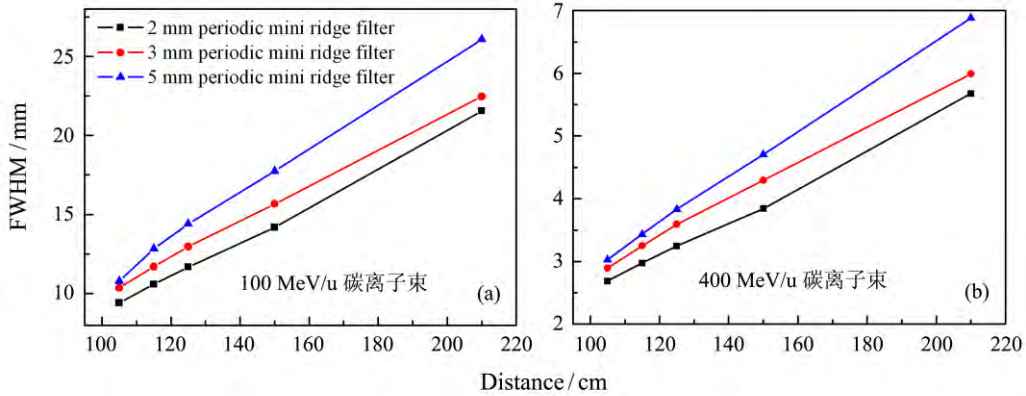


图 3 (在线彩图) 不同束流配送设置对等中心处束斑FWHM的影响

3.3 束流配送系统设置对等中心处剂量均匀性的影响

由于脊形过滤器是由周期性的山峰形结构组成, 束流穿过脊形过滤器在未达到散射平衡的条件下会导致横向剂量波纹状的不均匀分布。图 4 展示的是在表 1 所列束流配送设置 E 条件下, 结构周期不同的微型脊形过滤器对横向剂量均匀性的影响。取 $y = 0$ cm, $x = -2 \sim 2$ cm 区域计算剂量平坦度进行剂量均匀性评估。图 5 是表 1 所列配送设置 A~E 和 3 种微型脊形过滤器结构周期条件下, 等中心处的剂量平坦度分析结果, 由图 5(a) 可以得到, 100 MeV/u 的碳离子束在 5 种不同配送设置和 3 种不同微型脊形过滤器情况下, 剂量平坦度均

小于 5%, 满足碳离子束临床治疗的要求。由图 5(b) 可以得到, 对 400 MeV/u 的碳离子束, 当微型脊形过滤器结构周期为 2 mm 时, 5 种配送距离都满足剂量平坦度小于 5% 的要求; 当微型脊形过滤器结构周期为 3 mm 时, 只有配送设置 A 和 B, 即真空窗距离等中心不小于 150 cm 才能满足剂量平坦度小于 5% 的要求; 当微型脊形过滤器结构周期为 5 mm 时, 5 种束流配送设置均不能满足剂量平坦度要求。从图 4 和图 5 结果不难看出, 微型脊形过滤器结构周期、配送距离和束流能量对剂量平坦度均有影响, 其中微型脊形过滤器结构周期是关键影响因素, 周期越小, 均匀性越好; 微型脊形过滤器距等中心越远, 均匀性越好。在束流能量较高情况下这种现象尤为突出, 在低能束流情况下表现得并不显著。

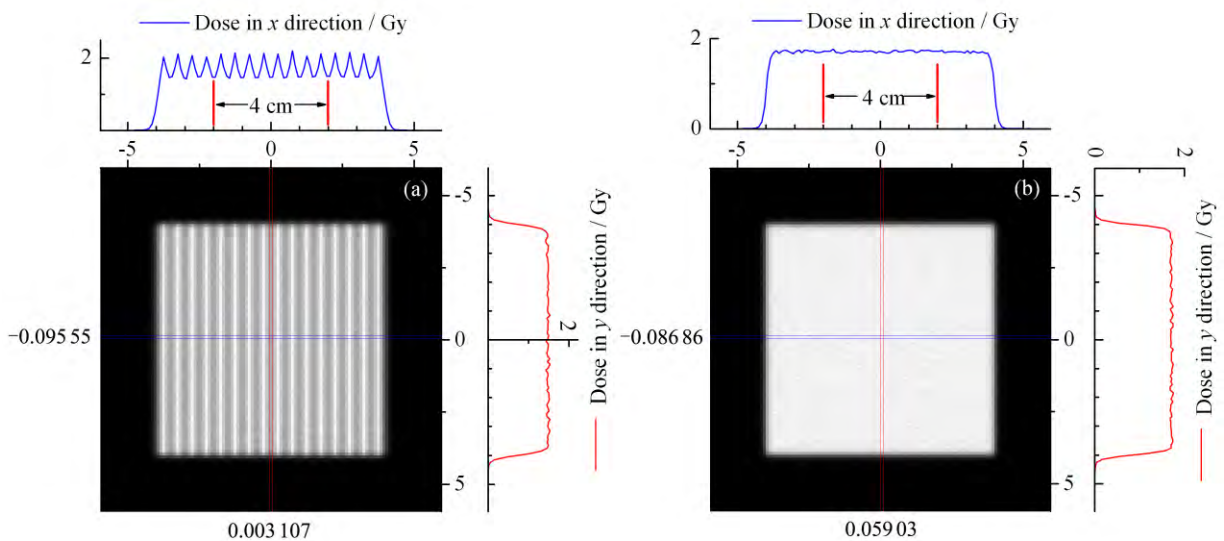


图 4 (在线彩图) 束流配送设置 E 情况下, 400 MeV/u 能量碳离子束流经过结构周期为 (a) 5 mm 和 (b) 2 mm 的微型脊形过滤器在等中心处的横向剂量分布情况

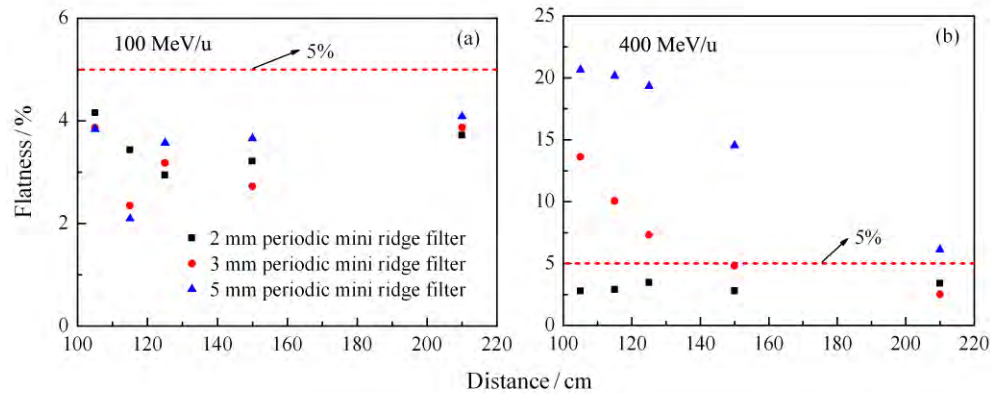


图 5 (在线彩图) 不同束流配送条件下, 碳离子束在等中心处的剂量平坦度

这主要是因为低能束流散射效应大, 更容易达到散射平衡。综上所述, CSR 治疗终端今后应采用结构周期较小的微型脊形过滤器进行主动式点扫描照射的测试与临床治疗试验研究。

4 结论

本文利用 MC 工具 SHIELD-HIT12A 模拟研究了 HIRFL 装置 CSR 深部肿瘤治疗终端点扫描束流配送系统对束流的配送情况, 以期解决目前束流配送条件下碳离子束在等中心处束斑 FWHM 偏大的问题。通过模拟分析点扫描束流配送设备距治疗室等中心的距离、微型脊形过滤器结构周期对治疗室等中心处的束斑 FWHM 和剂量平坦度的影响, 得到: 将真空窗设置在距等中心距离小于 125 cm 及微型脊形过滤器结构周期为 2 mm 的束流配送条件下, 100 ~ 400 MeV/u 之间治疗能量范围内的碳离子束在等中心处的束斑 FWHM 及剂量平坦度可以满足主动式点扫描照射治疗的要求。本研究作为今后进一步在 CSR 治疗终端开展肿瘤重离子主动式点扫描照射治疗临床试验研究提供了理论指导。

参考文献:

- [1] KANAI T, ENDO M, MINOHARA S, *et al.* International Journal Of Radiation Oncology Biology Physics, 1999, **44** (1): 201.
- [2] HABERER T, BECHER W, SCHARDT D, *et al.* Nucl Instr and Meth in Phys Res A, 1993, **330**(1-2): 296.
- [3] LI Qiang, LIU Xinguo, DAI Zhongying, *et al.* AIP Conf Proc, 2013, **1533**: 174
- [4] LI Qiang, LEMBIT Sihver. Nucl Instr and Meth in Physics Research B, 2011, **269**(7): 664.
- [5] DAI Zhongying, LI Qiang, LIU xingguo, *et al.* Chinese Physics C (HEP & NP), 2012, **36**(8): 784.
- [6] WEBER Uli, KRAFT Gerhard. Physics In Medicine And Biology, 1999, **44**(11): 2765.
- [7] BASSLER N, LUHR A, HANSEN D C, *et al.* SHIELD-HIT12A-User's Guide[EB/OL]. [2014-6-1]. <https://svn.nfit.au.dk/trac/shieldhit>.
- [8] BASSLER N, HANSEN D C, LUHR A, *et al.* Journal of Physics: Conference Series, 2014, (1): 489.
- [9] GUDOWSKA I, SOBOLEVSKY N, ANDREO P, *et al.* Physics In Medicine And Biology, 2004, **49**(10): 1933.
- [10] HANSEN D C, LUHR A, HERRMANN R, *et al.* International Journal of Radiation Biology 2012, **88**(1-2): 195
- [11] HANSEN D C, LUHR A, SOBOLEVSKY N, *et al.* Phys Med Biol. 2012, **57**(8): 2393.
- [12] FERRARI A, SALA P R, FASSO A, *et al.* Fluka:a multi-particle transport code. [EB/OL]. 2005-10-12[2013-12-1]. <http://www.fluka.org/fluka.php>.
- [13] KASE Y, KANEMATSU N, KANAI T, *et al.* Physics In Medicine And Biology, 2006, **51**(24): N467.
- [14] COMBS SE, JAEKEL O, HEBERER T, *et al.* Radiotherapy And Oncology, 2010, **95**(1): 41.

Monte Carlo Simulation Study on Optimizing the Active Beam Delivery System at HIRFL

YAN Yuanlin^{1,2,3}, LIU Xingguo^{1,2}, FU Tingyan¹, DAI Zhongying^{1,2}, MA Yuanyuan^{1,2,3},
HUANG Qiyang^{1,2}, HE Pengbo^{1,2,3}, SHEN Guosheng^{1,2}, LI Qiang^{1,2}

(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. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: To obtain carbon ion beams suitable for the active spot scanning beam delivery system at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL), the Monte Carlo program SHIELD-HIT12A was used to study the influences of beam delivery distance and structure period of mini ridge filter on full width at the half maximum (FWHM) of beam spot and dose flatness at the isocenter of the treatment room. The present simulation study shows that the shorter was the beam delivery distance, the smaller was the FWHM of beam spot, but the worse was the dose flatness. The structure period of mini ridge filter was a key factor to account for the dose flatness at the isocenter. The smaller was the structure period of mini ridge filter, the better was the dose flatness. Based on the simulation results, we conclude that 2 mm structure period for a mini ridge filter satisfies the requirements on the FWHM of beam spot and dose flatness at the isocenter for the active spot scanning beam delivery system at HIRFL when the distance between the vacuum window and the isocenter is set shorter than 125 cm in the nozzle.

Key words: beam delivery; spot scanning; FWHM; dose flatness; mini ridge filter

Received date: 28 Mar. 2015; **Revised date:** 24 May 2015

Foundation item: NSFC-CAS Joint Fund For Research Based On Large-scale Scientific Facilities (U1232207); National Natural Science Foundation Of China (11205217, 11475231); Gansu Provincial Funds For Distinguished Young Scientists (1111RJDA010)

Corresponding author: LI Qiang, E-mail: liqiang@impcas.ac.cn.